



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.

130f.: il.

Orientador: Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho.

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

Bibliografia: 105-112.

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

CDU 628.1:697.5

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

Assinatura

Data

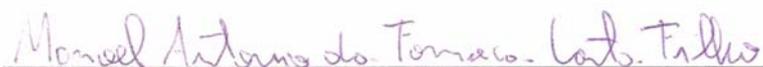
Adriano Gatto Lemos de Souza

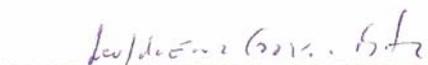
Desenvolvimento de software para projeto e sistemas centralizados de aquecimento solar de água

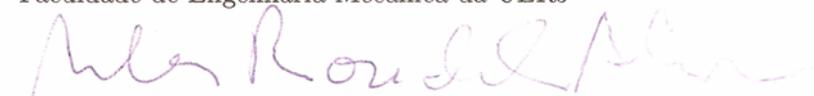
Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovado em 19 de março de 2009

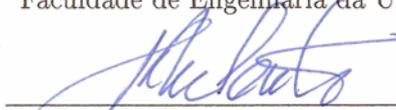
Banca Examinadora:

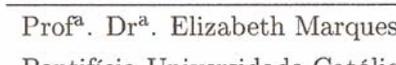

Prof. Dr. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho (Orientador)
Faculdade de Engenharia Mecânica da UERJ


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


Prof^a. Dr^a. 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^a. Dr^a. 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^a. Dra. Mila Rosendal Avelino, Prof. Dr. Norberto Mangiavacchi, Prof. Dr. José da Rocha Miranda Pontes e Prof^a. 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 guerreiros entusiasmados com as grandes conquistas.

EPÍGRAFE

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. 130f. 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 Radasol, 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

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: (http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra_carlofaria.pdf)	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: http://www.williams.edu/Astronomy/eclipse/eclipse1999/1999total/index.html).....	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: (http://br.geocities.com/fbdiniz/disc/latitude/latitude.html).....	41
Figuras 19 – Declinação.	
Fonte: (http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/sistercds.htm).....	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 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$).	
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];
- ∂A : Elemento de área (m^2);
- Ar : 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 absorbância da tinta dos coletores, para o ângulo médio de incidência da radiação direta;

$F_{R1}(\tau\alpha)_1$: 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 Δt (kg);

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

m_{AQ} : massa de água quente que sai para o consumo no intervalo Δt (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 $100^{\circ}C$;

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 ($W/^\circ C$);

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);

Vf : benefícios gerados com a instalação do SAS (R\$);

VPL : valor presente líquido (R\$);

Vo : valor do investimento inicial para a instalação do SAS (R\$);

Vp : valor anual parcial recuperado (R\$);

Vr : 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;

Xi : taxa de juros considerada para o termo i ;

Yi : VPL considerado para o termo i .

Letras gregas:

α : absorvância do coletor solar;

α_d : difusividade térmica (m^2/s);

α_s : ângulo de altitude solar [°];

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

β : inclinação do coletor [°];

β_k : coeficiente de expansão volumétrica (1/s);

δ : declinação do sol [°];

γ : ângulo azimutal da superfície [°];

λ : Longitude geográfica [°];

η_{AQ} : rendimento do aquecedor a gás natural;

τ : transmitância do coletor solar;

ϕ : Latitude geográfica [°];

η_C : eficiência do coletor solar [%];

η_C : eficiência do coletor solar [%];

θ_Z : ângulo zenital [°];

θ : ângulo de incidência da radiação direta [°];

μ : viscosidade absoluta ($N.s/m^2$);

ν : viscosidade cinemática (m^2/s);

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

ρ_{ar} : massa específica do ar [kg/m^3];

ρ_g : reflectância (albedo) da vizinhança nas proximidades do coletor solar;

ω_s : ângulo horário do pôr-do-sol local, em graus [°];

ω'_s : ângulo horário do pôr-do-sol no dia médio do mês (°);

ω : ângulo horário [°];

ω : ângulo horário [°];

Z : Altitude (m).

ΔTR : variação da temperatura média do reservatório no intervalo de tempo Δt (°C);

ΔE_R : variação da energia total no reservatório (kJ).

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Metodologia.....	6
1.4 A Energia no Brasil	7
2. Revisão de Bibliografia	11
2.1 Sistema de aquecimento solar de água em habitações	11
2.1.1 Coletor solar	12
2.1.1.1 Equação de Hottel-Whilier	13
2.1.1.2 Eficiência térmica do coletor.....	14
2.1.1.3 Fator de eficiência térmica do coletor (F').....	16
2.1.1.4 Fator de remoção de calor do coletor (FR).....	17
2.1.1.5 Fator de fluxo (F'')	17
2.1.1.6 Energia útil no coletor (Qu).....	18
2.1.1.7 Correção para a curva de eficiência.....	18
2.1.2 Reservatório de água quente.....	19
2.1.3 Fonte auxiliar de energia	20
2.1.4 Tubulações e isolamento térmico	21
2.1.5 Tipos de sistemas.....	23
2.1.6 Manual de Instalações Térmicas Solares.....	28
2.2 Radiação Solar.....	28
2.3 Solarimetria	35
2.4 Radiação Solar Incidente	40
2.4.1 Coordenadas Geográficas	40
2.4.2 Declinação δ	41
2.4.3 Ângulos Solares Derivados	42
2.4.4 Estimativa da Radiação solar.....	44
2.5 Atlas Solarimétrico Brasileiro	49
3. Materiais e Métodos	53
3.1 Demanda de Água Quente.....	53
3.1.1 Cálculo do volume total dimensionado por ponto $V_{total / ponto}$	53
3.1.2 Cálculo da demanda mensal de energia $L_{mês}$	56

3.2 Reservatórios Térmicos	56
3.3 Arranjo de Coletores Solares.....	61
3.3.1 Arranjos de coletores solares em série	62
3.4 Método F-Chart	63
3.5 Perdas térmicas nos reservatórios e tubulações.....	70
3.6 Análise Econômica.....	78
3.6.1 Valor Presente Líquido (VPL).....	78
3.6.2 TIR (Taxa Interna de Retorno).....	79
3.6.3 Tempo de Recuperação do Capital (TRC)	81
3.6.4 Período de Payback Descontado (PPB).....	82
3.7 Software Helios-Chart	83
3.8 Interface Gráfica do Software Helios-Chart:.....	92
4. Resultados	95
4.1 Fração solar	95
4.1.1 Comparação com Duffie & Beckman (1991).....	95
4.1.2 Comparação com Kehl (2004).....	97
4.2 Radiação solar	100
5. Conclusões	103
6. Sugestões para trabalhos futuros	104
7. Bibliografia	105

1. Introdução

1.1 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.

1.2 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.

1.3. 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 apresentam-se os resultados através da comparação da simulação realizada no *Helios-Chart* com simulações realizadas no *F-Chart* e *Termodim* de um projeto de um sistema de aquecimento solar de água para a república de estudantes da UFRGS elaborado por Kehl, (2004).

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.

1.4 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 m².

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.

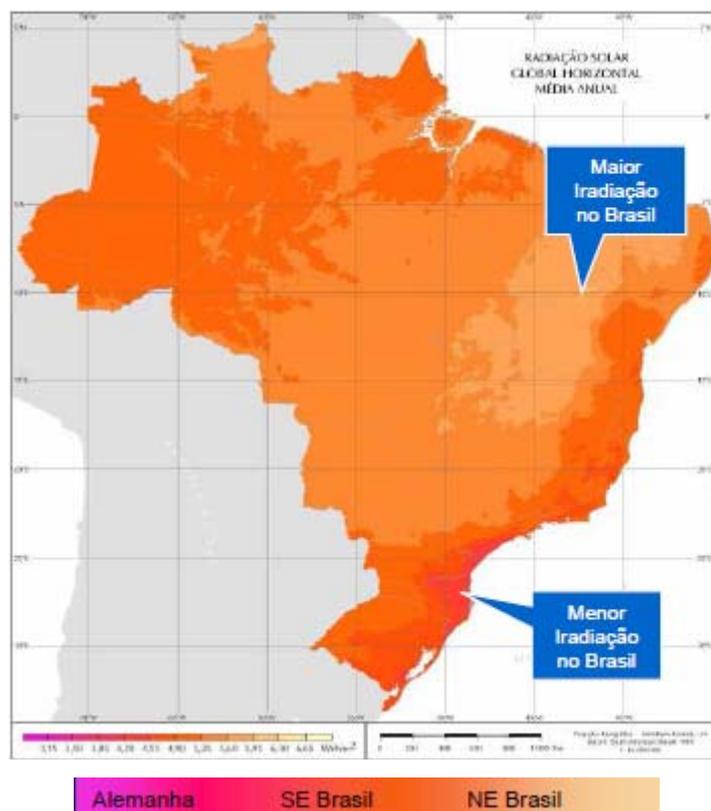


Figura 1 – Potencial energético brasileiro
(http://catedradogas.iee.usp.br/palestras/palestra_carlosfaria.pdf)

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.

2. Revisão de Bibliografia

2.1. Sistema de aquecimento solar de água em habitações

O uso da energia solar para aquecimento de água nas habitações é uma alternativa bastante interessante para o Brasil, uma vez que o país apresenta grande potencial de utilização, além de ser uma fonte energética renovável, limpa, ilimitada e disponível em todo território nacional.

Entretanto, a maior dificuldade para a difusão do aproveitamento da energia solar consiste no investimento inicial relativamente elevado, em equipamentos e instalações, quando comparado com os sistemas convencionais.

Em um estudo comparativo de custo entre os sistemas de aquecimento solar, a gás e chuveiro elétrico, realizado para um conjunto residencial localizado na cidade de São Paulo, verificou-se que em apenas cinco anos o custo de operação e manutenção do sistema de aquecimento a gás supera o do sistema de aquecimento solar (Taborianski et al., 2002). O tempo de retorno financeiro é dependente do custo do energético tradicional e da taxa de utilização do aquecimento de água.

Tradicionalmente, o sistema de aquecimento solar de água, é basicamente constituído pelo coletor solar, reservatório e componentes, que englobam uma fonte auxiliar de energia e uma rede de distribuição de água quente. A necessidade de um reservatório se deve ao fato de a demanda por água quente não coincidir, na maioria das aplicações, com o período de insolação e em função da existência de dias nublados e chuvosos. No caso de habitações residenciais, o consumo de água quente ocorre principalmente das 18 às 20 horas, mas a geração de água quente ocorre durante o dia.

A seguir, há uma breve descrição de cada elemento do sistema de aquecimento solar de água.

2.1.1 Coletor solar

Segundo Lima (2003, p. 11), “o coletor é o dispositivo responsável pela captação da energia proveniente do sol e sua conversão em calor utilizável”.

O coletor solar plano recebe e utiliza a radiação solar na mesma superfície. É composto por placa absorvedora na cor preta, tubulações por onde escoam o fluido a ser aquecido, isolamento térmico e, na maioria das vezes, cobertura transparente. Os coletores planos são utilizados para temperaturas da água abaixo de 93 °C (Hudson et al., 1985).

A placa absorvedora tem a função de converter a energia radiante em calor, transferi-la para as tubulações e, em seguida, para o fluido. Tanto as placas quanto as tubulações são construídas com metais de alta condutividade térmica, geralmente cobre, alumínio ou aço.

A cobertura transparente, geralmente feita de vidro comum ou policarbonato, reduz as perdas radiativas e convectivas da placa absorvedora, sendo responsável pelo efeito estufa ao refletir de volta a radiação infravermelha para a placa.

Como fluido a ser aquecido nas tubulações pode-se utilizar a própria água, ar ou algum outro. Quando é necessária proteção contra o congelamento utiliza-se como fluido de transferência o etileno-glicol ou o propileno-glicol (Lima, 2003), no caso de sistemas indiretos. No Brasil são raras as regiões onde há a presença de temperaturas ambiente negativas, por esta razão não é usual o emprego de soluções diatérmicas.

É recomendável que o material isolante do coletor seja capaz de resistir a temperaturas de até 204 °C sem produzir substâncias voláteis (ASHRAE, 1996 apud Lima, 2003). Os materiais mais usados são: fibra de vidro, espuma rígida de poliuretano e o poliestireno expandido. Qualquer que seja o material escolhido, deve ter um coeficiente de dilatação compatível com o dos demais componentes do coletor solar.

Conforme Lima (2003, p. 13), “as vantagens do coletor plano, em relação aos demais tipos, são: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, sem dificuldade de operar em dias nublados, relativa facilidade de reparo e durabilidade”. A figura 2 apresenta uma seção típica de um coletor plano.

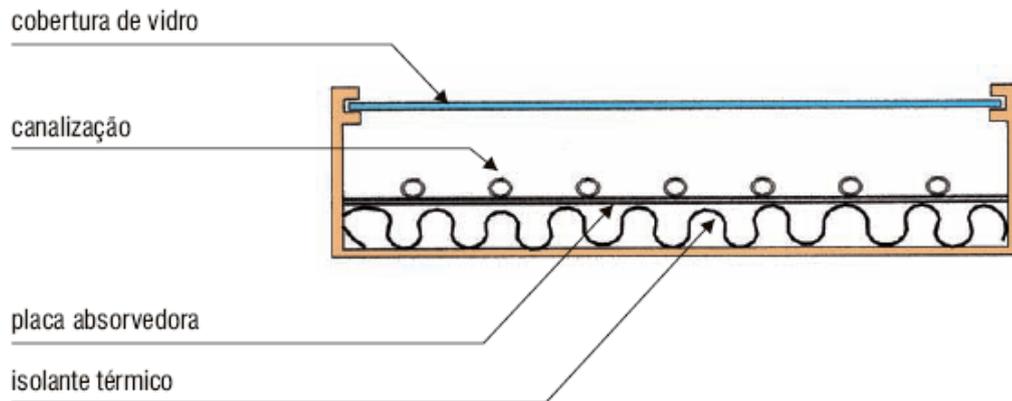


Figura 2 – Seção típica de um coletor de superfície plana. (Arruda, 2004).

As propriedades ópticas dos coletores planos podem ser melhoradas utilizando-se filme de teflon, vidro, tratamento anti-reflexivo e um refletor (Hellstrom et al., 2003).

2.1.1.1 Equação de Hottel-Whilier

A equação que governa o desempenho térmico do coletor solar plano é, de forma mais generalizada, uma aplicação do princípio da conservação de energia em regime permanente. Ela é baseada na diferença entre as energias absorvida e perdida, a qual é igualada a energia transferida ao fluido de trabalho. A equação 1 é normalmente chamada de equação de Hottel-Whilier (Duffie e Beckman, 1991).

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_{cu}} = [F_R G_T (\tau \cdot \alpha)_e - F_R U_L \cdot (T_{pm} - T_{ar})] = \frac{m \cdot cp}{A_S} (T_e - T_{pm}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

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

A_{cu} : área unitária do coletor solar [m²];

A_S : área da abertura a qual a placa absorvedora recebe irradiação do coletor [m²];

F_R : fator de remoção de calor do coletor;

G_T : energia solar incidente no plano coletor [W/m²];

\dot{m} : vazão mássica [kg/s];

c_p : calor específico do fluido a pressão constante [J/kg.K];

$(\tau \cdot \alpha)_e$: produto transmitância absorbância efetiva do coletor;

UL : coeficiente global de transferência de calor [W/m².K];

T_{pm} : temperatura média do absorvedor [°C];

T_{ar} : temperatura média do ar [°C];

T_e : temperatura do fluido na entrada do coletor [°C].

2.1.1.2 Eficiência térmica do coletor

A eficiência do coletor foi definida por Noam Lior (1990) através da equação 2.

$$\eta_C = \frac{\dot{Q}_u / A_S}{G_T} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

η_C : eficiência do coletor solar [%].

Então a eficiência também pode ser expressa pela equação 3:

$$\eta_C = F_R \cdot (\tau \alpha)_e - F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{T_e - T_{ar}}{G_T} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

ou ainda

$$\eta_C = \frac{m \cdot cp}{A_S G_T} (T_e - T_{pm}) \quad (\text{Eq. 4})$$

A equação 3 indica uma relação linear entre a eficiência e a função $\left(\frac{T_e - Tar}{G_T}\right)$. Para o cálculo da eficiência se assume $(\tau \cdot \alpha)_e = (\tau \cdot \alpha)_{e,n} \approx$ constante à temperaturas menores que 80°C. Porém, para condições transientes, objeto de estudos em versões futuras do *Helios-Chart*, onde o ângulo de incidência varia durante o dia, a equação para desempenho térmico deve ser corrigida por um fator K . O produto efetivo da transmitância x absorvância $(\tau \cdot \alpha)_e$ de um coletor solar pode ser descrito pela equação 5 (Souka e Safwat, 1966):

$$(\tau \cdot \alpha)_e = K_{\tau\alpha} (\tau \cdot \alpha) \quad (\text{Eq. 5})$$

onde, $K_{\tau\alpha}$ é o fator de correção do ângulo de incidência da radiação direta. Portanto para qualquer ângulo de radiação incidente, a eficiência térmica do coletor é definida pela equação 6:

$$\eta_C = F_R \cdot K_{\tau\alpha} \cdot (\tau \cdot \alpha)_e - F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{T_e - Tar}{G_T}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

A figura 3 mostra a variação de $K_{\tau\alpha}$ com os ângulos incidentes para três tipos de coletores. Como se observa, para coletores solares com apenas uma cobertura e com ângulos menores que 60° o fator de correção é muito próximo de 1. Desta forma, a versão 1.0 do *Helios-Chart* considera que a variação de K para a determinação da eficiência é mínima, portanto, será considerado igual a um $(\tau \cdot \alpha)_e = K_{\tau\alpha} \cdot (\tau \cdot \alpha)_{e,n} = 1 \cdot (\tau \cdot \alpha)_{e,n}$.

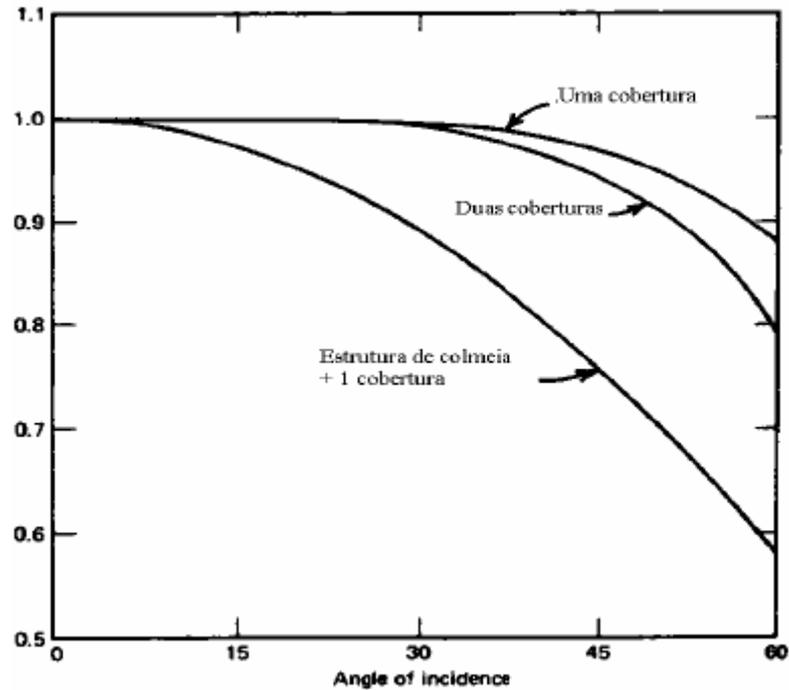


Figura 3 - $K_{\tau\alpha}$ para três tipos de coletores estacionários (Dijkers, 1990)

2.1.1.3 Fator de eficiência térmica do coletor (F')

O fator de eficiência térmica do coletor (F') representa a taxa de utilização da energia que é realmente transferida ao fluido de trabalho. Este fator depende do coeficiente de transferência de calor do coletor, da geometria da placa absorvedora e o material do qual ela é feita. Desta forma, para cada tipo de geometria de placas absorvedoras é necessária uma nova interpretação de F' . Hottel e Whillier (1958), Bliss (1959) e Whillier (1977) apud Duffie (1991) desenvolveram diversas equações em função da geometria da superfície absorvedora.

2.1.1.4 Fator de remoção de calor do coletor (FR)

O fator de remoção de calor (F_R) em um coletor solar relaciona a energia real obtida em um coletor com a energia que ele obterá se todo o fluido em seu interior fosse mantido na mesma temperatura de entrada. Este fator é dado pela equação 7 (Duffie e Beckman, 1991).

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)}{A_{cu} \cdot [G_T \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L (T_e - T_{ar})]} = \frac{\dot{m} \cdot cp}{A_{cu} \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{-\left(A_{cu} \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot cp \right)} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

T_s : é a temperatura do fluido na saída do coletor [$^{\circ}\text{C}$].

2.1.1.5 Fator de fluxo (F'')

O fator de fluxo F'' é definido como a razão entre o F_R e F' , conforme equação 8.

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot cp}{A_{cu} \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[1 - e^{-\left(A_{cu} \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot cp \right)} \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

2.1.1.6 Energia útil no coletor (Q_u)

A energia útil ou disponível no coletor também pode ser determinada pelo diferencial de temperatura do fluido entre a saída (T_s) e a entrada (T_e), conforme equação 9.

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (\text{Eq. 9})$$

A temperatura T_e pode ser tomada como a temperatura de entrada ou a de saída do fluido, ou a média entre elas. Métodos de ensaios para a determinação da eficiência térmica de coletores solares planos, são descritos na NBR 10184/88 (ABNT, 1988a) e ASHRAE Standard 93-1986 (1996 apud ASHRAE, 1999). Estes métodos são desenvolvidos para a condição de regime quase permanente, isto é, para a situação em que a vazão e a temperatura do fluido de trabalho na entrada do coletor solar são aproximadamente constantes no decorrer do tempo e as variações da radiação solar são pequenas. Em ambos os métodos, a temperatura de referência escolhida é a de entrada do fluido no coletor.

Em ambos os métodos as vazões dos ensaios são fixas. A NBR 10184/83 (ABNT, 1988a) estabelece 1 litro / min por unidade de área do coletor e a ASHRAE (1999) determina uma vazão de 0,0204 litros / (s/m²), ou seja, 1,224 litros/(min/m²).

2.1.1.7 Correção para a curva de eficiência

Para vazões menores da descrita no item anterior, a temperatura do coletor aumenta fazendo com que a eficiência diminua. Torna-se necessário fazer um ajuste nos valores de $F_r(\tau\alpha)_e$ e $F_r U_L$. Duffie e Beckman (1991) demonstram que estes novos valores podem ser encontrados fazendo:

$$r = \frac{|F_r'' \cdot U_L|_{uso}}{|F_r U_L|_{teste}} = \frac{|F_r'' \cdot (\tau\alpha)|_{uso}}{|F_r \cdot (\tau\alpha)|_{teste}} \quad (\text{Eq. 10})$$

e

$$r = \frac{\dot{m}_1 \cdot C_p}{A_c \cdot |F_r U_L|_{teste}} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c \cdot F' \cdot U_L}{\dot{m}_1 \cdot C_p}\right) \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde $F_r'' \cdot U_L$ e $F_r'' \cdot (\tau\alpha)$ são os novos valores para a nova vazão \dot{m}_1 e $F' \cdot U_L$ calculado pela equação 10. No entanto a nova vazão deve estar situada dentro da faixa de $\pm 25\%$ em relação à vazão de teste (Bastos, 1988).

2.1.2 Reservatório de água quente

O sistema de aquecimento de água por meio da energia solar define-se como um sistema de acumulação, ou seja, ele deve armazenar água aquecida durante o período em que não há insolação disponível e também para atender a demanda nos momentos em que esta supera a sua capacidade de aquecimento.

O reservatório do sistema de aquecimento solar deve responder, no mínimo, às exigências impostas a todos os reservatórios de água quente. Entretanto, esses reservatórios distinguem-se pela temperatura elevada que a água pode alcançar em seu interior.

O Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC (1999), recomenda a utilização de um reservatório vertical de uma altura que equivale a 2 a 2,5 vezes o seu diâmetro, a fim de assegurar uma boa estratificação da água pré-aquecida. Com a estratificação, a água mais quente se acumula na parte de cima do reservatório, enquanto que a água fria situa-se na parte inferior deste. Nos reservatórios horizontais, este efeito de estratificação é bem menor, de modo que o rendimento global do aquecedor pode ser prejudicado.

Para a fabricação dos reservatórios, utiliza-se, preferencialmente, aço inoxidável. No entanto, o cobre e o aço esmaltado com anodo de proteção também podem ser utilizados. Os reservatórios de aço galvanizado são desaconselhados devido a oferecer resistência insuficiente à corrosão, enquanto que os de material sintético podem ser usados apenas quando água é armazenada à baixa pressão.

Outro importante ponto a ser observado é a qualidade do isolamento térmico que reveste o reservatório. Ele deve ser projetado de modo que as perdas de calor para o meio sejam menores possíveis.

2.1.3 Fonte auxiliar de energia

Embora o sistema de aquecimento de água com energia solar seja de acumulação, ele não é projetado para fornecer 100% da demanda de água quente. Conforme observa Lima (2003), caso fosse adotado esse critério, o dimensionamento dos coletores e do reservatório térmico deveria ser feito para uma situação desfavorável, na qual se teria em conta o período mais frio e nublado para uma dada região. Desse modo, o sistema estaria superdimensionado para a maior parte do tempo de utilização.

Assim, em situação decorrente de vários dias sem insolação ou com insolação insuficiente, recorre-se a um aquecedor auxiliar que utiliza outra fonte de energia para suprir eventuais necessidades. Essa segunda fonte de calor é normalmente elétrica ou a gás.

O aquecimento auxiliar pode ser localizado internamente ao reservatório ou externamente. Quando externo, pode ser de acumulação ou de passagem, sendo o de passagem o mais usual. O chuveiro elétrico é um exemplo de fonte externa de passagem que pode funcionar com potência reduzida, de modo a complementar o aquecimento solar, quando este último for insuficiente.

2.1.4 Tubulações e isolamento térmico

A rede de distribuição de água quente do sistema de aquecimento solar deve ser projetada de acordo com os mesmos padrões utilizados nos sistemas de aquecimento por acumulação a gás ou elétrico, ou seja, a norma NBR 7198 – Projeto e execução de instalações prediais de água quente (ABNT, 1993).

Tradicionalmente as tubulações de água quente eram construídas de cobre. O cobre tem maior durabilidade (cerca de 50 anos, segundo a ABNT), suporta temperaturas de até 1.100°C sem deformação, não trinca e não desgasta. Porém, necessita de isolamento térmico, pois transmite o calor da água para a parede, podendo fazer descolar o revestimento (este serviço onera em cerca de 20% o custo de instalação e exige mão de obra qualificada).

Os materiais plásticos para condução de água quente chegaram ao mercado brasileiro há menos de 20 anos com a introdução do policloreto de vinila clorado CPVC. Indicadas para pressões de serviço de até 6,0 kgf/cm², as tubulações de CPVC para água quente dispensam as soldas e têm juntas realizadas a frio, mediante adesivo solvente apropriado, agregando velocidade de execução.

Em seguida foram lançados o polietileno reticulado (PEX) e o polipropileno copolímero Random (PPR), este último com juntas realizadas por termofusão, após a qual a junta passa a constituir um conjunto único com espessura reforçada. Por isso, conforme a classe de pressão, a instalação PPR suporta temperatura e pressão sob utilização superior à recomendada para tubulações de CPVC.

Os tubos de PPR disponíveis no mercado com mais frequência são relativamente rígidos, permitindo curvaturas permanentes com aplicação de ar quente, com raio não inferior a oito vezes o valor do diâmetro externo.

Mais flexíveis e maleáveis, os tubos PEX são fabricados em polietileno reticulado com ligação cruzada por processo termoquímico. No PEX do tipo A, a reticulação é obtida por reação química com peróxido de hidrogênio, o que lhe confere alta resistência à pressão, à temperatura e à fadiga mecânica. Menos resistente, o PEX tipo C tem flexibilidade maior do

que o tipo A.

Quanto à condutibilidade térmica, os tubos metálicos apresentam valores elevados, exigindo o uso de isolamento térmica adequada, ao passo que os tubos plásticos podem dispensar esse isolamento.

Em contrapartida, os tubos plásticos apresentam elevada dilatação térmica em relação aos tubos metálicos. Os tubos plásticos próprios para a condução de água quente apresentam um coeficiente de dilatação térmica entre 3,5 a 8,5 vezes maior do que o coeficiente de uma tubulação equivalente de cobre. Por isso, cuidados especiais devem ser tomados nos projetos e durante a execução de redes de distribuição de sistemas prediais de água quente, como a previsão de folgas para a movimentação térmica das tubulações em trechos embutidos e em elementos para absorver essas movimentações, na forma de juntas de expansão ou através do próprio traçado.

Recentemente, os tubos PEX e PPR incorporaram uma alma de alumínio, com juntas de alta pressão por deformação a frio, ou seja, um delgado tubo de alumínio revestido interna e externamente com esses materiais plásticos. Isso lhes conferiu maior resistência mecânica à tração, flexão e tensões radiais, e menor dilatação térmica, procurando conjugar no mesmo produto propriedades dos tubos metálicos com as dos tubos plásticos.

Quando a instalação de água quente encontra-se em temperatura maior do que a ambiente, as trocas térmicas resultam em perda de energia. Para reduzir tais efeitos se emprega basicamente uma camada de material de baixa condutividade térmica sobre as superfícies de troca.

O isolante térmico (como também o acústico) incorpora em seu interior uma grande quantidade de pequenas bolhas de gás, evitando sua movimentação e reduzindo assim a transferência de calor por convecção. Como a condutividade térmica do gás é baixa, a condutividade do isolante térmico tenderá a este valor. A condutividade térmica do material isolante varia com a temperatura de trabalho. Algumas características desejáveis ou necessárias dos isolantes são: resistência às temperaturas as quais será submetido (fusão e combustão); não toxidez; facilidade de aplicação; bom preço; resistência a agentes agressivos e as intempéries e resistência mecânica.

Para o isolamento térmico de tubulações, assumem particular importância os “*one-piece-pipe*” que são tubos de material isolante em uma peça única com corte longitudinal em um lado e um semicorte interno do lado oposto. Estão disponíveis em diversas espessuras e são facilmente ajustados ao tubo que se pretende isolar. São indicados ao isolamento de tubos de até 4”. Em altas temperaturas se efetua uma construção em dupla camada, visto que o tubo se expande significativamente. Assim o isolamento é efetuado em camadas duplas com juntas escalonadas. A alternativa seria o emprego de tubos bipartidos e segmentados (multi-partidos) que se constituem em segmentos iguais e separados. São a princípio indicados para tubulações com diâmetros nominais de 4” a 16”. Tal tipo de isolamento igualmente está disponível comercialmente em diversas espessuras.

Podem-se empregar ainda as mantas constituídas de materiais fibrosos, tais como fibra de vidro, fibra de silicato de alumínio e lã de rocha basáltica. Tais mantas podem ser empregadas para o isolamento de tubulações, dutos, flanges, tanques, vasos de pressão, etc.

Por fim pode-se também citar o cimento expandido, que incorpora grande quantidade de bolhas de gás em seu interior, e que é vertido em molde adequado antes de seu endurecimento.

2.1.5 Tipos de sistemas

Os sistemas de aquecimento solar de água podem ter quatro configurações diferentes: sistema passivo direto, sistema passivo indireto, sistema ativo direto e sistema ativo indireto. Quando o fluido a ser aquecido é a própria água, o sistema é definido como direto, enquanto que o indireto é aquele em que um fluido térmico recebe calor no coletor e o transfere à água em um trocador de calor. A circulação da água ou do fluido nos coletores pode ser feita por termossifão, configurando um sistema passivo, ou por um sistema de bombeamento, denominado sistema ativo.

a) Sistema passivo direto

Este é o sistema em que a água é aquecida diretamente pelos coletores e sua circulação é realizada por termossifão, ou seja, a diferença de densidade devido à variação de temperatura entre os coletores e o reservatório provoca um gradiente de pressão que coloca o fluido em movimento.

Devido ao seu simples funcionamento, é o sistema mais utilizado no aquecimento de água para fins domésticos. A figura 4 ilustra um sistema com um único reservatório onde a fonte auxiliar de energia está dentro da mesma e a figura 5 ilustra um sistema com dois reservatórios de água quente, no qual o segundo é um aquecedor auxiliar ligado em série.

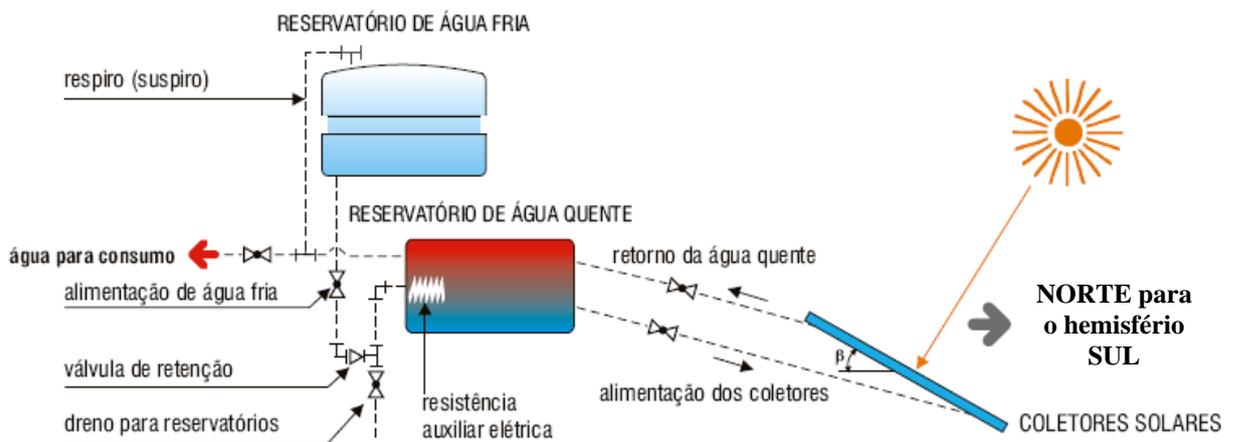


Figura 4 – Esquema de instalação de um sistema passivo direto com fonte de energia auxiliar interna ao reservatório de armazenamento de água quente (Lima, 2003).

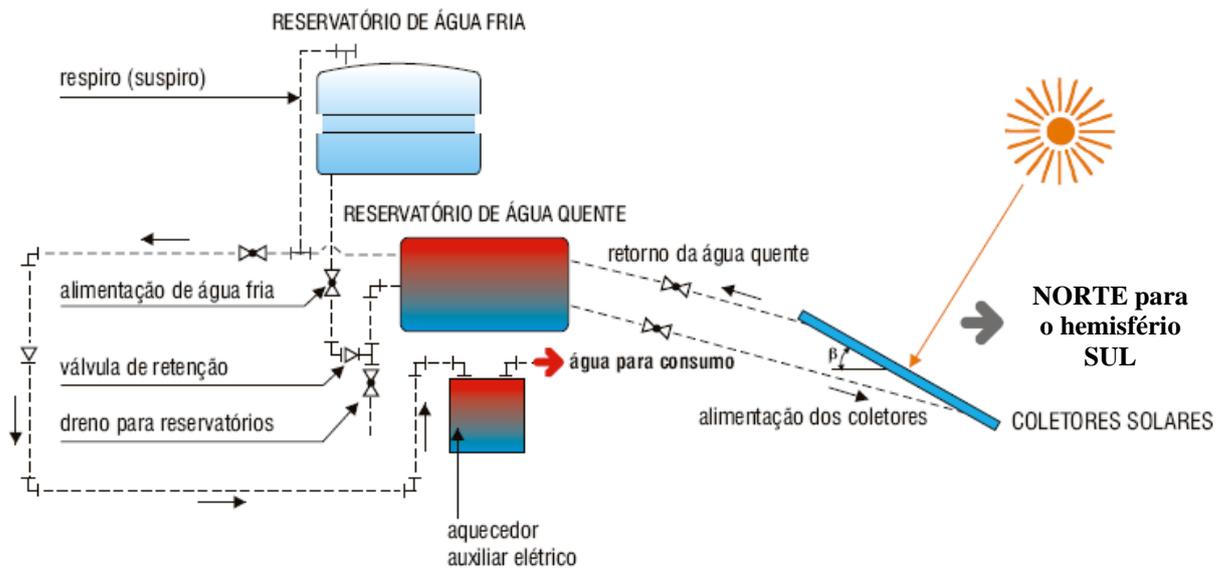


Figura 5 – Esquema de instalação de um sistema passivo direto com fonte de energia auxiliar externa ao reservatório de armazenamento de água quente (Lima, 2003).

b) Sistema passivo indireto

No sistema passivo indireto um fluido térmico recebe calor no coletor e o transfere à água em um trocador de calor. A circulação do fluido é feita por termossifão e o trocador de calor pode armazenar ou não um certo volume de água quente, conforme figura 6. O sistema indireto é o mais utilizado quando se deseja uma proteção ao congelamento em regiões de clima muito severo, pois é muito dispendioso.

Os fluidos refrigerantes etileno-glicol e propileno-glicol são os mais comuns embora existam diversos fluidos de transferência de calor como óleos siliconados, óleos hidrocarbonados e outros refrigerantes (Lima, 2003).

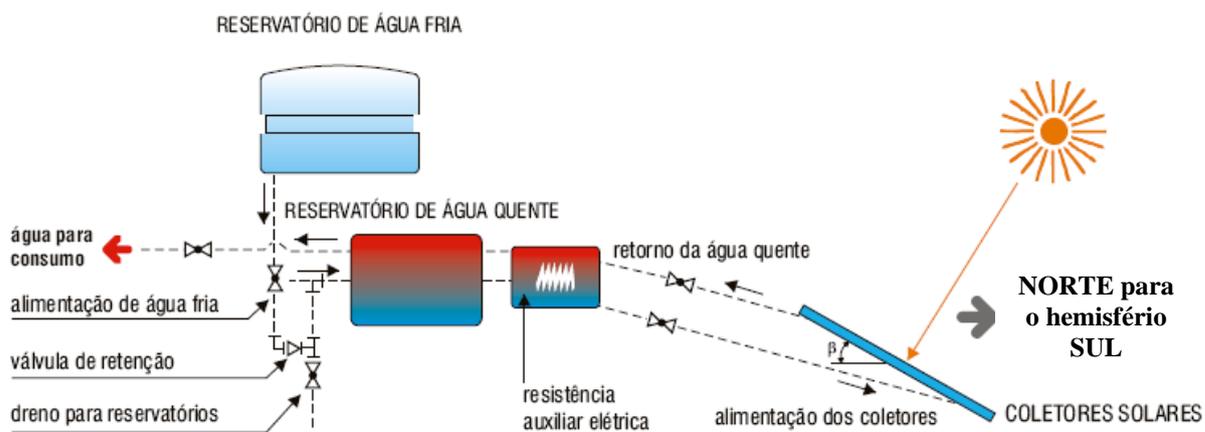


Figura 6 – Esquema simplificado de um sistema passivo indireto (Lima, 2003).

c) Sistema ativo direto

Neste sistema, a circulação de água é feita por uma bomba e a água é aquecida diretamente pelos coletores. Devido ao uso de bomba para a circulação da água, o reservatório pode estar situado em qualquer posição em relação aos coletores. A bomba é acionada quando a diferença de temperatura entre a parte superior do coletor e o reservatório atinge um valor preestabelecido. Seu desligamento ocorre quando esta diferença de temperatura torna-se pequena ou quando a água do reservatório alcança um valor desejável (Arruda, 2004).

A bomba também é utilizada como proteção contra o congelamento ao acionar a recirculação da água quente, quando a temperatura externa atinge um valor crítico. A proteção ao congelamento também pode ser efetuada pela drenagem da água dos coletores.

A vantagem do sistema ativo em relação ao passivo é a flexibilidade quanto à localização do reservatório na edificação, porém os custos aumentam por apresentar mais dispositivos como bombas, sensores e controles. A figura 7 apresenta um esquema desse tipo de sistema.

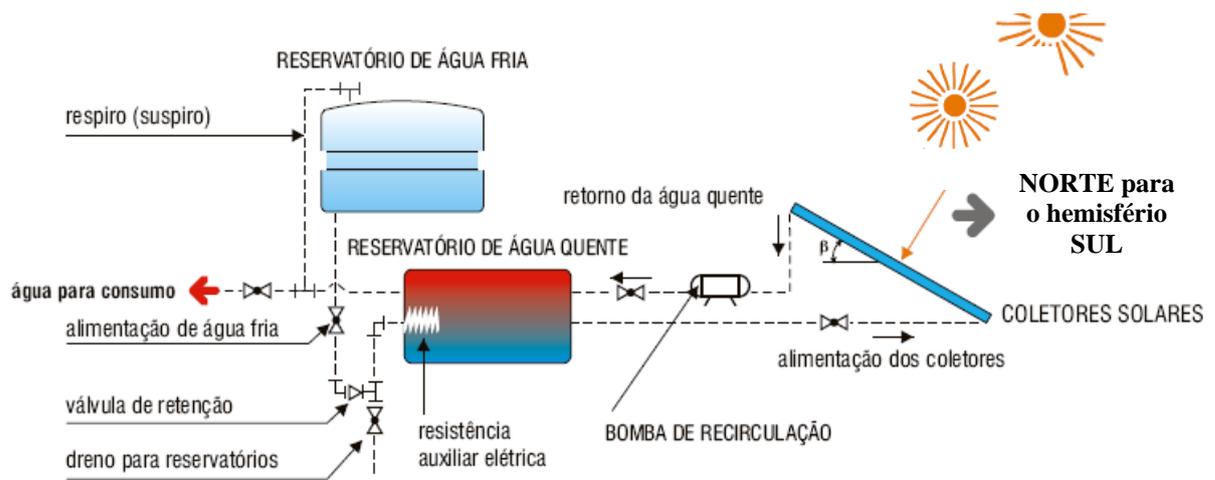


Figura 7 – Esquema simplificado de um sistema ativo direto (Lima, 2003).

d) Sistema ativo indireto

No sistema ativo indireto a circulação de água é feita por uma bomba ou duas bombas, dependendo do trocador de calor empregado, e um fluido refrigerante recebe calor no coletor e o transfere à água no trocador de calor. O trocador de calor, que transfere o calor do fluido para a água, pode ser externo ou interno ao reservatório, apresentando aspectos positivos e negativos em cada uma das situações. Se o trocador de calor for localizado externamente ao reservatório térmico, possibilita uma maior flexibilidade, contudo provoca maior perda de calor, conforme figura 8.

Este tipo de sistema é utilizado em regiões onde o perigo de congelamento da água nas tubulações é grande.

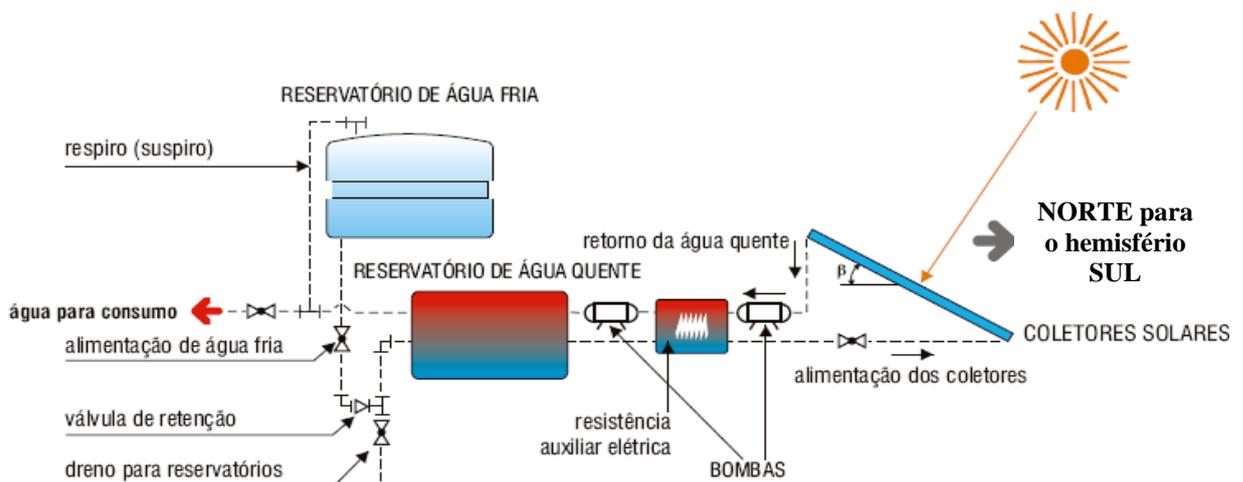


Figura 8 – Esquema simplificado de um sistema ativo indireto com trocador de calor localizado externamente ao reservatório térmico (Lima, 2003).

2.1.6 Manual de Instalações Térmicas Solares

A Sociedade para o Desenvolvimento Energético de Andalucía (SODEAN S.A., 2004) desenvolveu um manual com o objetivo de fixar as condições técnicas mínimas que devem seguir os projetos, os componentes e a montagem de instalações solares térmicas para a produção de água quente naquela Comunidade Autônoma. A Espanha, assim como Israel, obriga a instalação de sistemas de aquecimento solar de água em novas edificações e em reformas de porte. Na Espanha, este processo começou em 1999, com a aprovação da “*Ordenanza Solar*” e seguiu com grande sucesso até que, em 2005, o governo daquele país criou um novo Código Nacional de Edificações, transformando a proposta de Barcelona numa obrigação nacional. Em Israel, o uso de sistemas solares de aquecimento é obrigatório desde os anos 80.

2.2 Radiação Solar

Segundo Duffie e Beckman (1991, p. 3), o sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e está, em média, a $1,5 \times 10^{11}$ m da Terra,. A temperatura nas regiões internas centrais é estimada de 8×10^6 a 40×10^6 K e a densidade é estimada em ser cerca de 100 vezes a da água.

A composição química do sol é obtida através de uma técnica chamada espectroscopia, que nada mais é do que a análise do "espectro" produzido pela luz da estrela após passar por um prisma ou uma rede de difração, capaz de decompor a luz vinda do espaço em suas cores primárias. Desta forma apresenta-se na tabela 1 os principais elementos químicos que constituem o sol.

Elemento	Porcentagem
Hidrogênio	92,10
Hélio	7,80
Oxigênio	0,061
Carbono	0,03
Azoto	0,0084
Néon	0,0076
Ferro	0,0037
Silício	0,0031
Magnésio	0,0024
Enxofre	0,0015
Restantes	0,0015

Tabela 1 – Composição química principal do sol. Disponível na [www:<URL://br.geocities.com/kawakami_enc/carater.htm>](http://www.br.geocities.com/kawakami_enc/carater.htm)

No núcleo do sol acontece a geração de energia através de reações termonucleares. De acordo com Duffie e Beckman, a energia produzida no interior da esfera solar a temperaturas de muitos milhões de graus deve ser transferida para a superfície e depois ser irradiada para o espaço. Uma sucessão de processos radioativos e convectivos ocorrem com sucessiva emissão, absorção e reirradiação; a radiação no núcleo do sol está na parte de raios-X e gama do espectro, com os comprimentos de onda da radiação aumentando enquanto as temperaturas caem em distâncias radiais maiores. A figura 9 apresenta as principais regiões do sol.

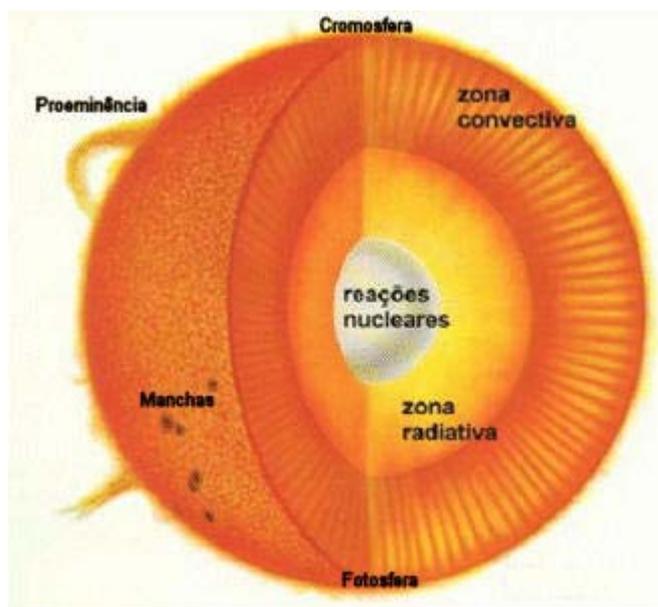


Figura 9 – Principais regiões do sol (Oliveira, 1997).

A fotosfera é a camada externa da zona convectiva. Ela tem a aparência de uma superfície cheia de grânulos, como ilustra a figura 10. Este fenômeno é chamado de granulação fotosférica. Os grânulos têm dimensões de 1000 a 3000 km e tempo de vida de alguns minutos. Segundo Duffie e Beckman, a fotosfera é a fonte da maior parte da radiação solar.

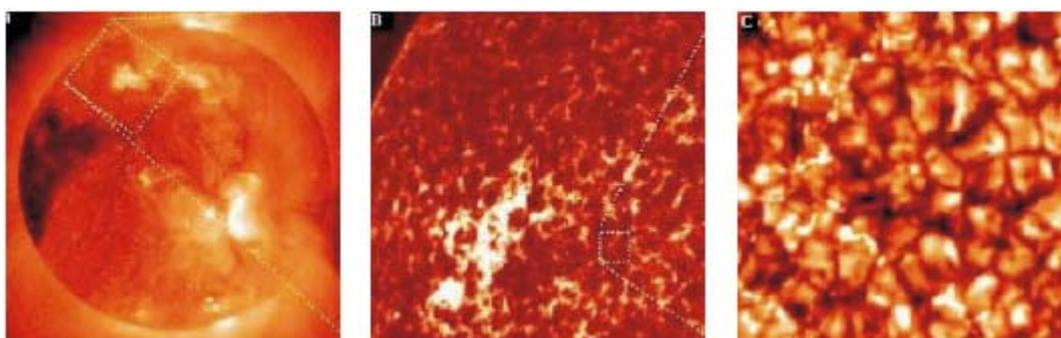


Figura 10 – Granulação fotosférica (Oliveira, 1997)

Segundo Oliveira Filho e Saraiva (2005), a cromosfera é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. Ela tem cor avermelhada e é visível durante os eclipses solares, logo antes e após a totalidade. De acordo com Duffie e Beckman, esta é uma camada gasosa com temperaturas maiores do que a fotosfera, mas de densidade mais baixa.

Ainda acima da cromosfera se encontra a coroa, uma região de baixa densidade e alta temperatura que também é visível durante os eclipses totais, como ilustrado pela figura 11.



Figura 11 – Eclipse Solar de 1999 na Romênia, com uma imagem ultravioleta tirada pelo satélite SOHO/NASA-ESA. Disponível em:

<[URL:http://www.williams.edu/Astronomy/eclipse/eclipse1999/1999total/index.html](http://www.williams.edu/Astronomy/eclipse/eclipse1999/1999total/index.html)>.

A radiação emitida pelo sol e sua relação espacial com a Terra resulta em uma intensidade quase fixa de radiação solar fora da atmosfera terrestre. A constante solar, G_{SC} , é a energia do Sol, por unidade de tempo, recebida em uma unidade de área perpendicular à direção de propagação da radiação, em uma distância Terra-Sol média, fora da atmosfera. O *World Radiation Center* (WRC) adotou o valor de 1367 W/m^2 , com incerteza na ordem de 1%, (Duffie e Beckman).

De acordo com Oliveira Filho, a constante solar varia, dependendo da época no ciclo de 11 anos, de 1364,55 a 1367,86 W/m², como observado na figura 12.

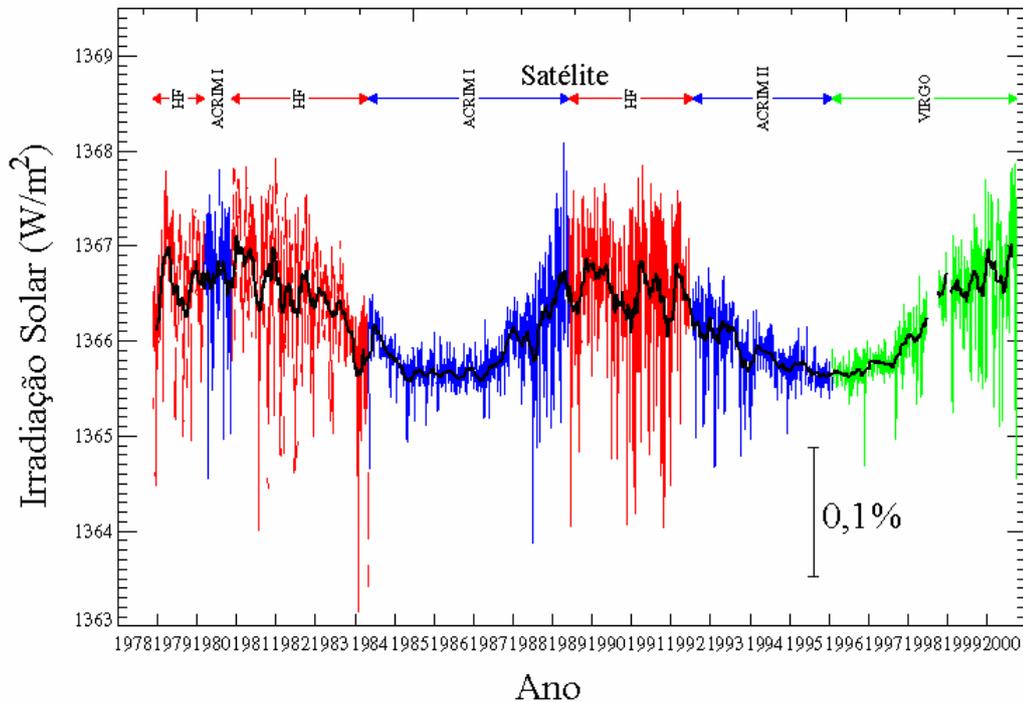


Figura 12 – Ciclos de variação da constante solar

Devem ser consideradas duas fontes de variação da radiação extraterrestre. A primeira é consequência de alterações na radiação emitida pelo Sol e a segunda é consequência da variação da distância entre a Terra e o Sol.

Observa-se, então, que a radiação solar emitida é o resultado da composição de sua emissão e absorção em vários comprimentos de onda e camadas.

A radiação de ondas curtas ou radiação solar possui faixa de comprimento de onda de 0,25 a 3,0 μm , sendo a porção da radiação eletromagnética que inclui a maior parte da energia irradiada pelo sol.

A radiação de ondas longas possui faixa de comprimento de onda maior do que 3,0 μm . Segundo Duffie e Beckman, a radiação de ondas longas é emitida pela atmosfera, pelo coletor ou por qualquer outro corpo a temperaturas normais.

O espectro da radiação solar é composto pela radiação ultravioleta, visível e infravermelha.

a) Radiação ultravioleta

Da constante solar, cerca de 9% está na porção do ultravioleta ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$). De acordo com Diffey (2002, p. 4), tanto a qualidade (espectro) como a quantidade (intensidade) da radiação ultravioleta terrestre varia com a elevação do sol sobre o horizonte, ou altitude solar. A altitude solar depende da hora do dia, do dia do ano e da localização geográfica (latitude e longitude).

Segundo Diffey (2002, p. 7), em um dia de verão, UVB (quando tomada como 290-320 nm) constitui aproximadamente 6% da radiação ultravioleta terrestre e UVA (quando tomada como 320-400 nm) constitui os 94% restantes.

Entretanto a radiação UVB corresponde ao causador de 80% dos danos biológicos enquanto que a radiação UVA é responsável pelos 20% restantes.

De acordo com Echer et al. (2001, p. 277), o O_2 (oxigênio molecular) e o O_3 (ozônio) mostram fortes bandas de absorção na região ultravioleta do espectro eletromagnético.

b) Radiação infravermelha

De acordo com o Glossário do Observatório Nacional do Ministério das Minas e Energia (2005), esta é uma região (ou banda) do espectro eletromagnético que está situada entre as regiões do visível e a de microondas. Deste modo, vemos que a radiação infravermelha é uma radiação eletromagnética com comprimentos de onda longos, o que a coloca na parte invisível do espectro eletromagnético. Conseqüentemente, os fótons da luz infravermelha são menos energéticos do que os fótons que compõem a luz visível. A radiação infravermelha não é percebida pelo olho humano. No entanto, sente-se a presença de ondas de radiação infravermelha por meio do calor.

A radiação infravermelha divide-se em:

A radiação infravermelha próximo: ondas eletromagnéticas com comprimento entre 0,8 e 3,0 μm .

A radiação infravermelha térmica: ondas eletromagnéticas com comprimento entre 3,0 e 10,0 mm.

Segundo Echer et al. (2001, p. 277), o H_2O (vapor de água) e CO_2 (dióxido de carbono) absorvem fortemente radiação na região do infravermelho.

c) Balanço radiativo

Segundo Brasseur e Solomon (1986 apud Echer et al., 2001, p. 277) a presença de espécies absorvedoras ocorre em toda a atmosfera terrestre, sendo os comprimentos de onda mais curtos do ultravioleta absorvidos na mesosfera (acima de 60 km), os intermediários na estratosfera (entre 20-30 km, pelo ozônio) e a radiação infravermelha na baixa estratosfera e troposfera.

De acordo com Echer et al (2001, p. 278) um parâmetro de grande relevância em termos de balanço radiativo são as nuvens, que são observadas cobrindo parte do planeta praticamente todo tempo. As nuvens exercem papel muito importante, refletindo intensamente e absorvendo a radiação solar na faixa de 8 a 12 μm . Elas apresentam um elevado índice de refletividade que varia com a espessura das mesmas e com a quantidade de água nelas existentes. A maior parte da reflexão da radiação solar pelas nuvens se faz diretamente ao espaço, sendo assim considerada como energia perdida para a superfície terrestre; uma certa parte, porém, se reflete na superfície inferior das camadas de nuvens mais elevadas e com isso é refletida de volta para a Terra.

2.3 Solarimetria

É o ramo da meteorologia que se dedica a medição de parâmetros relativos à radiação solar. Esses parâmetros, tais como número de horas de sol em um dia, insolação, radiação direta e radiação difusa, radiação global e em casos mais específicos a radiação em determinados comprimentos de onda, são usados em diversas aplicações de diferentes áreas do conhecimento (Tiba et al., 2000).

Em particular, para o uso da energia solar para aquecimento de água, esses parâmetros são fundamentais, pois possibilitam estimar, com precisão satisfatória, a quantidade de energia recebida e, assim, dimensionar as instalações e equipamentos envolvidos no processo, como os coletores solares.

A seguir são apresentados os principais instrumentos usados para medição da radiação solar.

a) Heliógrafo

Instrumento usado para medir a duração diária do brilho solar, a insolação (Tiba, 2000). O heliógrafo mais usado é o de Campbell-Stokes, que é composto por uma esfera de quartzo polida, conforme um calibrador, com aproximadamente 96 mm de diâmetro, que atua como uma lente convergente, queimando uma fita de papel, que serve como medida do tempo de duração do brilho solar e em que hora houve insolação, como mostra a figura 13 (Oliveira, 1997; Tiba, 2000).



Figura 13 – Heliógrafo de Campbell- Stokes. (Laboratorio de Evaluación Solar, 2006).

b) Piroheliômetro

Instrumento que mede a irradiação (W/m^2) que incide numa superfície plana perpendicular à incidência da radiação solar. A radiação atinge o sensor no instrumento através de uma abertura que permite apenas a visão equivalente ao disco solar e uma pequena parcela da radiação proveniente do céu próximo ao sol. Os piroheliômetros acompanham o movimento do sol ao longo do dia, de forma a que a radiação incida em ângulo normal em relação ao sensor do instrumento.

Existem diversos modelos disponíveis, com precisão entre 0,2 a 0,5%, e com diferentes princípios de funcionamento. De forma geral, os piroheliômetros possuem um colimador, de forma a obter somente radiação proveniente do disco solar. O colimador é composto por um tubo que direciona os feixes de radiação, com uma termopilha em uma das extremidades. O colimador é fixado em uma base que permite o acompanhamento do movimento do sol ao longo do dia (Duffie e Beckman, 1991).

Os piroheliômetros são divididos em três classes, de acordo com a precisão do instrumento. Os instrumentos padrão são usados para calibração de instrumentos de menor precisão. Os piroheliômetros são usados para calibrar outros instrumentos, como piranômetros. Os parâmetros considerados para classificação são: sensibilidade (m.W.cm^{-2}); estabilidade (%); temperatura (variação de sensibilidade com a temperatura); resposta espectral (%); linearidade (%) e constante de tempo (Tiba, 2000). A figura 14 mostra um modelo desse tipo.



Figura 14 – Piroheliômetro montado em base telescópica (Oliveira, 1997)

c) Piranômetro

Instrumento que mede a irradiação (W/m^2) total (também chamada de irradiação global), direta e difusa, num plano horizontal. A sensibilidade dos sensores à radiação independe do ângulo de incidência dos mesmos (Duffie e Beckman, 1991; Oliveira, 1997). Os dados coletados com esses instrumentos são os mais utilizados em simulações e cálculos da energia recebida por coletores solares.

Os três tipos mais comuns de piranômetros são os que utilizam termopilhas (fotocondutivo), os que utilizam elementos bimetálicos (bolométrico) e os que utilizam sensores fotovoltaicos (fotoelétricos). Os primeiros são mais precisos, porém requerem uma alimentação de energia constante, enquanto os segundos funcionam sem o uso de energia elétrica e por isso, de menor custo.

Existem diferentes modelos de piranômetros com termopilha, mas de forma geral a radiação incidente é medida através da diferença de potencial obtida pela diferença de temperatura de dois materiais: um com elevada absorvância e o outro com elevada refletância. Os sinais emitidos são detectados por um potenciômetro. Os dados registrados são integrados num intervalo de tempo. Além do erro associado ao aparelho (aproximadamente 5%), soma-se o erro na integração dos valores. A Figura 15 apresenta um modelo desse tipo (Duffie e Beckman, 1991).

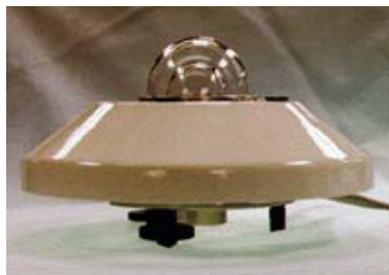


Figura 15 – Piranômetro com termopilha (CRESESB, 2003).

Os piranômetros que utilizam elementos bimetálicos, também chamados de actinógrafos, possibilitam a leitura da radiação incidente através do aquecimento do bimetálico e sua deformação é proporcional à quantidade de radiação recebida. Com uma pena ligada a esse elemento é registrado o valor da deformação do elemento, que é correspondente a radiação incidente (CRESESB, 2006).

Esse tipo de aparelho não depende de fonte de energia externa, porém precisa da atuação de um operador em intervalos regulares (diários) para funcionar. Além disso, a integração dos valores registrados é feita manualmente, o que aumenta o erro associado. Os modelos mais usados no país são os de Robitzch-Fuess, conforme figura 16.



Figura 16 – Piranômetro com elemento bimetálico (Robitzch-Fuess), também conhecido como actinógrafo. (CRESESB, 2003).

Da mesma forma que os instrumentos com elementos bimetálicos, os de sensores fotovoltaicos são menos precisos do que os fotocondutivos. E, apesar de serem de fácil manuseio, apresentam algumas desvantagens, como a resposta espectral seletiva, conforme figura 17 (Oliveira, 1997).



Figura 17 – Piranômetro fotovoltaico (Oliveira, 1997).

Os instrumentos com termopilha possuem duas camadas de vidro hemisféricas (domo) para proteger os sensores contra ventos e outros efeitos que possam alterar seu funcionamento. As camadas são uniformes para que se obtenha uma resposta regular em todos os comprimentos de onda. Além da radiação global em plano horizontal, pode-se medir também a radiação global em plano inclinado ou apenas a radiação difusa.

A medição da radiação global em plano inclinado fornece diretamente a radiação que incide em coletores solares, porém dependendo da inclinação do piranômetro a resposta do instrumento se altera, devendo ser corrigida com um fator correspondente, de acordo com cada tipo de aparelho (Duffie e Beckman, 1991).

A medição da radiação difusa é feita com o auxílio de um anel de sombreamento acoplado ao instrumento. O anel de sombreamento impede que uma pequena parte de radiação difusa chegue ao instrumento, fazendo-se necessário o uso de um fator de correção estimado para cada modelo de aparelho.

2.4 Radiação Solar Incidente

O dimensionamento de qualquer sistema que utilize a energia solar requer o conhecimento da orientação da incidência dos raios solares em uma superfície, seja plana ou inclinada. A determinação da orientação é feita através da relação entre diversos ângulos. A seguir apresenta-se o significado desses ângulos e suas relações (ABNT, 1988a; Arruda, 2004; Lima, 2003).

2.4.1 Coordenadas Geográficas

Latitude geográfica (ϕ) corresponde à posição angular em relação à linha do Equador, considerada de latitude zero. Cada paralelo traçado em relação ao plano do Equador corresponde a uma latitude constante: positiva, se traçada ao Norte e negativa, se posicionada ao sul do Equador, mostrado na figura 18. Os Trópicos de Câncer e de Capricórnio correspondem às latitudes de $23^{\circ} 27'$ ao Norte e ao Sul, respectivamente, compreendendo a região tropical. A cidade do Rio de Janeiro possui latitude geográfica de $22^{\circ} 55'$. (Normais Climatológicas (1961-1990), Departamento Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, DF, 1992). As instalações de SAS localizadas no hemisfério sul devem posicionar o plano dos coletores solares voltados para o norte geográfico ($\gamma = 0^{\circ}$), enquanto que as localizadas no hemisfério norte voltados para o sul geográfico ($\gamma = 180^{\circ}$).

Longitude geográfica (λ) é o ângulo medido ao longo do Equador da Terra, tendo origem no meridiano de Greenwich (referência) e extremidade no meridiano local, conforme figura 18. Na Conferência Internacional Meridiana foi definida sua variação de 0° a 180° (oeste de Greenwich) e de 0° a -180° (leste de Greenwich). A Longitude é muito importante para a determinação dos fusos horários e da hora solar. A cidade do Rio de Janeiro possui longitude geográfica de $43^{\circ} 10'$. (Normais Climatológicas (1961-1990), Departamento Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, DF, 1992).

Altitude (Z) equivale à distância vertical medida entre o ponto de interesse e o nível médio do mar. Por exemplo, as estações climatológicas da cidade do Rio de Janeiro estão de 5 a 31 metros acima do nível do mar. (Normais Climatológicas (1961-1990), Departamento Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, DF, 1992).

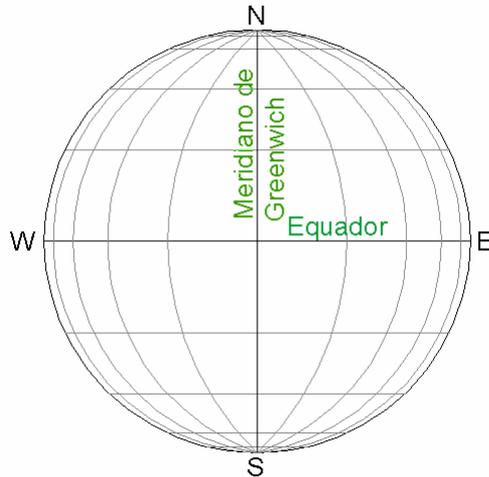
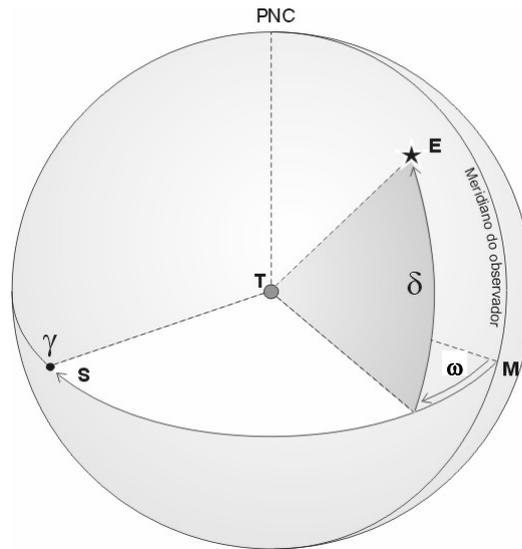


Figura 18 – Coordenadas geográficas

(<http://br.geocities.com/fbdiniz/disc/latitude/latitude.html>)

2.4.2 Declinação δ

É definida como o arco de meridiano contado desde o plano do equador celeste até o astro considerado, conforme figura 19. A declinação varia de 0 a 90 sendo considerado o sinal (+) no hemisfério norte da esfera celeste. O ângulo horário de um astro é variável em função da localização do observador na Terra, já a declinação de um astro é unívoca para toda a Terra.



Figuras 19 – Declinação (<http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/sistcrds.htm>)

$$\delta = 23,45^\circ \operatorname{sen}\left(2\pi \frac{284 + d}{365}\right) \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

d : dia do ano, sendo igual à unidade, em 1º de janeiro.

2.4.3 Ângulos Solares Derivados

O ângulo horário (ω) é definido como a posição angular do sol a leste ou a oeste do meridiano local, devido à rotação da terra em seu próprio eixo, e tem valor de 15° por hora, negativo pela manhã e positivo após o meio dia, conforme figura 19.

A inclinação do coletor (β) corresponde ao ângulo entre o plano da superfície e uma superfície horizontal variando de 0° a 180° , conforme figura 20.

O ângulo azimutal da superfície (γ) corresponde ao ângulo de orientação do coletor que é formado entre a direção norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal à superfície do coletor solar e medido a partir do sul ($\gamma=0$), conforme mostrado na figura 20. Seu valor varia na faixa de $(-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ)$.

O ângulo de incidência (θ) corresponde ao ângulo entre a radiação direta incidente no plano e a normal a superfície, conforme figura 20.

O ângulo zenital (θ_z) corresponde ao ângulo entre os raios solares e a vertical do local, conforme figura 20.

O ângulo de altitude solar (α_s) corresponde ao ângulo entre os raios solares e sua projeção em um plano horizontal.

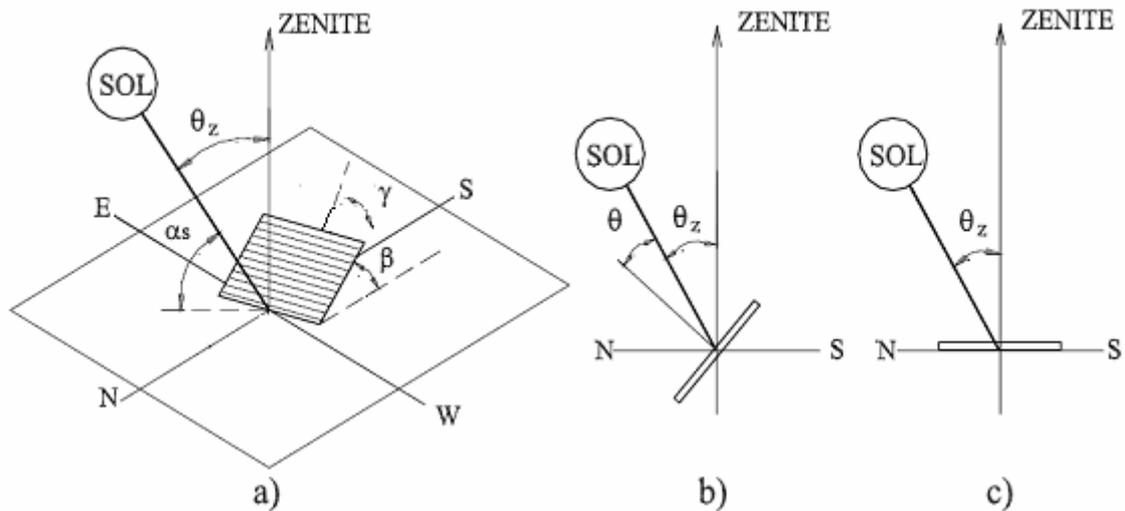


Figura 20 – Ângulos solares derivados (ARRUDA, 2004)

Utilizando as equações da astronomia, chega-se que os ângulos citados estão relacionados de acordo com a equação 13:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \beta - \text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma + \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \omega \end{aligned} \quad (\text{Eq. 13})$$

Para superfícies verticais $\beta = 90^\circ$ a equação 13 torna-se:

$$\cos \theta = -\text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \omega + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \quad (\text{Eq. 14})$$

Quando a superfície estiver na posição horizontal $\beta = 0^\circ$ e o ângulo incidente coincide com o ângulo zenital, ver figura 20-c, a equação 13 se reduz a:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad (\text{Eq. 15})$$

Fazendo na equação acima $\theta_z = 90^\circ$ obtém-se o ângulo do pôr-do-sol ω_s :

$$\cos \omega_s = -\text{tg} \phi \cdot \text{tg} \delta \quad (\text{Eq. 16})$$

2.4.4 Estimativa da Radiação solar

A radiação média mensal diária, \bar{H}_o , pode ser estimada pela equação 17 com o valor do dia “d” que melhor represente a média do mês como proposto por Klein (1977) apud Duffie; Beckman (1991). O dia médio do mês, conforme Klein (1977), torna mínimo o erro do valor que representa a radiação extraterrestre média mensal, principalmente nos meses de junho e dezembro. O dia médio para cada mês do ano é apresentado na tabela 2.

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_T}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{365} \right) \right) (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} \omega_s + \omega_s \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta) \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

G_{sc} - constante solar – 1367 W/m²;

ω_s – ângulo horário do pôr-do-sol local, em graus.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Dia	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

Tabela 2 – Dia médio para cada mês do ano (Klein, 1977)

O ângulo horário do por do sol dado pelo dia médio do mês ω'_s para o hemisfério sul é calculado adotando-se a menor das duas expressões abaixo, como segue na equação 18. Já para localidades do hemisfério norte, o ângulo horário do por do sol dado pelo dia médio do mês ω'_s deve ser calculado pela equação 19.

$$\omega'_s = \text{mínimo} \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \cdot \tan \delta) \end{array} \right] \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde:

ω'_s : ângulo horário do pôr-do-sol no dia médio do mês (°);

$$\omega'_s = \text{mínimo} \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta) \end{array} \right] \quad (\text{Eq. 19})$$

Os valores dos índices de claridade médio mensal \bar{K}_T de cada localidade são extraídos do banco de dados do Atlas Solarimétrico (Tiba et al., 2000) e, pela equação 20, calcula-se a radiação solar global incidente no plano horizontal em média mensal diária:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (\text{Eq. 20})$$

Collares-Pereira e Rabl [1979], citados por Duffie e Beckman [1991], propuseram para cálculo da componente difusa em média mensal diária, com base no índice de claridade, a equação 21.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00606 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos(115 \bar{K}_T - 103) \quad (\text{Eq. 21})$$

Para as superfícies inclinadas voltadas para o equador, no hemisfério sul, com $\gamma = 180^\circ$ a equação 22 de R_B é:

$$R_B = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega'_s \cdot \text{sen}(\phi + \beta) \cdot \text{sen}\delta + \text{sen}\omega'_s \cdot \cos\delta \cdot \cos(\phi + \beta)}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta} \quad (\text{Eq. 22})$$

No entanto para localidades do hemisfério norte, com $\gamma = 0^\circ$ R_B deve ser calculado pela equação 23 abaixo:

$$R_B = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega'_s \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \cdot \text{sen}\delta + \text{sen}\omega'_s \cdot \cos\delta \cdot \cos(\phi - \beta)}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$R_B = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \quad (\text{Eq. 24})$$

A energia total incidente no coletor solar é a soma de três componentes: radiação direta, radiação difusa e radiação refletida pelo entorno. A radiação difusa é formada por três componentes: radiação difusa isotrópica, que é a parcela recebida uniformemente por toda a abóbada celeste; radiação difusa circumsolar, que é a radiação solar dispersa e concentrada na parte do céu ao redor do sol; radiação difusa do brilho do horizonte é a radiação próxima ao horizonte, mais evidente em dias de céu claro. A radiação refletida pelo entorno é composta pela reflexão da radiação incidente em superfícies próximas ao coletor, como edificações, pavimentos e vegetação. Para simplificação de cálculos essa parcela é assumida como sendo a de uma superfície horizontal refletindo a radiação difusamente. A figura 21 apresenta as fontes de radiação incidentes em uma superfície.

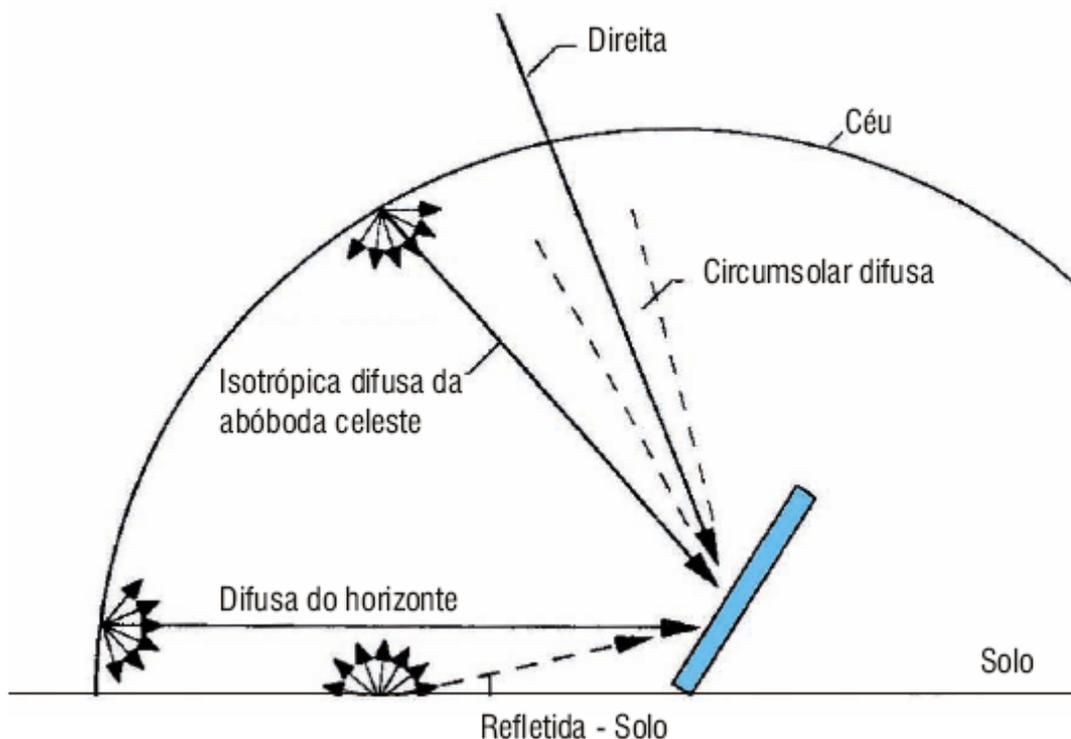


Figura 21 – Esquema de incidência de radiação em uma superfície (adaptada de Duffie e Beckman, 1991).

O cálculo das parcelas de radiação difusa e da radiação recebida pelo entorno é complexo e é simplificado em alguns dos modelos utilizados para o cálculo. Segundo Duffie e Beckman (1991), vários modelos foram desenvolvidos para calcular a radiação total incidente na superfície de um coletor.

A maior complexidade na obtenção de modelos mais precisos reside na dificuldade de calcular as parcelas de radiação difusa, em especial a radiação difusa circumsolar e a radiação difusa do brilho do horizonte. Entretanto, os mesmos autores afirmam que a utilização do modelo de céu isotrópico pode ser feita sem erros consideráveis com relação a modelos mais complexos. Nesse modelo o cálculo da radiação total incidente no coletor é feito com a soma das parcelas de radiação direta, difusa isotrópica e radiação refletida pelo entorno. As parcelas de radiação difusa circumsolar e do brilho do horizonte não são consideradas.

A equação 25 proposta por Duffie e Beckman [1991] para o céu isotrópico é:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) R_B + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde:

ρ_g - reflectância (albedo) da vizinhança nas proximidades do coletor solar, cujos valores são fornecidos na tabela 3.

Material	ρ_g
Terra	0,04
Tijolo vermelho	0,27
Concreto	0,22
Gramma	0,2
Barro / Argila	0,14
Superfície Construção Clara	0,6

Tabela 3 – Refletância de Materiais. (Siscos, 1998).

Quando não se têm disponível as medidas de insolação no local desejado, utilizam-se diretamente os dados de estações mais próximas, ou a interpolação destes. Rmenud et al (1998) descrevem um método para calcular os valores horários da radiação global em uma superfície inclinada para um local qualquer. Em um primeiro passo o método interpola a radiação média mensal horizontal das estações vizinhas para o local, depois os valores horários são gerados por modelos estocásticos e finalmente a radiação horizontal é transportada para uma superfície inclinada.

2.5 Atlas Solarimétrico Brasileiro

Tiba et al. (2001), criaram o Atlas Solarimétrico do Brasil. O trabalho foi uma iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB.

Segundo Martins (2003, on-line), “o mapeamento da distribuição do recurso solar permite reconhecer áreas em que o aproveitamento dessa energia é potencialmente significativo”. O Atlas Solarimétrico do Brasil contém tabelas e mapas, como ilustrado nas figuras 22 e 23, ”com informações sobre a radiação solar global diária (quantidade de energia solar aproveitável por metro quadrado, em um dia em determinado local), insolação diária (número de horas de brilho do Sol em um dia em determinado local) e médias mensais e anuais de 511 localidades do Brasil e 67 de países limítrofes” (Martins, 2003, on-line).

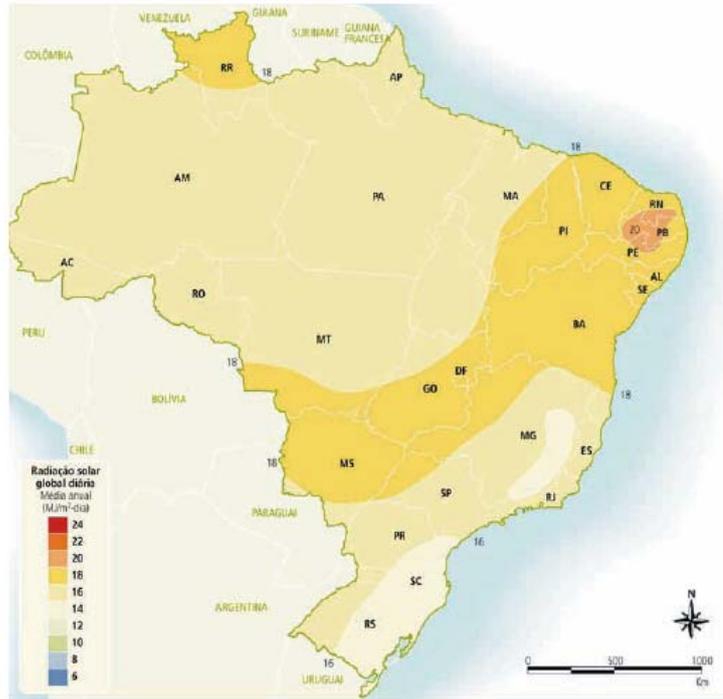


Figura 22 – Radiação solar global diária – média anual típica (MJ/m².dia)(Tiba, 2000)

Os dados apresentados no Atlas Solarimétrico do Brasil são uma estimativa da radiação solar incidente no País, resultante da interpolação e extrapolação de dados obtidos em estações solarimétricas distribuídas pelo Brasil e por estimativas da radiação solar feitas a partir da análise de imagens de satélites.

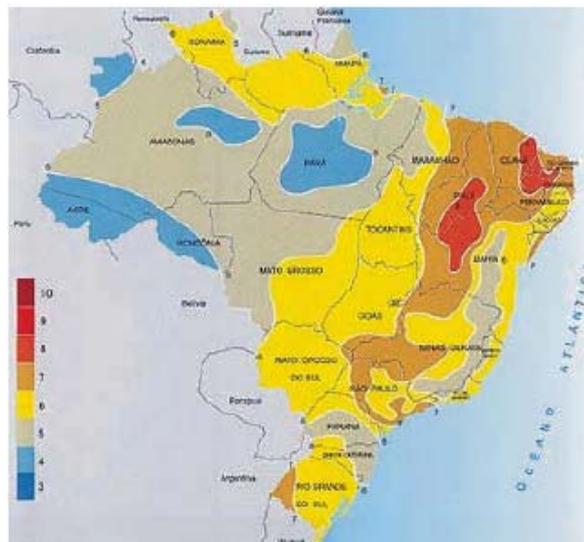


Figura 23 – Insolação média anual diária (em horas) no território brasileiro (Tiba, 2000).

Segundo Tiba (2000), a radiação solar no Brasil varia entre 8 a 22 MJ/m² dia.

A energia solar total incidente sobre a superfície terrestre depende da latitude, da hora do dia e dia do ano, devido à inclinação do eixo de rotação da Terra e à trajetória elíptica de translação da Terra ao redor do Sol, como pode ser visto na figura 24. Para a maximização do aproveitamento da energia solar, pode-se ajustar a posição do coletor solar com a latitude local e o período do ano em que a energia é mais requerida.

O aproveitamento racional desta energia para o projeto de instalações bem dimensionadas e economicamente viáveis só é possível a partir de informações solarimétricas consistentes da região na qual o sistema solar vai ser implantado.

Os valores dos índices de claridade médio mensal \bar{K}_T de cada localidade foram extraídos do banco de dados do Atlas Solarimétrico (Tiba et al., 2000). O Atlas disponibiliza diversas fontes de estudos que deram origem ao seu banco de dados. O usuário do software Helios-Chart poderá selecionar a fonte que lhe parecer mais conveniente ou, se preferir, poderá optar pela média dos valores dos índices de claridade \bar{K}_T por localidade.



Figura 24 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do sol (adaptado de Magnoli et al. , 1998 apud ANEEL, 2005).

Pereira, et al. (2006) desenvolveram o Atlas Brasileiro de Energia Solar pelo INPE - São José dos Campos. Na página <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/> podem ser obtidas séries históricas do modelo GL de estimativa de radiação solar, baseado na refletância medida pelo sensor Imager VIS do satélite GOES sobre a América do Sul.

3. Materiais e Métodos

3.1 Demanda de Água Quente

Para o dimensionamento do número de coletores e do volume do reservatório de água quente a serem utilizados num determinado projeto necessita-se levantar inicialmente o número de usuários e o tipo de atividade envolvendo água quente. Com isto, pode-se calcular a quantidade de água quente necessária por dia.

3.1.1 Cálculo do volume total dimensionado por ponto $V_{total / ponto}$

Nas tabelas 4 e 5 são apresentados alguns dos consumos médios, retirados da Norma NBR 7198 e do Manual de prédios eficientes em energia elétrica, do IBAM/PROCEL, que se complementam:

Alojamento Provisório de Obra	24	Litros por indivíduo
Casa Popular ou rural	36	
Residência	45	
Apartamento	60	
Quartel	45	
Escola (Internato)	45	
Hotel (sem incluir cozinha e lavanderia)	36	
Hospital	125	Litros por refeição
Restaurante e Similares	12	
Lavanderia	15	Litros por Kg de roupa seca

Tabela 4 - Consumo Diário de Água Quente por Dia (ABNT – NBR 7198, 1993)

Chuveiro	50	Litros por banho
Banheira para uma pessoa	100	
Banheira para duas pessoas	200	
Torneira de água quente	50	Litros por dia
Máquina de lavar pratos	150	
Máquina de lavar roupa	150	

Tabela 5 - Consumo médio de água aquecida em ambientes residenciais
(IBAM/PROCEL – Manual de Prédios eficientes em energia elétrica)
(IBAM/PROCEL, 2002)

A forma de dimensionamento mais adequada pode ser desenvolvida com base na vazão e capacidade dos equipamentos de uso final, além do tempo e frequência de sua utilização. A tabela 6 apresenta valores típicos para uso residencial, retirados da norma ABNT NBR 5626, 1998.

Aparelho Sanitário		Peça de utilização	Vazão (l/s)
Bacia Sanitária		Caixa de descarga	0,15
		Válvula de descarga	1,70
Banheira		Misturador (água fria)	0,30
Bebedouro		Registro de pressão	0,10
Bidê		Misturador (água fria)	0,10
Chuveiro ou ducha		Misturador (água fria)	0,20
Chuveiro elétrico		Registro de pressão	0,10
Lavadora de pretos ou de roupas		Registro de pressão	0,30
Lavatório		Torneira ou misturador (água fria)	0,15
Mictório Cerâmico	Com sifão integrado	Válvula de descarga ou registro de pressão	0,50
	Sem sifão integrado	Caixa de descarga ou registro de pressão	0,15
Mictório tipo calha		Caixa de descarga ou registro de pressão	0,15 por metro de calha
Pia		Torneira ou misturador (água fria)	0,25
Tanque		Torneira	0,25
Torneira de jardim ou de lavar em geral		Torneira	0,20

Tabela 6 – Vazões unitárias dos pontos de utilização (NBR 5626, 1998)

Desta forma, pode-se calcular o volume total dimensionado por ponto, conforme a equação 26.

$$V_{total / ponto} = (u \cdot N_{us} \cdot Q_{ut} \cdot t_{ut} \cdot N_{ut})_{ponto} \quad (\text{Eq. 26})$$

Onde:

$V_{total/ponto}$: volume total dimensionado por ponto (l);

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

t_{ut} : tempo de uso do ponto (s);

N_{ut} : número de utilizações diárias;

N_{us} : número de usuários;

u : taxa de ocupação (%).

Há situações em que a disponibilidade de água quente sempre foi imprescindível, tais como em hospitais, hotéis, motéis, lavanderias, restaurantes, etc. Paralelamente, houve também uma evolução nas exigências de conforto nas próprias residências. Desta maneira, a instalação de água quente é, hoje, fato corriqueiro na maioria das instalações de padrão médio a alto e praticamente indispensável em qualquer prédio. As exigências técnicas mínimas a serem atendidas pela instalação de água quente estão na norma NBR 7198 – Projeto e execução de instalações prediais de água quente (ABNT, 1993).

A seguir é apresentado o resumo do levantamento de dados para o cálculo da demanda de água quente utilizado no software *Helios-Chart*:

- Determinação do número de usuários da edificação e de sua taxa de ocupação¹;
- Identificação dos pontos de consumo de água quente;
- De acordo com a vazão em cada ponto e o número de pontos de consumo, considerando também a frequência e o tempo de utilização de cada ponto, é calculado o volume mensal ($V_{mês}$) de água quente em litros.

¹ A taxa de ocupação é um parâmetro relevante no caso de dimensionamento de sistemas SAS em locais onde há a ocupação sazonal como é o caso de hotéis e pousadas.

3.1.2 Cálculo da demanda mensal de energia $L_{mês}$

A energia necessária para aquecer este volume de água ao final do mês ($L_{mês}$), qualquer que seja a forma de aquecimento escolhida é dada pela equação 27:

$$L_{mês} = \rho \frac{V_{mês}}{1000} \frac{c_p (T_{banho} - T_{AF})}{3600} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

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

ρ - massa específica da água, considerada igual a 1000 [kg/m^3]

$V_{mês}$ - volume de água quente requerido por mês [l];

c_p - Calor específico a pressão constante da água , 4,18 [$kJ/kg^{\circ}C$];

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

T_{AF} - Temperatura da água fria que abastece os reservatórios [$^{\circ}C$].

O volume de água quente requerido mensalmente ($V_{mês}$) será igual ao produto do volume diário de água quente (V_{dia}) pelo número de dias do mês correspondente.

3.2 Reservatórios Térmicos

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), operacionalizado pelo Grupo de Estudo em Energia (GREEN/PUC-MG), permite a criação de critérios personalizados para comparar os diferentes modelos de coletores, reservatórios térmicos e bombas hidráulicas, equipamentos cuja especificação representam o objetivo do Software Helios-Chart, disponíveis no mercado nacional. No PBE, o elenco de ensaios experimentais foi avaliado e definido pelo Grupo de Trabalho em Energia Solar, GT-SOL, coordenado pelo INMETRO e PROCEL.

Os reservatórios térmicos pressurizados a baixa pressão disponíveis no mercado nacional possuem os seguintes valores de acumulação: 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800 e 1000 litros.

A prática experimental de SODEAN S.A., (2004) recomenda que o dimensionamento do reservatório térmico deve obedecer à equação 28 abaixo:

$$0,8 \leq \left(\frac{V_{RES}}{V_{dia}} \right) \leq 1,2 \quad (\text{Eq. 28})$$

Desta forma, após o cálculo de (V_{dia}) é buscado no mercado nacional o reservatório, cujo fabricante faz parte do PBE, que se aproxima do consumo mensal, desde que a relação da equação 28 seja atendida.

Como o volume máximo dos reservatórios etiquetados existentes no mercado nacional é de 1000 litros, faz-se necessário calcular o número de reservatórios quando (V_{dia}) for maior que 1250 litros, atendendo às restrições da equação 28. Desta forma, o número inteiro do resultado da equação 29 representa o número de reservatórios da instalação do SAS.

$$N_{RES} = \frac{V_{dia}}{V_{RES}} \quad (\text{Eq. 29})$$

O aquecimento de água mediante a utilização da energia solar configura-se como um sistema central de acumulação térmica. A água aquecida gradativamente durante o dia é armazenada para utilização nos momentos de consumo. O volume armazenado deve ser determinado em função do perfil de demanda, do volume de consumo diário e da relação entre temperatura de utilização e a temperatura de armazenamento da água.

O reservatório de água quente tem o funcionamento muito dinâmico, pois recebe, armazena e cede calor a taxas variáveis ao longo do tempo. O calor recebido provém do coletor solar e da fonte auxiliar de energia. Já o calor cedido inclui as perdas para o ambiente, o consumo de água quente e possível circulação da água nos coletores, quando este último está com temperatura abaixo da temperatura do reservatório.

A figura 25 ilustra este fluxo representado pelas equações 28 a 35.

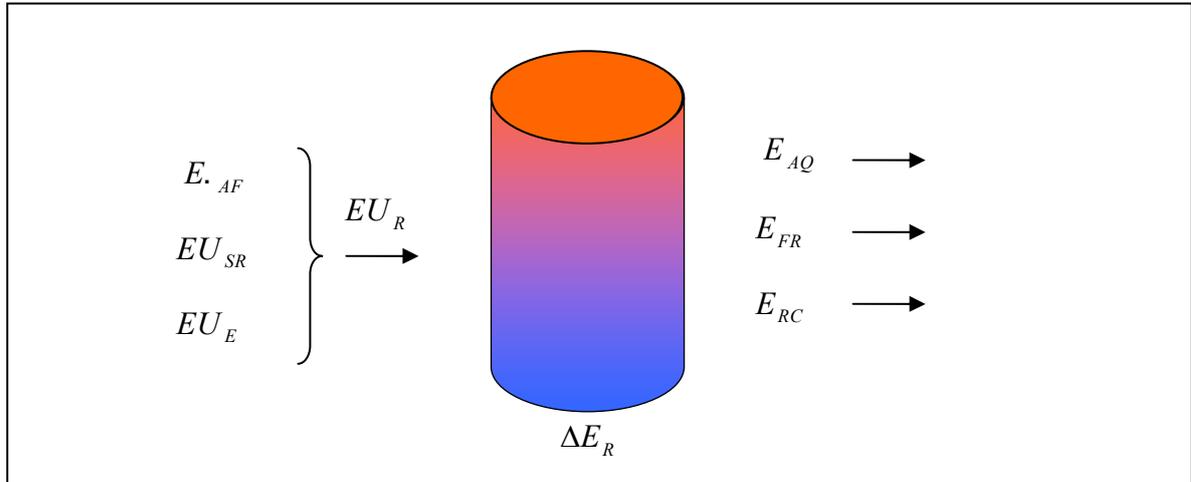


Figura 25 – Balanço de Energia no Reservatório

A energia útil total que o reservatório recebe (EU_R), durante um intervalo de tempo Δt é:

$$EU_R = E_{AF} + EU_{SR} + EU_E \quad (\text{Eq. 30})$$

Sendo:

$$E_{AF} = m_{AF} \cdot c_p \cdot T_{AF} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$EU_{SR} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (TR_e - TR_s) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 32})$$

$$EU_E = \eta_{AQ} \cdot P_{AQ} \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 33})$$

Onde:

E_{AF} : entalpia da água fria que reabastece o reservatório (kJ);

m_{AF} : massa de água fria que entra no reservatório no intervalo Δt (kg);

c_p = calor específico da água (kJ/kg.K)

T_{AF} = como estava no texto pré-defesa

EU_{SR} : energia solar captada no coletor que chega até o reservatório (kJ);

\dot{m} : vazão mássica que passa pelo coletor (kg/s);

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

TR_s : temperatura da água na saída do reservatório ($^{\circ}\text{C}$), para o coletor;

EU_E : energia útil da fonte auxiliar de calor (kJ);

η_{AQ} : rendimento do aquecedor a gás natural (fonte auxiliar);

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

A variação da energia total no reservatório (ΔE_R) é igual a soma de todas as energias envolvidas, considerando negativas aquelas que retiram calor, conforme a equação 34.

$$\Delta E_R = m_R \cdot c_p \cdot \Delta \bar{T} R = EU_R - (E_{AQ} + E_{FR} + E_{RC}) \quad (\text{Eq. 34})$$

Onde:

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

ΔTR : variação da temperatura média do reservatório no intervalo de tempo Δt ($^{\circ}\text{C}$).

Tem-se:

$$E_{AQ} = m_{AQ} \cdot c_p \cdot T_{AQ} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$E_{FR} = U_R \cdot \left(\bar{T} R - T_{ar} \right) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 36})$$

$$E_{RC} = \dot{m}_c \cdot c_p \cdot (TR_e - TR_s) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 37})$$

Onde:

E_{AQ} : entalpia da água quente que sai para o consumo (kJ);

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

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

E_{FR} : calor perdido para o ambiente (kJ);

U_R : coeficiente global de transferência de calor do reservatório ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$);

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

E_{RC} : energia perdida na circulação de água quando o coletor está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório (kJ);

m_c : vazão mássica de água que circula pelo coletor quando este está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório (kg/s). Colocar o ponto em cima de m_c .

A distribuição da temperatura no interior do reservatório de água quente pode ser estudada de duas formas. A primeira, como considerado nas equações 28 a 35, é mais conservadora e pressupõe que ocorra uma mistura total da água dentro do reservatório, enquanto a segunda forma considera a estratificação térmica devido às diferenças de massa específica da água. O software *Helios-Chart* na versão 1.0 considera a mistura total, ou seja, a temperatura do líquido no interior do reservatório é uniforme, similarmente ao modelo adotado pelo *F-Chart*.

3.3 Arranjo de Coletores Solares

Os coletores podem ser interligados em série ou em paralelo conforme mostra a figura 26, ou uma combinação dos dois casos. No caso de dois coletores idênticos combinados em paralelo, figura 26a, a vazão é a mesma nos dois. Considerando a uniformidade das vazões, ambos terão a mesma eficiência térmica, pois as temperaturas de entrada e saída serão aproximadamente iguais nos dois.

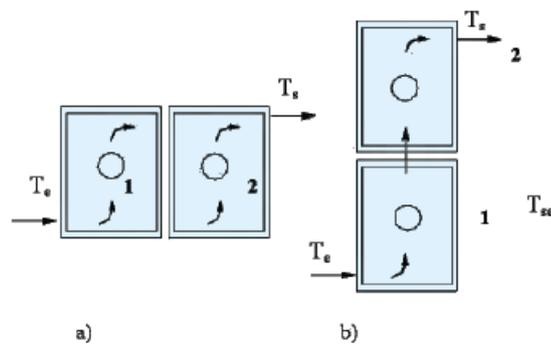


Figura 26 – Associação de coletores solares: a) em paralelo; b) em série. (Arruda, 2004)

No caso do arranjo em série, figura 26b, a temperatura de entrada no segundo coletor é consideravelmente maior do que a temperatura de entrada no primeiro, alterando assim a sua eficiência térmica. Pode ser observado na equação 1 que quanto maiores as temperaturas de entrada no coletor (T_e), maiores as perdas e menor o rendimento. Por tal razão a disposição em paralelo é mais indicada para pequenas instalações onde as vazões nos coletores são praticamente iguais conduzindo a um balanço hidráulico equilibrado.

3.3.1 Arranjos de coletores solares em série

Oonk et al. (1979) calculam os parâmetros de eficiência para N coletores conectados em série. Com esta metodologia foi possível calcular os novos valores de $[F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)]$ e $[F_R \cdot U_L]$ para o coletor equivalente a N coletores idênticos conectados em série pelas equações 36 e 37.

$$F_R(\tau\alpha) = F_{R1}(\tau\alpha)_1 \left[\frac{1 - (1 - K)^N}{NK} \right] \quad (\text{Eq. 38})$$

$$F_R U_L = F_{R1} U_{L1} \left[\frac{1 - (1 - K)^N}{NK} \right] \quad (\text{Eq. 39})$$

Para,

$$K = \frac{A_{cu} F_{R1} U_{L1}}{m c_p} \quad (\text{Eq. 40})$$

Onde:

N : número de coletores solares conectados em série;

$F_{R1} U_{L1}$: produto do fator de remoção de calor pelo coeficiente global de perdas térmicas de um coletor solar $[\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$;

$F_{R1}(\tau\alpha)_1$: produto do fator de remoção, transmitância do vidro e absorbância da tinta de um coletor.

O rendimento de um coletor solar depende do seu tipo e modelo bem como da sua taxa de perda de calor durante a operação. Portanto, mediante ao que já foi dito no item anterior, para um grande número de coletores solares conectados em série, haveria um rendimento decrescente dos coletores, do primeiro para o último. Por outro lado uma grande quantidade de coletores em paralelo poderia resultar em um balanço hidráulico desequilibrado da instalação, onde alguns coletores estariam operando com vazões acima ou abaixo de 25% da vazão nominal, fato que conduziriam à perda de rendimento global da instalação. Por isto, Duffie e Beckman (1991) baseados em trabalhos experimentais, recomendam que os coletores sejam interligados numa associação mista (série e paralelo).

O software *Helios-Chart* disponibiliza ao projetista a possibilidade de conectar até quatro coletores em série. Este limite foi arbitrado com base na experiência, considerando as condições climáticas brasileiras.

3.4 Método F-Chart

Com o objetivo de simplificar a metodologia de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, Beckman, Klein e Duffie (1976) desenvolveram uma ferramenta simples conhecida como *f-chart*, capaz de calcular a contribuição da energia solar na quantidade total de energia necessária para o aquecimento de água, a partir de dados meteorológicos médios mensais para uma determinada região. Esta contribuição é conhecida como fração solar.

Hottel e Woertz (1942) foram os primeiros a realizar análises de coeficientes, que determinam a eficiência de um coletor solar de placa plana.

Whillier (1953) foi o primeiro a desenvolver o método de utilizabilidade (conceito – ϕ) que pode ser usado para avaliar muitos tipos de sistemas de aproveitamento térmico da energia solar incluindo sistemas ativos, passivos e fotovoltaicos.

Hottel & Whillier (1955) criaram um modelo matemático para o coletor solar. O modelo considera o balanço de energia do coletor solar em regime permanente de acordo com o princípio da potência térmica de uma determinada instalação que pode ser utilizável. Hottel & Whillier desenvolveram a utilizabilidade (conceito – ϕ) em média mensal horária dependente da localidade.

Liu e Jordan (1963) generalizaram a utilizabilidade (conceito – ϕ) de Whillier para a média horária independente da localidade. Liu e Jordan assumem que a intensidade da irradiação difusa é uniforme em todo o hemisfério celeste. Sendo, portanto, válida para condições de céu nublado, condição na qual a irradiação difusa é suposta isotrópica. Liu e Jordan utilizaram como base de dados os índices de radiação solar diária total no plano horizontal, coletados regularmente entre os anos 1950 e 1958, em 98 localidades situadas nos Estados Unidos e no Canadá. A hipótese básica proposta é que a função de distribuição acumulada de K_t , $F(K_t)$ depende apenas do índice diário médio mensal $\left(\bar{K}_t\right)$ e não da localidade ou da época do ano. (Liu e Jordan; Duffie e Beckman).

Klein et al. (1975) na Universidade de Wisconsin, Laboratório de Energia Solar, desenvolveram o TRNSYS, um programa de computação solar modular para a simulação transiente. O TRNSYS foi originalmente concebido com o propósito de ser de domínio público e foi continuamente atualizado desde sua criação. O programa foi escrito em padrão de ANSI Fortran. A mais recente versão usa Fortran 77.

Klein (1976) desenvolveu o método F-Chart em sua Tese de Ph.D. intitulada "*A Design Procedure for Solar Heating Systems*". O método *F-Chart* consiste das correlações de resultados de um grande número de simulações mediante a utilização do TRNSYS.

Klein (1976) ampliou o trabalho de Liu e Jordan (1963) com o objetivo de estudar o comportamento de coletores solares voltados para outras direções, isto é, com ângulo azimutal diferente de zero. Para tanto, Klein desenvolveu expressões matemáticas que permitem calcular a radiação solar global diária média mensal em coletores solares com qualquer inclinação em relação à horizontal e em qualquer direção. Neste seu trabalho, foi usado o conceito de dia médio do mês, o mesmo torna mínimo o erro do valor que representa a radiação extraterrestre diária média mensal, principalmente nos meses de junho e dezembro.

Collares-Pereira & Rabl (1979), partindo de trabalhos anteriores desenvolveram novas equações para estimar a radiação solar difusa, com base na radiação solar global. As equações foram elaboradas a partir de dados medidos em 5 estações nos Estados Unidos. Para tornar o resultado mais significativo em relação a trabalhos de outros pesquisadores, Collares-Pereira & Rabl usaram instrumentos de medição mais precisos. Consideraram mais de um dia por mês para encontrar a radiação extraterrestre média mensal e também as variações sazonais na relação entre a radiação direta e a radiação difusa.

O método *F-Chart* consiste de análise útil para projetos de sistemas ativo e passivo de aquecimento solar, especialmente por selecionar a área mediante o modelo do coletor solar. A primeira publicação relativa ao método *F-Chart* foi feita um ano após a conclusão da tese de Ph.D. de Klein no livro por Beckman, Klein, e Duffie (1977), intitulado “Solar Heating Design by the *F-Chart* Method”.

O método *F-Chart* exige o conhecimento de dois parâmetros que descrevem a curva de desempenho térmico do coletor ($F_R U_L$, $W/m^2 \cdot ^\circ C$) e ($F_R(\tau\alpha)$, %). Fazem parte destes parâmetros o F_R (fator de remoção de calor do coletor), U_L (coeficiente de perdas de calor do coletor) e $(\tau \cdot \alpha)$ (produto da transmitância e absorvância). $F_R U_L$ e $(\tau \cdot \alpha)$, haviam sido introduzidos inicialmente por Whillier (1953).

A figura 27 apresenta um resumo da história do desenvolvimento do método F-Chart.

**Resumo da História do Método
F-Chart**

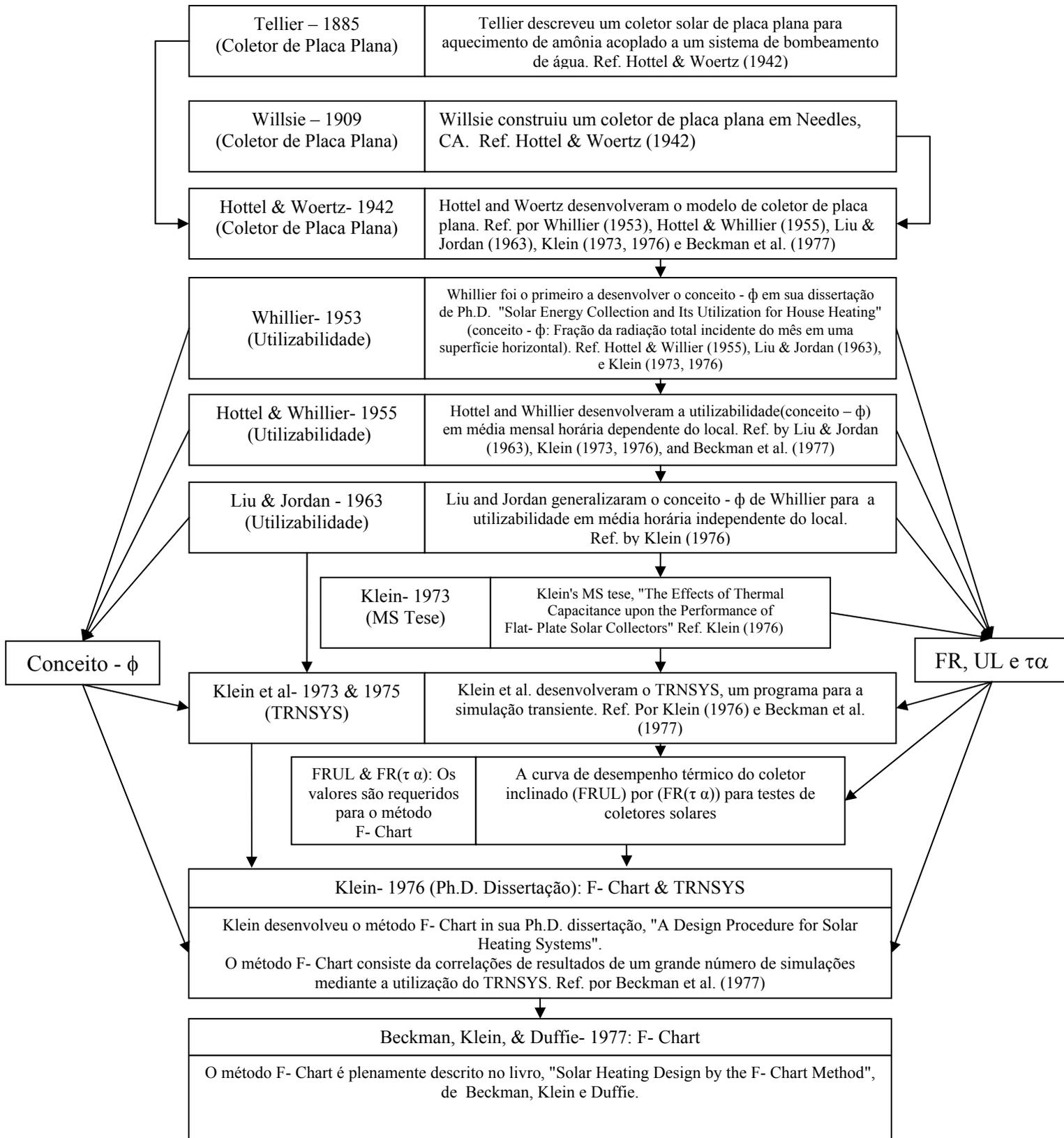


Figura 27 – Resumo da história do método F-Chart

Pelo método *F-Chart*, a fração solar para análises mensais pode ser expressa através da equação 41:

$$f = \frac{Q_{total} - Q_{aux}}{Q_{total}} = \frac{Q_{solar}}{Q_{total}} \quad (\text{Eq. 41})$$

Onde:

f : fração solar mensal;

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

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

Para calcular a fração solar de um sistema, o método *F-Chart* utiliza dois parâmetros adimensionais, mostrados nas equações 40 e 41 onde X se relaciona com as perdas térmicas do coletor para o meio e Y se relaciona com o calor absorvido pelo coletor. O método foi concebido para o dimensionamento de sistemas que utilizam a água também para o aquecimento de ambientes. Quando o objetivo for apenas o aquecimento de água para consumo, é necessário o uso de fatores de correção também desenvolvidos pelos autores.

$$X = \frac{A_c F_R U_L (T_{REF} - T_{amb}) \Delta t}{L_{mês}} \quad (\text{Eq. 42})$$

$$Y = \frac{A_c F_R (\tau_c \alpha_p)_\theta \bar{H}_T n}{L_{mês}} \quad (\text{Eq. 43})$$

Onde:

A_c : área coletora solar total (m^2);

$F_R U_L$: 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];

T_{REF} : temperatura de referência, considerada constante, e igual a $100^\circ C$;

$F_R(\tau_c \alpha_p)_\theta$: produto do fator de remoção, transmitância do vidro e absorvância da tinta dos coletores, para o ângulo médio de incidência da radiação direta;

n : número de dias do mês.

A metodologia de desenvolvimento do cálculo da fração solar do software *Helios-Chart* usa as equações do *F-Chart*. Por esta razão, as mesmas restrições adotadas no *F-Chart* para atender às recomendações de Duffie e Beckmann foram também adotadas no *Helios-Chart*. Tais restrições foram consideradas por Beckman, Klein e Duffie (1991) no desenvolvimento do procedimento de cálculo da fração solar, conforme tabela 7.

0,6	<	$(\tau\alpha)_n$	<	0,9
5	<	$F_R A_C$	<	$120 m^2$
2,1	<	U_L	<	$8,3 W/m^2C$
30	<	β	<	$90^\circ C$
83	<	$(UA)_n$	<	$667 W/C$

Tabela 7 – Faixa de parâmetros usados no *F-Chart* (Duffie e Beckman, 1991)

O Modelo da *F-Chart* foi desenvolvido considerando-se uma relação de 75 litros de água quente armazenada por metro quadrado de área coletora. Desta forma o software *Helios-Chart* dimensiona a área coletora mediante a equação 44.

$$\frac{V_{mês}}{A_c} = 75 \frac{l}{m^2} \quad (\text{Eq. 44})$$

A prática experimental de SODEAN S.A. (2004) recomenda que o dimensionamento da área coletora deve obedecer à equação 45:

$$60 \leq \frac{V_{\text{mês}}}{A_c} \leq 100 \quad (\text{Eq. 45})$$

Para sistemas com capacidade de armazenamento na faixa de 37,5 a 300 l/m² pode ser determinada multiplicando o adimensional X pelo fator de correção de armazenamento X_{c1}/X como mostra a equação 46 (Duffie e Beckman, 1991).

$$\frac{X_{c1}}{X} = \left[\frac{\text{relação volumétrica / área}}{75 \text{ l / m}^2} \right]^{-0,25} \quad (\text{Eq. 46})$$

para

$$0,5 \leq \left[\frac{\text{relação volumétrica / área}}{75 \text{ l / m}^2} \right] \leq 4,0 \quad (\text{Eq. 47})$$

Uma segunda correção também se torna necessária pela diversidade da situação brasileira frente à realidade americana, no que se refere à necessidade de aquecimento de água e do ambiente na maioria das residências. Quando o uso da energia solar restringe-se somente ao aquecimento de água, Duffie e Beckman [1991] propuseram uma segunda correção ao adimensional X pelo fator de correção de armazenamento X_{c2}/X_{c1} como mostra a equação 48.

$$\frac{X_{c2}}{X_{c1}} = \left(\frac{11,6 + 3,86T_{AF} + 1,18T_{AQ} - 2,32T_{amb}}{100 - T_{amb}} \right) \quad (\text{Eq. 48})$$

Onde:

T_{amb} : temperatura ambiente média para o mês (°C);

Para a obtenção da fração solar do sistema, utiliza-se a equação 49.

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (\text{Eq. 49})$$

3.5 Perdas térmicas nos reservatórios e tubulações

A perda específica de energia mensal dos reservatórios será retirada diretamente dos dados fornecidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, na versão 1.0 do software *Helios-Chart*.

As perdas de calor nas tubulações, da mesma forma que nos reservatórios, dependem das temperaturas da água e do ar, dos regimes de escoamento da água e do ar, da resistência térmica dos materiais empregados, da velocidade do vento e da água, e da posição da tubulação (horizontal, vertical ou inclinada).

Se a temperatura de um sólido é mais alta do que a do fluido que o envolve, o calor flui primeiramente por condução na direção do fluido aumentando a temperatura deste último e gerando um movimento que ascende esta camada de fluido aquecida, que é então substituída por outra com menor temperatura, e isto se repete continuamente até próximo do equilíbrio térmico. Neste caso, o movimento do fluido ocorre devido à variação da sua massa específica e o fenômeno é denominado convecção natural. Quando o movimento do fluido é provocado por um agente externo ao escoamento, o fenômeno é denominado convecção forçada.

O fluxo de calor por convecção é expresso pela equação 50:

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{ar}) \quad (\text{Eq. 50})$$

Onde:

T_s : Temperatura da superfície do sólido (°C);

h_c : Coeficiente convectivo de transferência de calor (W/°C.m²);

A : Área perpendicular ao fluxo de calor (m²).

O coeficiente de transferência de calor não é uniforme sobre a superfície e o parâmetro acima se refere a seu valor médio. Sua determinação é de máxima importância para a avaliação das perdas térmicas e foi motivo de exaustivas pesquisas, resultando em inúmeras fórmulas empíricas e algumas soluções analíticas.

O problema não é um problema simples, pois além de dependerem de diversas propriedades do fluido, como massa específica, viscosidade, condutividade térmica e calor específico, os coeficientes dependem da geometria da superfície e das condições do escoamento. Essa multiplicidade das variáveis independentes é atribuída à dependência da transferência por convecção nas camadas limites que se desenvolvem na superfície (Incropera e DeWitt, 2003, p.231).

Na tabela 8 estão resumidos os adimensionais empregadas nas equações a seguir:

Número de:	Equação	Variáveis / Dimensões (Massa (M), comprimento (L), tempo (t) e Temperatura (T)).
Grashof	$Gr = \frac{g \cdot \rho_{ar}^2 \cdot \beta_k \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\mu^2}$	β_k : coeficiente de expansão volumétrica (1/s); g : aceleração da gravidade (m/s^2); μ : viscosidade dinâmica ($N \cdot s/m^2$); ν : viscosidade cinemática (m^2/s); ρ_{ar} : massa específica do ar (kg/m^3); k : condutibilidade térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$); L : dimensão característica (m); V_{ar} : velocidade do ar (m/s); cp : calor específico ($J/kg \cdot ^\circ C$); α_d : difusividade térmica (m^2/s).
Nusselt	$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k}$	
Prandtl	$Pr = \frac{cp \cdot \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha_d}$	
Reynolds	$Re = \frac{V_{ar} \cdot L \cdot \rho_{ar}}{\mu}$	
Peclet	$Ped = Re \cdot Pr$	

Tabela 8 – Adimensionais e variáveis empregadas no estudo de transferência de calor (ARRUDA, 2004).

Na convecção forçada, se forma um filme junto às paredes sólidas dependente do número de Reynolds. A determinação de h deve ser feita de acordo com o regime de escoamento.

A superfície externa da tubulação, quando exposta ao tempo sofre a influência dos ventos e seu estudo pode ser feito por analogia ao escoamento do ar em corpos bojudos. Churchill e Benstein (1977) encontraram a equação 51 para número de Peclet maior que 0,2:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr)^{2/3}\right]^{C1}} \left[1 + (D)^A\right]^B \quad (\text{Eq. 51})$$

Os coeficientes A, B, C1 e D da equação 51 são dados na tabela 9:

Número de Reynolds	A	B	C1	D
$10^3 < Re < 10^4$	2/3	1/4	0	0,4/Pr
$7.10^4 < Re < 4.10^5$	1/2	1	1/4	Re/282.000
$4.10^5 < Re < 10^7$	5/8	4/5	1/4	Re/282.000

Tabela 9 – Coeficientes da Equação 51 (ARRUDA, 2004).

Em algumas situações a transferência de calor não pode ser caracterizada apenas como natural ou forçada. O modo predominante de transferência de calor depende da velocidade do fluido. Se a velocidade é muito elevada, irá encobrir a maior parte dos efeitos das correntes de convecção natural. Por outro lado, se a velocidade for muito baixa as correntes de convecção natural é que influenciarão consideravelmente o fenômeno. Holman (1998) sugere o seguinte critério para análise:

$$\frac{Gr}{Re^2} \geq 1 \quad (\text{Eq. 52})$$

Quando se verifica a relação acima, o calor se transfere principalmente por convecção natural.

Através de Holman (1998) e ainda de outros autores, obtemos para convecção natural por cilindros longos horizontais a equação 53 de Churchill e Chu, para $10^{-5} < Gr \cdot Pr < 10^{12}$:

$$Nu = \sqrt{0,60 + 0,387 \left[\frac{Gr \cdot Pr}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{16/9}} \right]^{1/6}} \quad (\text{Eq. 53})$$

A condução de calor através das paredes pode chegar a ser o principal fator de perda para o caso em estudo. Ocorre conforme a capacidade dos materiais em transportar esta energia, isto é, conforme a sua condutividade térmica (k). Este fenômeno se desenvolve de forma análoga à passagem da corrente elétrica. O fluxo térmico (q) é calculado pela equação de Fourier:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 54})$$

Onde:

A : área da seção transversal da tubulação (m^2);

$\partial T / \partial x$: Variação da temperatura ao longo da distância ∂x .

Em superfícies planas o fluxo total de calor, considerando q , k , A e a espessura e constantes, é dado por:

$$\int_0^q q = -\frac{k.A}{e} \int_{T_1}^{T_2} \partial T$$

ou

(Eq. 55)

$$q = \frac{k.A}{e} (T_2 - T_1) \text{ para } (T_2 > T_1)$$

A equação 54 pode ser escrita em função da resistência térmica (R_T) do meio:

$$R_T = \frac{e}{k.A}$$

(Eq. 56)

Logo:

$$q = \frac{\Delta T}{R_T}$$

(Eq. 57)

Nas superfícies circulares, como a seção transversal de tubos e cilindros, conforme a figura 28, a área A é igual a $2.\pi.r.L$, sendo r o raio e L o comprimento. Substituindo a equação 56, com este valor de área, na equação 57 e integrando dentro dos limites r_1 e r_2 obtém-se:

$$q = \frac{2.\pi.L.k.(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \text{ para } (T_1 > T_2)$$

(Eq. 58)

ou

$$R_T = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2.\pi.L.k}$$

(Eq. 59)

Em superfícies compostas por vários materiais, a resistência térmica se comporta como um arranjo de resistências elétricas ligadas em série, sendo a resistência total igual à soma de todas elas, conforme a figura 29.

$$R_{Total} = R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + \dots \quad (\text{Eq. 60})$$

Na Tabela 10 são apresentados os valores da condutividade térmica dos materiais comumente empregados nos sistemas de aquecimento de água.

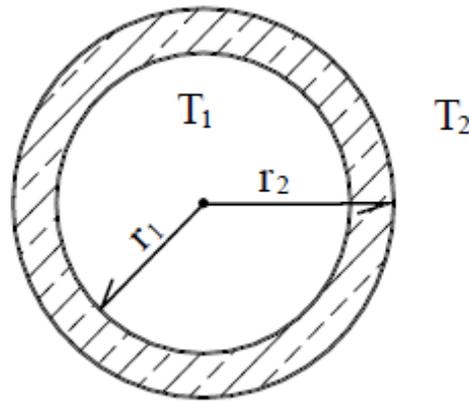


Figura 28 – Seção transversal de uma tubulação. (Arruda, 2004)

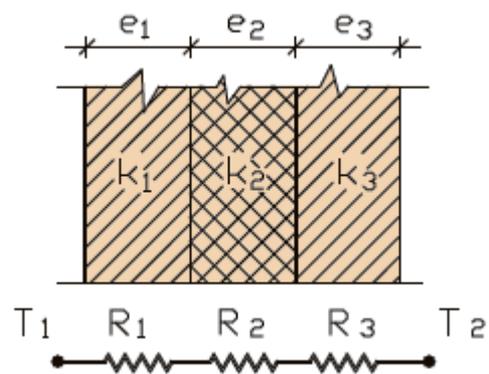


Figura 29 – Analogia entre a resistência térmica e a elétrica (Arruda, 2004).

Material	$k \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$
1. Tubulações	
1.1 Aço carbono zincado a quente (Aço galvanizado)	44,9
1.2 Cobre	339
1.3 Polocloreto de vinila clorado (CPVC)	0,138
2. Isolantes	
2.1 Lã de vidro	0,038
2.2 Polietileno expandido	0,035
2.3 Poliuretano de baixa densidade	0,020

Tabela 10 – Valores da condutividade térmica de alguns materiais. (ARRUDA, 2004).

Tanto na convecção forçada como na natural, o problema pode ser tratado de forma similar à perda por condução, pois a resistência do filme convectivo é igual ao inverso do coeficiente de transmissão vezes a área:

$$R_T = \frac{1}{A \cdot h_c} \quad (\text{Eq. 61})$$

A temperatura da água ao longo do comprimento de uma tubulação que sai de uma fonte de calor, segundo Schultz; Goldschmit (1983) é calculada a partir de um balanço energético em um volume de controle diferencial resultando na equação 62.

$$(k_t \cdot A_t + k_w \cdot A_w) \frac{d^2 T}{dx^2} - m \cdot c \cdot \frac{dT}{dx} + (T - T_{ar}) \cdot (h_c) \cdot \pi \cdot d = 0 \quad (\text{Eq. 62})$$

Onde:

t : índice correspondente à propriedades do tubo;

w : índice correspondente à propriedades da água;

A equação 62 é aplicada para a condição de equilíbrio térmico e fluxo constante no intervalo de tempo considerado. Devido ao fato da queda de temperatura nestas condições ser relativamente pequena, o termo de segunda ordem é desprezado. Desta forma, admitindo a condição de contorno $T_{(x=0)}$ igual à temperatura da tubulação próxima à fonte de calor (reservatório ou coletor), a solução desta equação diferencial resulta na equação 63:

$$T_{(x)} = Tar + (T_{(x0)} - Tar) e^{\frac{-4x}{\rho.c.V_{ag} \cdot \pi \cdot di^2 \cdot L \cdot R_{Tot}}} \quad (\text{Eq. 63})$$

Onde:

x : Distância da seção até a fonte de calor (m);

x_0 : Ponto onde a temperatura é conhecida (m);

V_{ag} : Velocidade da água (m/s);

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

L : Comprimento total da tubulação (m);

di : Diâmetro interno da tubulação (m).

A equação 63 foi desenvolvida e verificada experimentalmente pelos autores citados acima para a condição de estado permanente, em tubulações sem isolamento térmico, sujeitas à convecção natural com o ambiente e com saída livre para a atmosfera. As tubulações que unem os coletores ao reservatório não estão sujeitas às mesmas condições e ainda sofrem a influência nas extremidades destes equipamentos que têm maior massa térmica.

O comportamento térmico do escoamento nestas tubulações é avaliado melhor pelo modelo de escoamento "plug-flow" (Duffie; Beckman, 1991). A tubulação é dividida em trechos e de acordo com a massa de água que entra em um dado intervalo de tempo o perfil de temperaturas é calculado.

Desta forma, o fluxo de calor através da tubulação será calculado pela equação 64:

$$q_{tub} = \sum_{x=0}^{x=L} h_c \cdot A \cdot (T_{(x)} - Tar) \quad (\text{Eq. 64})$$

3.6 Análise Econômica

A análise econômica proposta consiste no uso do indicador de retorno Valor Presente Líquido (VPL) associado com *F-Chart* um conjunto de indicadores de risco: Taxa Interna de Retorno (TIR), Tempo de Recuperação do Capital (TRC) e Período de *Payback* Descontado (PPD). O tratamento teórico desses indicadores, bem como as fórmulas de cálculo estão disponíveis em vários textos, como em Souza et al. (2003).

3.6.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL, expresso pela equação 65, corresponde à soma algébrica dos valores presentes envolvidos no fluxo de caixa, ou seja, é a soma dos desembolsos e receitas de um investimento, trazidos para o instante inicial da análise.

$$VPL = V_0 + \sum_{i=1}^N \left[(F_L)_i \cdot \left(1 + \frac{j}{100} \right)^{-i} \right] \quad (\text{Eq. 65})$$

Onde:

VPL : valor presente líquido(R\$);

V₀ : valor do investimento inicial para a instalação do SAS (R\$);

FL : fluxo de caixa líquido (R\$);

j : taxa anual de juros (%).

Como a análise econômica realizada pelo software *Helios-Chart* é incremental, ou seja, avalia o que pode ser feito com o excedente do dinheiro não investido no projeto mais caro, o VPL também será incremental (Camargo, 1988). Isto significa que a instalação do SAS em substituição à energia convencional consumida será viável, caso o VPL seja maior que zero. Como há incertezas na determinação dos valores atribuídos às variáveis envolvidas no cálculo, deve-se considerar um valor positivo mínimo para o VPL para indicar a viabilidade econômica do projeto sob análise. No caso de duas configurações com VPL positivos, aquela que apresentar o maior VPL será considerada melhor.

3.6.2 TIR (Taxa Interna de Retorno)

A TIR é a taxa de juros que torna nulo o VPL, ou seja, a taxa para a qual a soma das receitas torna-se igual à soma das despesas. Em uma análise incremental, a TIR é exatamente o valor de juros praticado no mercado para o qual a instalação do SAS passa a ser inviável economicamente. Por isto, para que uma opção de instalação seja viável, a TIR deverá ser maior que a taxa de juros (j) considerada na análise, também denominada de taxa de atratividade, isto é, $TIR > j$. No caso de duas opções viáveis, deve ser considerada melhor aquela que apresentar maior TIR. Existem casos em que a TIR não converge. Isto acontece quando o VPL é sempre positivo ou sempre negativo, mesmo modificando-se o valor da taxa de juros. Nesses casos, a TIR não pode ser considerada como parâmetro para determinar a viabilidade do investimento. Para adequação da área coletora é obtido o valor da TIR, por meio de interpolação inversa. Isto é feito em duas etapas. Inicialmente, os valores de VPL para a opção de troca em questão são testados, até que se obtenham valores com sinais opostos. Ou seja, o valor de VPL igual a zero está entre estes dois pontos (Camargo, 1998). O valor inicial de taxa de juros utilizado para os testes, neste trabalho, será zero e os valores seguintes serão obtidos por incrementos lineares de 0,05. Por meio desses valores, será criado um conjunto de pontos $[X_i, Y_i]$ em que i varia de 1 a 4, X representa as taxas de juros e Y os valores presentes líquidos (2 valores positivos e 2 negativos). O valor da TIR poderá ser obtido, então, utilizando-se equações baseadas nos polinômios de Lagrange (Gerald & Weatley, 1994), que são mostradas a seguir:

$$Termo_1 = X_1 \cdot \left[\frac{-Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_4}{(Y_1 - Y_2) \cdot (Y_1 - Y_3) \cdot (Y_1 - Y_4)} \right] \quad (\text{Eq. 66})$$

$$Termo_2 = X_2 \cdot \left[\frac{-Y_1 \cdot Y_3 \cdot Y_4}{(Y_2 - Y_1) \cdot (Y_2 - Y_3) \cdot (Y_2 - Y_4)} \right] \quad (\text{Eq. 67})$$

$$Termo_3 = X_3 \cdot \left[\frac{-Y_2 \cdot Y_1 \cdot Y_4}{(Y_3 - Y_2) \cdot (Y_3 - Y_1) \cdot (Y_3 - Y_4)} \right] \quad (\text{Eq. 68})$$

$$Termo_4 = X_4 \cdot \left[\frac{-Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_1}{(Y_4 - Y_2) \cdot (Y_4 - Y_1) \cdot (Y_4 - Y_3)} \right] \quad (\text{Eq. 69})$$

$$TIR = 100 \cdot (Termo_1 + Termo_2 + Termo_3 + Termo_4) \quad (\text{Eq. 70})$$

Onde:

TIR : taxa interna de retorno (%);

Termoi : equações baseadas nos polinômios de Lagrange (i = 1, 2, 3, 4);

Xi é a taxa de juros considerada para o termo i;

Yi : VPL considerado para o termo i.

3.6.3 Tempo de Recuperação do Capital (TRC)

O TRC é o tempo necessário para que o valor investido na instalação de um SAS seja recuperado. No caso em que o fluxo líquido avaliado apresentar valores de investimento e benefícios com sinais iguais e positivos ou investimento inicial positivo (em que o sinal positivo representa ganho), conclui-se que o retorno de capital na opção em questão é imediato. Caso contrário, o cálculo do TRC divide-se em anos e meses em que o investimento inicial será recuperado. O número de anos para que o investimento seja recuperado é obtido, iterativamente, aplicando-se a equação 71, para cada ano dentro do horizonte de planejamento, até que o resultado obtido seja maior que o montante investido no SAS. Em seguida, determina-se o ano referente ao retorno do capital por meio da equação 72. O número de meses necessários para que o investimento seja recuperado é obtido por meio das equações 68 e 69. O investimento será viável, caso o valor obtido pela combinação de (Ar) , equação 72, e (Mr) , equação 74, seja menor que o horizonte de planejamento.

$$(Vp)_i = (Vp)_{i-1} + \frac{(F_L)_i}{\left(1 + \frac{j}{100}\right)^i} \quad (\text{Eq. 71})$$

$$A_r = A_s - 1 \quad (\text{Eq. 72})$$

$$V_r = \frac{(F_L)_{A_s}}{12 \cdot \left(1 + \frac{j}{100}\right)^{A_s}} \quad (\text{Eq. 73})$$

$$M_r = \frac{|V_0| - (Vp) \cdot A_r}{V_r} \quad (\text{Eq. 74})$$

Onde:

Vp : valor anual parcial recuperado (R\$);

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

Ar : ano de recuperação do capital (adimensional);

As : ano em que o valor parcial recuperado é maior que o investimento na instalação do SAS analisado (adimensional);

Vr : valor mensal parcial recuperado (R\$);

Mr : mês de recuperação do capital.

O número 12 é um fator correspondente aos 12 meses do ano analisado.

3.6.4 Período de Payback Descontado (PPB)

O Payback tem como objetivo estimar o tempo que ocorrerá a recuperação do capital investindo em função dos benefícios líquidos gerados conforme define Santos (2001).

Para Campos (2003) o Payback analisa o tempo necessário para recuperar o investimento inicial; quantos anos serão necessários até que os benefícios líquidos acumulados igualem-se ao investimento inicial.

O Payback pode ser simples ou descontado. O simples ignora o valor dos benefícios no tempo, sendo esta a maior crítica ao método. Para corrigir esta inconsistência em relação ao critério tempo deve-se utilizar o Payback descontado, o qual considera o valor presente dos benefícios líquidos para o cálculo do tempo de retorno (Santos, 2001).

Quanto menor o período de recuperação, maior a liquidez do projeto e maior a segurança do investidor.

$$PPB = \sum_{t=0}^{n_i} (Vf - Vo)_{t_i} = 0 \quad (\text{Eq. 75})$$

Onde:

Vf : benefícios gerados com a instalação do SAS (R\$);

t_i : período de tempo;

n_i : tempo-limite.

3.7 Software Helios-Chart

Para o desenvolvimento do software proposto foi utilizada a linguagem de desenvolvimento C++, por apresentar características como:

- Verificação de tipos mais rigorosa;
- Permitir Programação Orientada a Objetos (abstração de dados);
- Uso de classes para a implementação da Programação Orientada a Objetos;
- Mecanismo de herança, permitindo a criação de uma estrutura hierárquica de classes;
- Sobrecarga de operadores e de funções;
- Recursos para tratamento de erros e de alocação dinâmica de memória tais como os operadores *new* e *delete*.

Tais características permitem desenvolver uma ferramenta que pode evoluir tanto na funcionalidade quanto na qualidade.

O *NetBeans* IDE, desenvolvido pela empresa *Sun Microsystems*, é um ambiente integrado gratuito e de código aberto para desenvolvedores de software. O IDE é compatível com diversas plataformas tais como *Windows*, *Linux*, *Solaris* e *MacOS*. O *NetBeans* IDE oferece aos desenvolvedores todas as ferramentas necessárias para criar aplicativos profissionais de *desktop*, empresariais, *Web* e móveis multiplataformas.

A seguir é apresentado o fluxograma de forma sumarizada do software Helios-Chart.

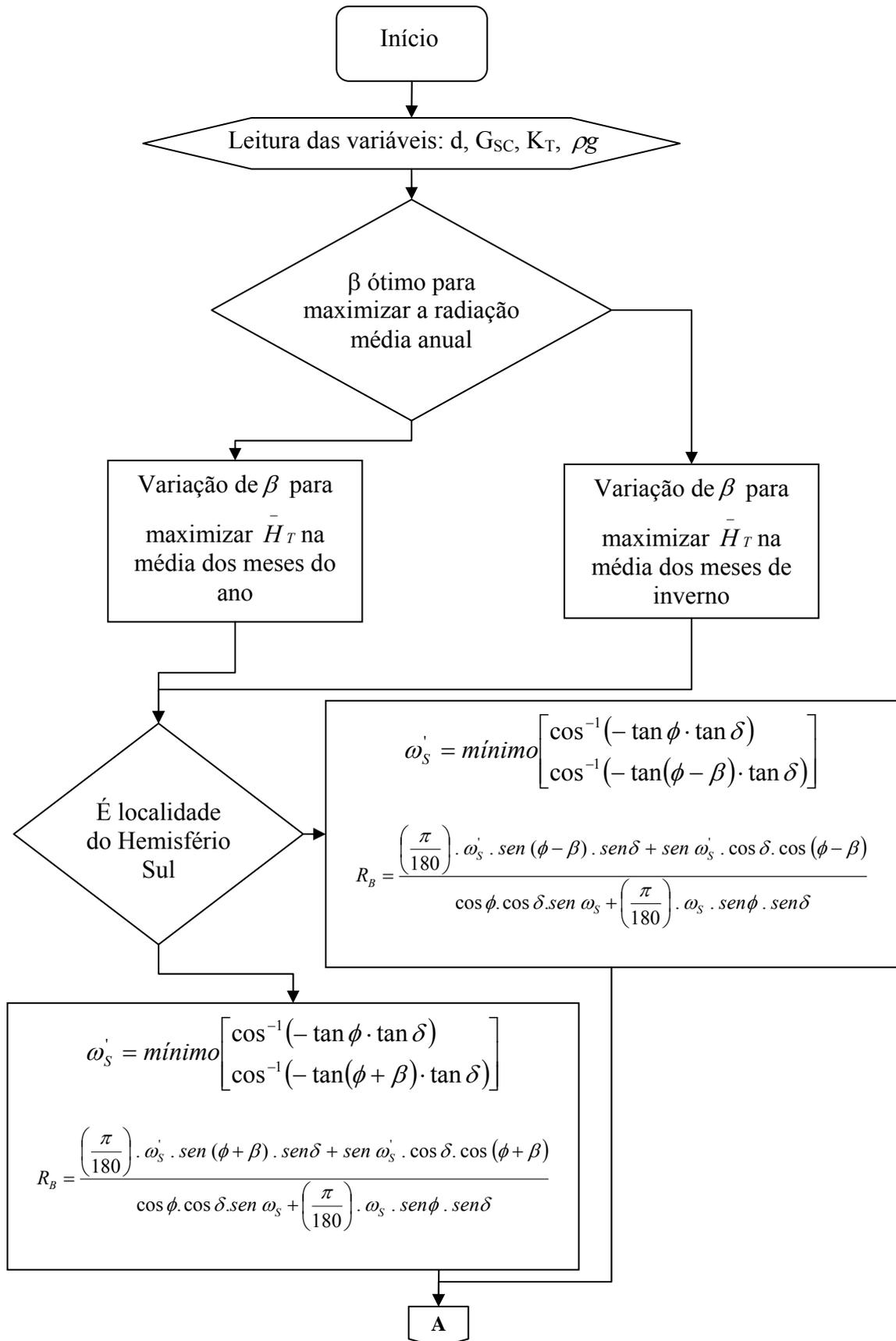


Figura 30a – Cálculo da radiação mediante da localidade e refletância do entorno.

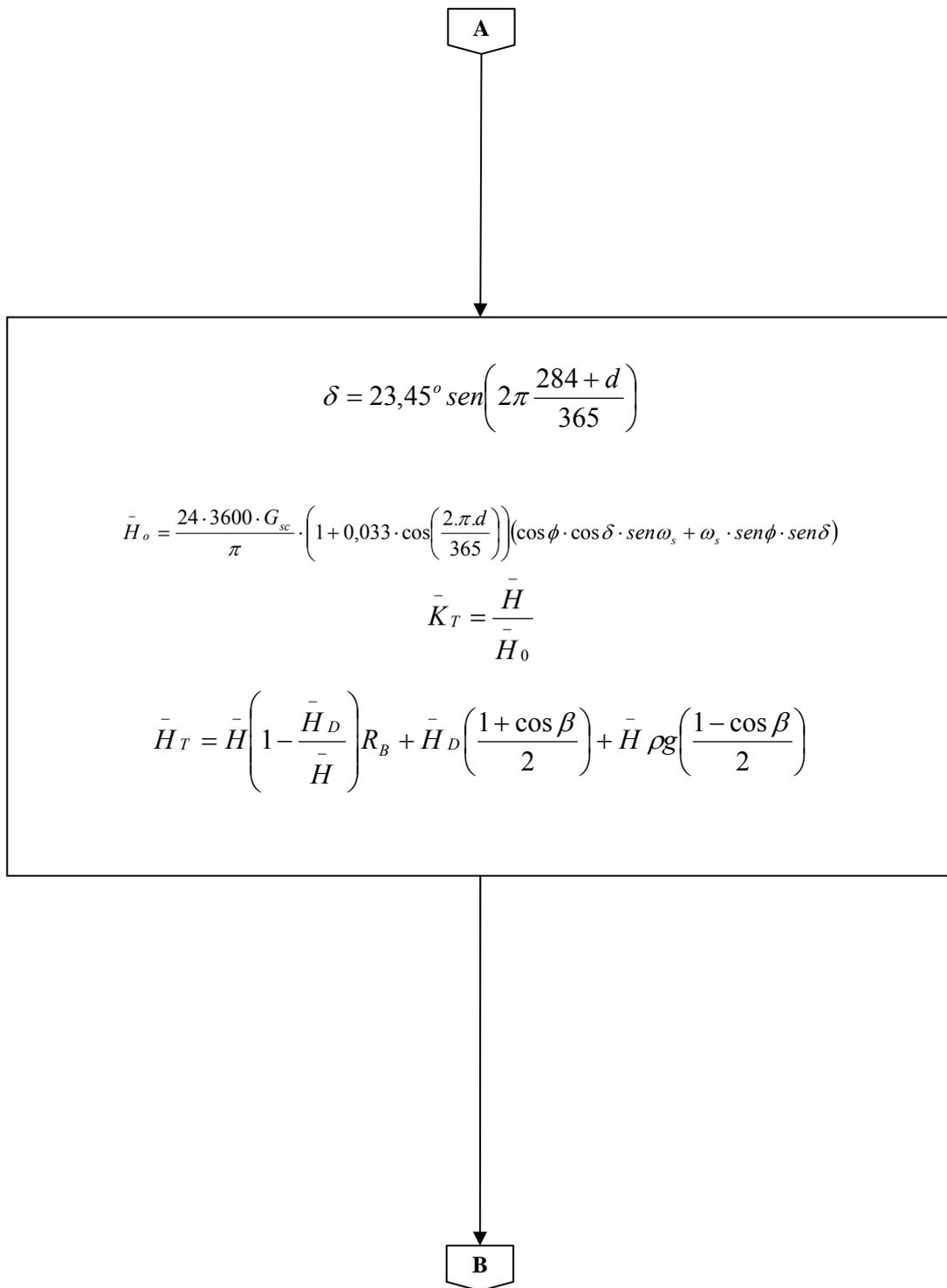


Figura 30b – Cálculo da radiação mediante da localidade e refletância do entorno.

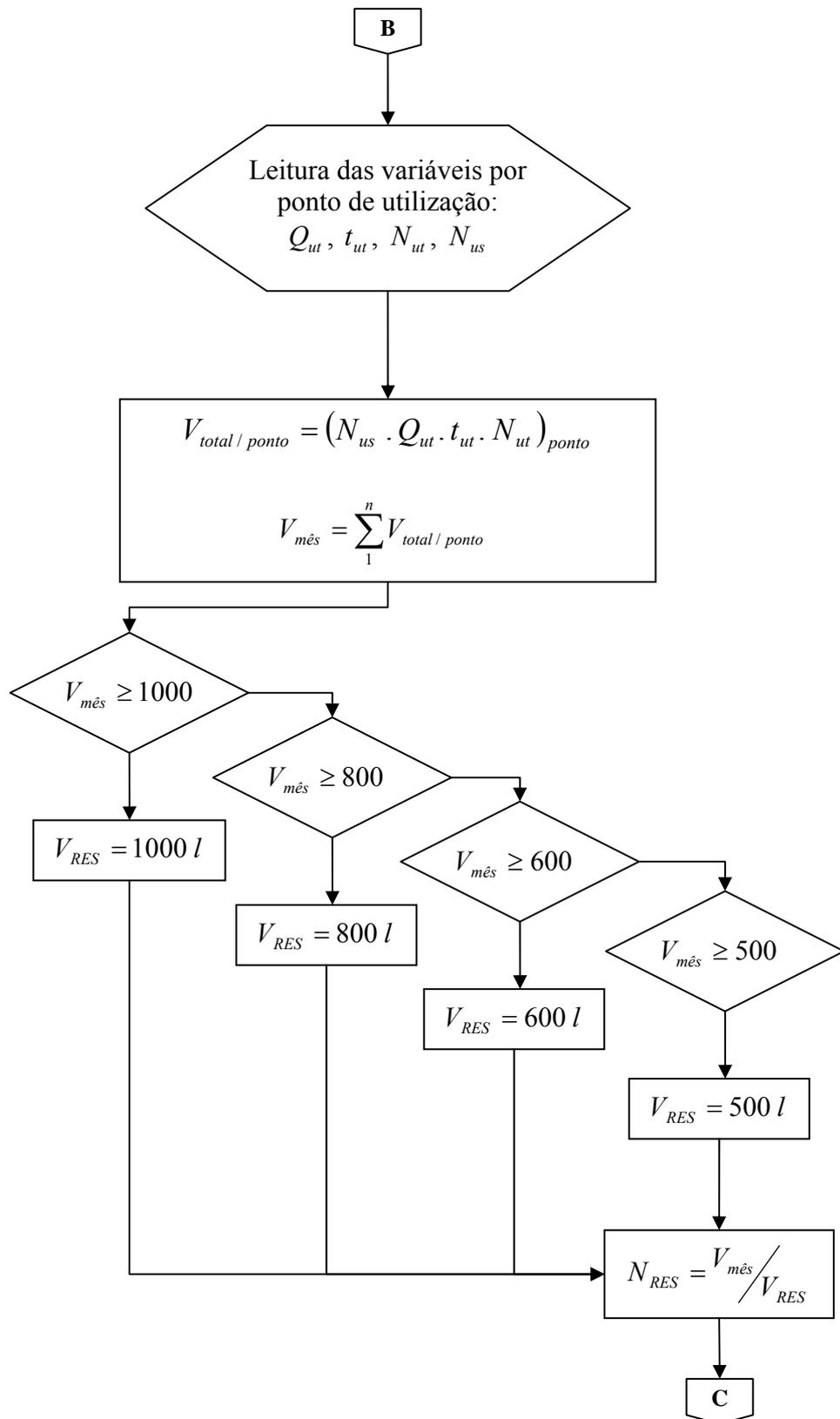


Figura 31 – Cálculo do número de reservatórios em função do número de usuários e características de consumo.

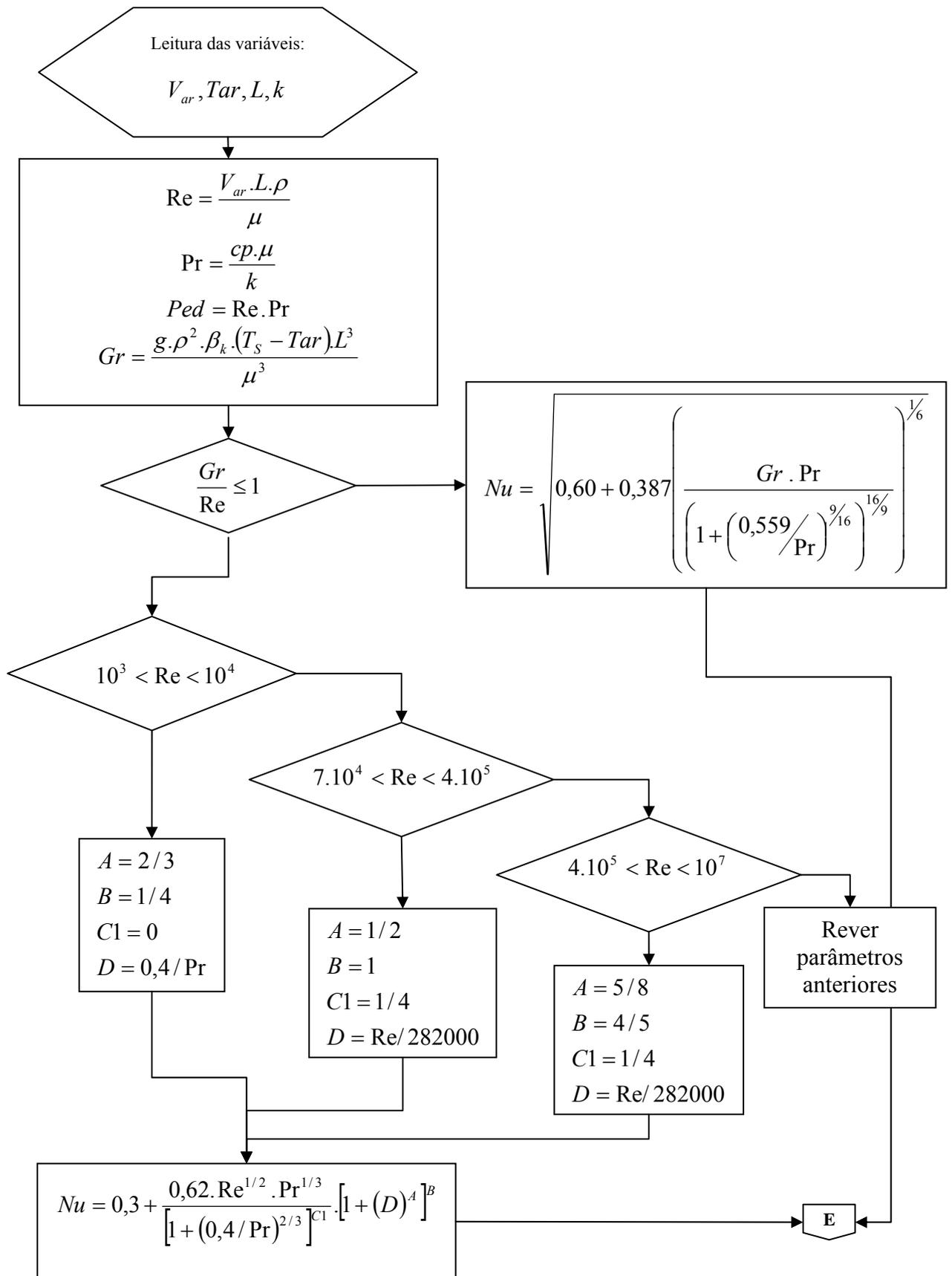


Figura 32 – Rotina de cálculo do fluxo de calor através das tubulações.

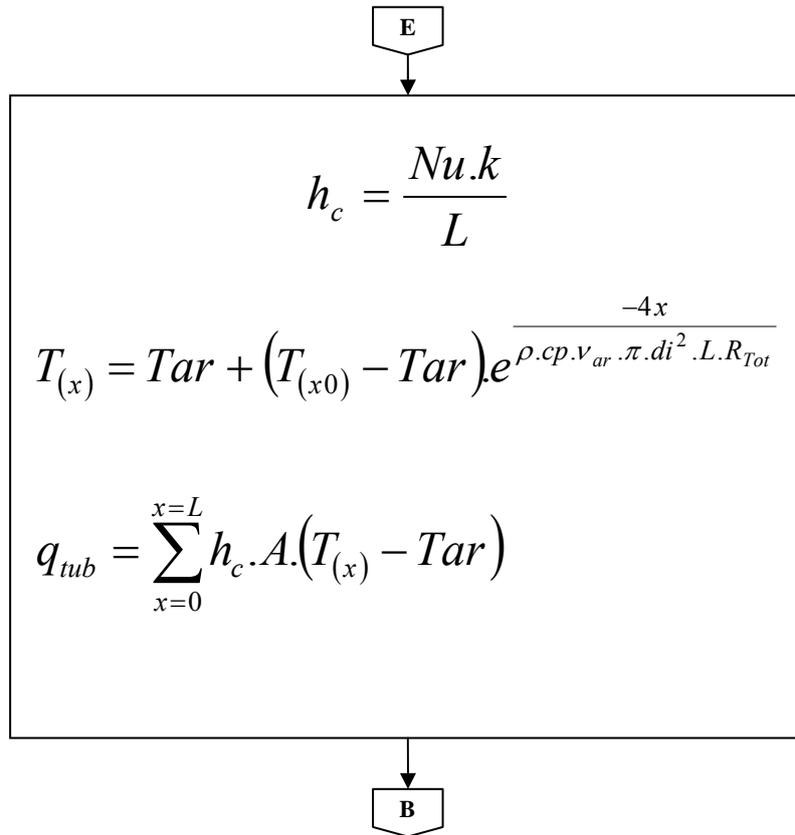


Figura 33 – Rotina de cálculo do fluxo de calor através das tubulações – continuação.

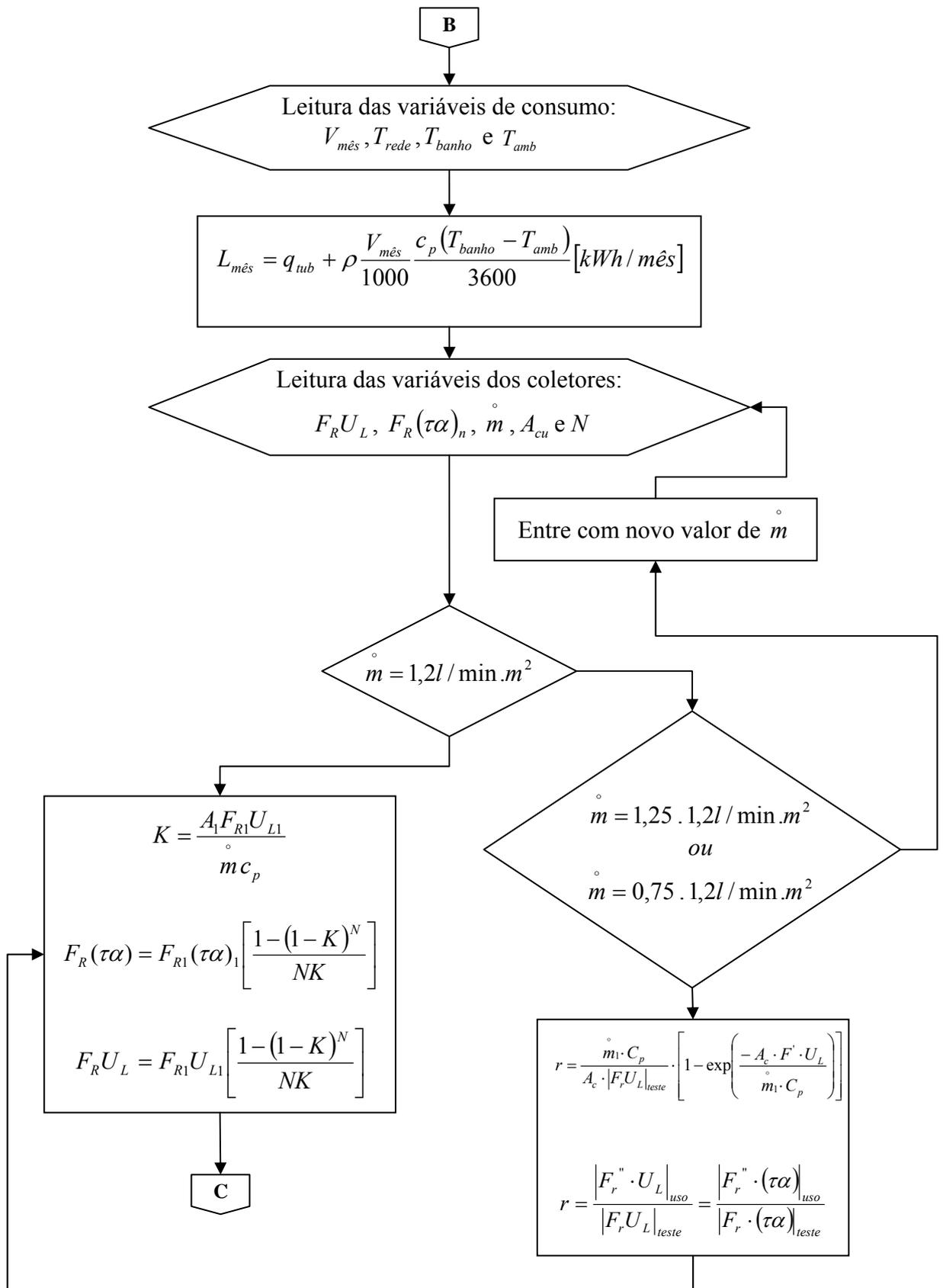


Figura 34 – Cálculo da demanda de água quente e dos parâmetros para N coletores conectados em série.

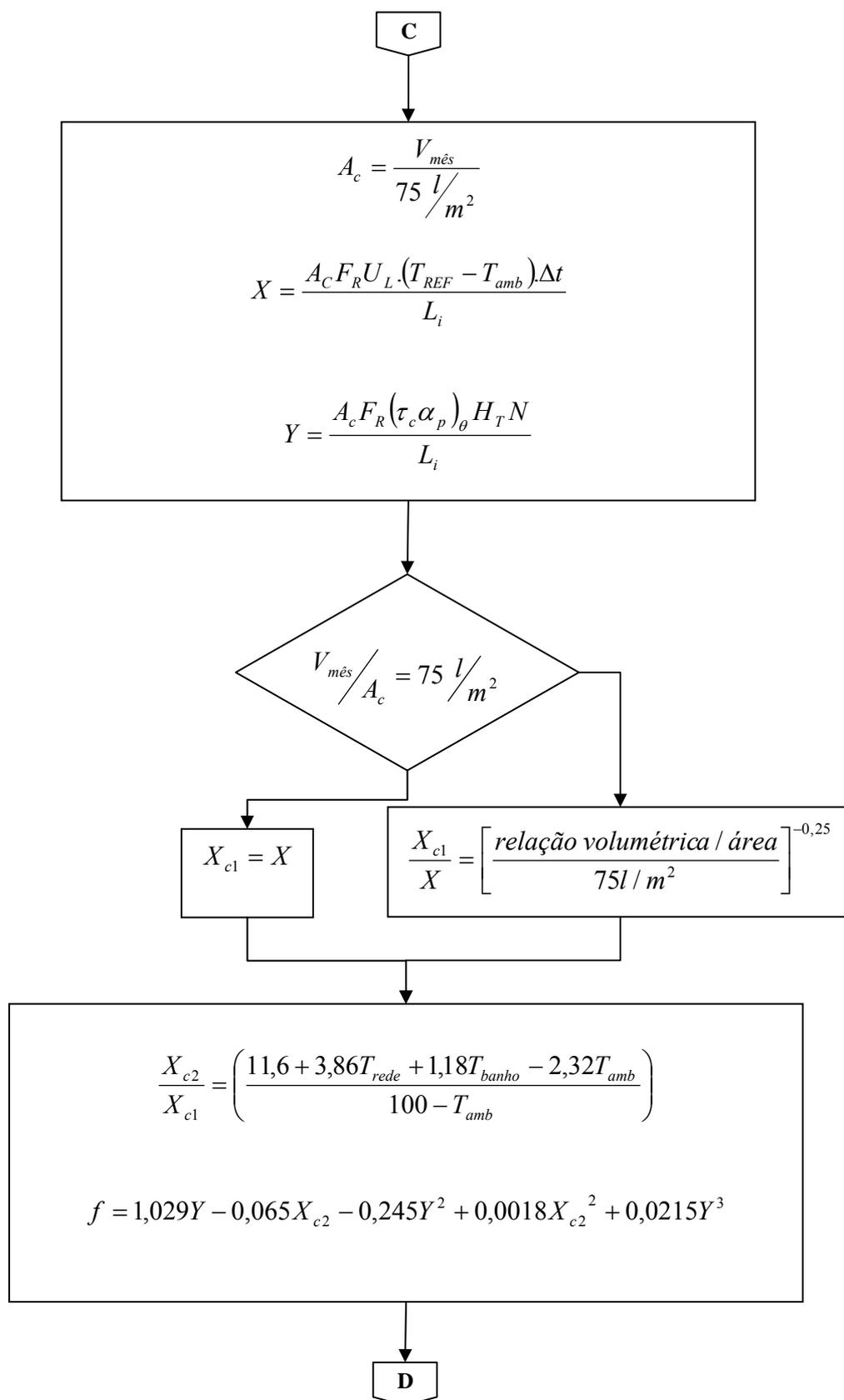


Figura 35 – Cálculo da fração solar da instalação.

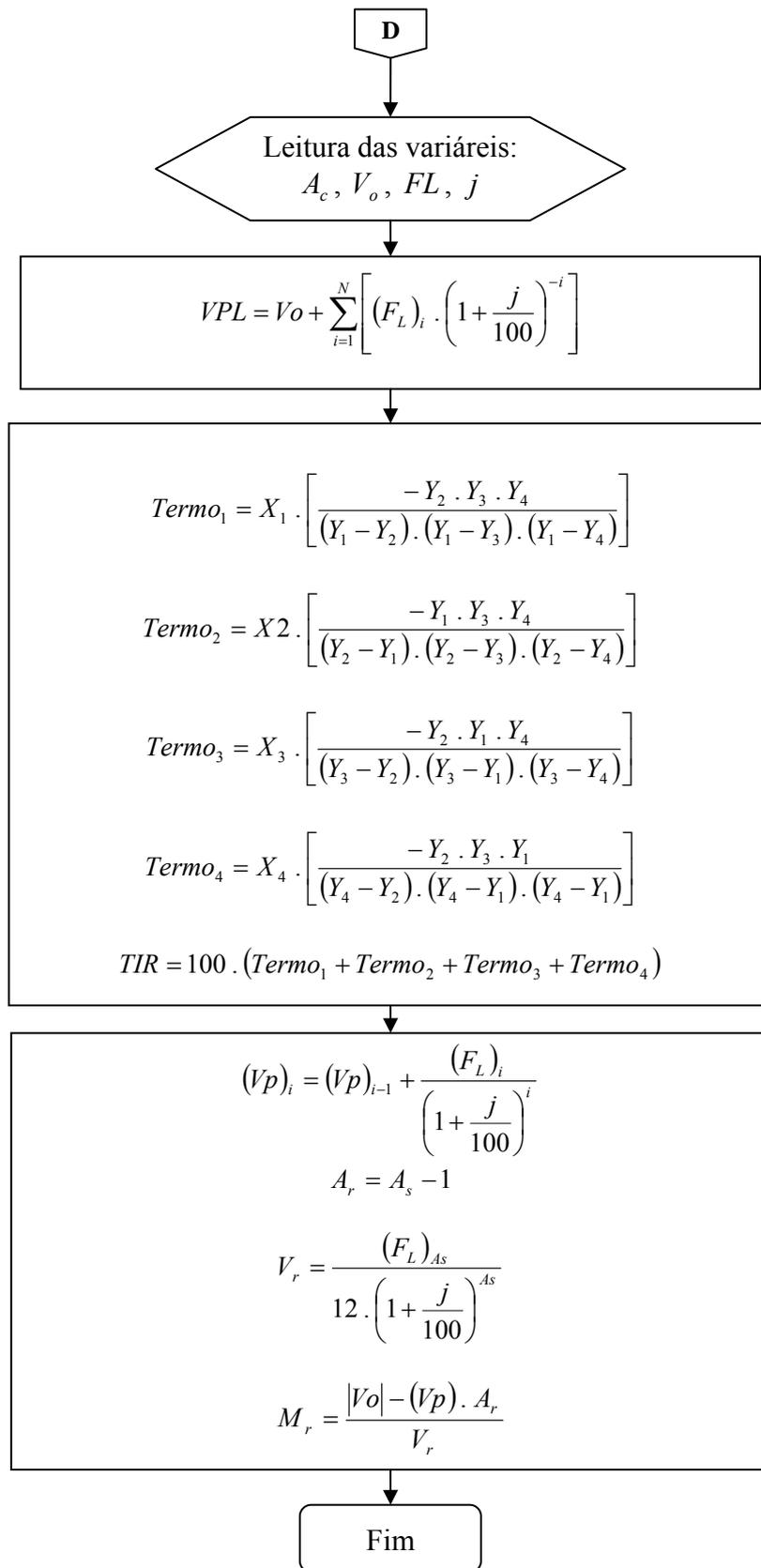
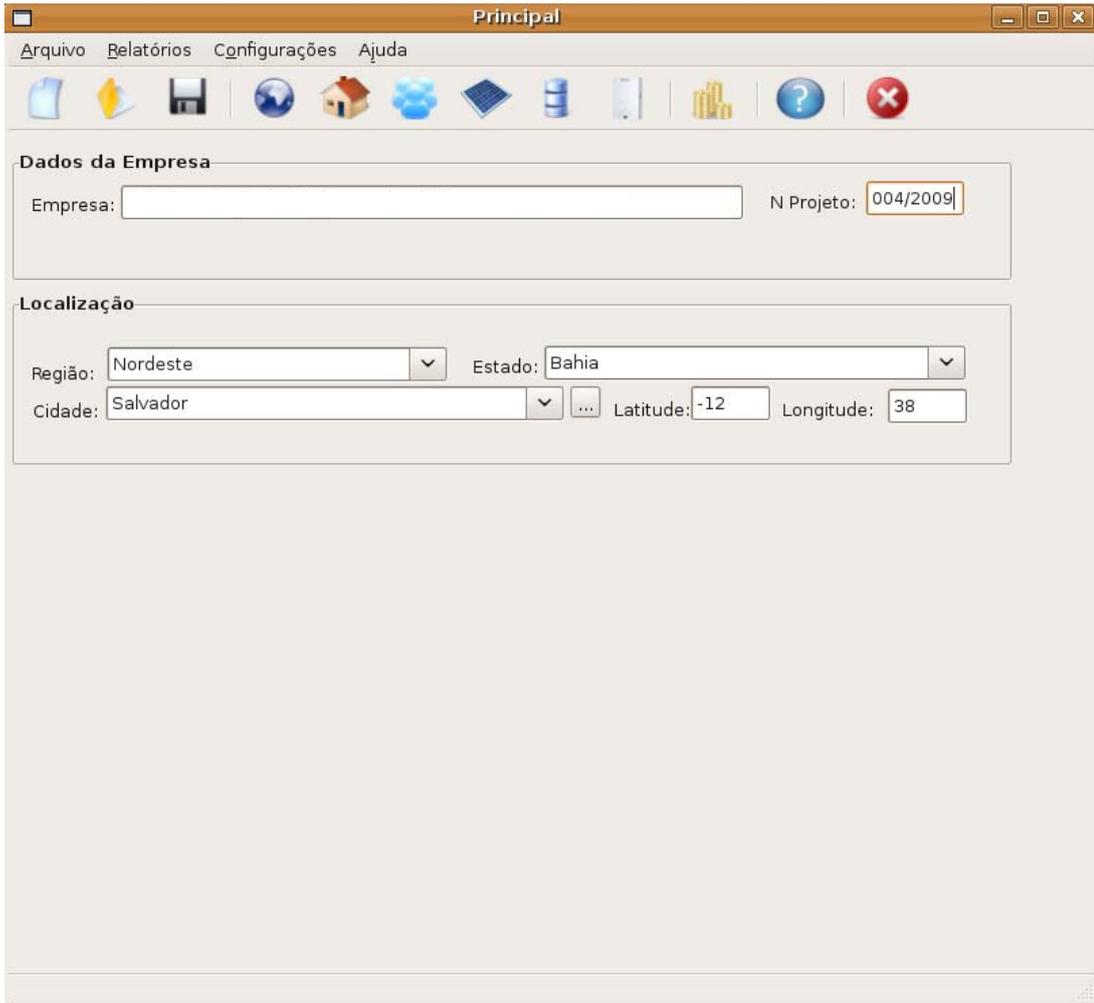


Figura 36 – Cálculo de índices para a análise econômica.

3.8 Interface Gráfica do Software Helios-Chart:

Apresenta-se nas quatro figuras a seguir as principais telas do software *Helios-Chart*. Na tela correspondente à figura 37 o usuário entrará com o nome da empresa responsável pelo projeto e seu respectivo número. Deverá também selecionar a localidade do SAS referente ao projeto.



The screenshot shows the main menu window of the Helios-Chart software. The window title is "Principal". The menu bar includes "Arquivo", "Relatórios", "Configurações", and "Ajuda". Below the menu bar is a toolbar with various icons representing different functions. The main area of the window is divided into two sections: "Dados da Empresa" and "Localização".

Dados da Empresa

Empresa: N Projeto:

Localização

Região: Estado:
Cidade: Latitude: Longitude:

Figura 37 – Tela do *Menu Principal* do software

Na tela correspondente à figura 38 o usuário do software otimizará a instalação para a média dos meses de inverno ou para a média anual. O resultado final da simulação será a radiação total incidente no coletor solar resultante da soma das três componentes: radiação direta, radiação difusa e radiação refletida pelo entorno.



Mês de Referência	Beam	Difuse	RBarra	Ht (MJ/m ²)
Janeiro	0,22	0,19	0,56	13,1
Fevereiro	0,33	0,19	0,67	16,4
Março	0,47	0,23	0,84	18,3
Abril	0,66	0,25	1,04	19,5
Mai	0,79	0,28	1,21	18,2
Junho	0,94	0,25	1,33	20,4
Julho	0,87	0,26	1,27	19,0
Agosto	0,75	0,23	1,12	20,5
Setembro	0,54	0,23	0,92	18,8
Outubro	0,36	0,22	0,73	16,3
Novembro	0,23	0,24	0,61	12,7
Dezembro	0,19	0,22	0,55	11,7

Figura 38 – Tela de cálculo da radiação solar do software

Na tela correspondente à figura 39 o usuário do software otimizará o número de coletores e o volume dos reservatórios de água quente de modo a atender os limites de projeto.



Número de Coletores	Área Coletora Real	Reservatório Selecionado	Número de Reservatórios
52	104	1000	7

Figura 39 – Tela de dimensionamento do reservatório e número de coletores.

Na tela correspondente à figura 40 ao usuário do software é disponibilizado o resumo a instalação do SAS. A partir desta tela o usuário poderá imprimir relatórios dos dados de saída do software.

Área(m ²)	Incl. β	Temp. de Uso	Nº de Coletores	Nº de Usuários	Litros/Usu.dia	Vol. de Acumulação (l)	Rel V/A(l/m ²)	Fr(ta)n	FrUl(W/m ² °C)
105,5	58	38	53	100	70	7000	67,5	0,7	6,12

Mês	Ocupação (%)	Energia Final Útil (kWh)	Energia Solar Aportada(kWh)	Aporte Solar(%)	Água Quente(m ³ /mês)
Janeiro	100	3,533	2,901	82,11	217
Fevereiro	100	3,533	3,291	93,18	196
Março	100	3,533	3,452	97,73	217
Abril	100	4,037	4,023	99,64	210
Mai	100	4,037	3,906	96,75	217
Junho	100	4,289	4,289	100	210
Julho	100	4,289	4,215	98,26	217
Agosto	100	4,289	4,289	100	217
Setembro	100	4,289	4,195	97,80	210
Outubro	100	4,037	3,698	91,59	217
Novembro	100	3,785	2,981	73,85	217
Dezembro	100	3,785	2,795	73,85	217
TOTAL ANUAL	100	47,437	44,036	92,83	2555
VALOR EM MJ	-	170,772	158,529	-	-

Figura 40 – Tela de resultados do dimensionamento de instalações solares térmicas.

4. Resultados

Este capítulo tem por objetivo apresentar resultados gerados pelo programa desenvolvido de forma a validá-lo. O cálculo da fração solar foi comparado tanto com um projeto de aquecimento solar de água para uma república dos estudantes da UFRGS apresentado por Kehl (2004), como também com dois exemplos de Duffie & Beckman (1991).

4.1 Fração solar

4.1.1 Comparação com Duffie & Beckman (1991)

No exemplo 20.3.1 de Duffie & Beckman (1991), coletores solares com vidro simples são usados em projetos de sistemas de aquecimento solar em Madison, Wisconsin (EUA). Os valores dos diversos parâmetros dos coletores são apresentados na tabela 11. O fator de correção devido à eficiência do trocador de calor² (F'_{R}/F_R) foi de 0,97. O produto efetivo da transmitância pela absorvância ($\tau \cdot \alpha_e$) do coletor solar para o ângulo de incidência normal foi de 0,96³.

As tabelas 12 e 13 apresentam, respectivamente, os resultados do cálculo da fração solar efetuado pelo Helios-Chart e os dados apresentados por Duffie & Beckman (1991). Na tabela 12 os dados meteorológicos (colunas 2 e 3) e de demanda de energia (coluna 4) foram usados como valores de entrada no software, que gerou os valores apresentados nas demais colunas. Houve completa concordância dos valores das frações solares mensais, mostrando que o cálculo efetuado pelo Helios-Chart está correto.

² Este fator de correção somente é utilizado para sistemas ativos indiretos.

³ Duffie e Beckman (1991) recomendam, quando esta informação não for disponível, este valor deve ser igual a 0,96, ou seja, 96% do valor medido experimentalmente durante os ensaios do PBE/INMETRO.

F_{RUL}	4.00 W/m ²
$F_R(\tau\alpha)_n$	0,74
F'_R/F_R	0,97
$\frac{(\bar{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$	0,96
β	60°
A_c	50 m ²

Tabela 11 – Parâmetros dos coletores usados em Duffie & Beckman (1991).

Folha de Cálculo										
Mês	HT:Radiação Média Diária (J/m ²)	Temperatura Ambiente Média Mensal (°C)	L:Carga Térmica Diária (J)	X	Xc1	Xc2	Y	f	fdef: Energia Solar Aportada para a	fL (GJ)
Janeiro	11900000	-7	36000000000	1,54	1,54	0,49	0,35	0,24	0,24	8,6
Fevereiro	15500000	-6	30400000000	1,64	1,64	0,55	0,49	0,35	0,35	10,6
Março	15800000	0	26700000000	1,95	1,95	0,87	0,63	0,44	0,44	11,7
Abril	14500000	7	15700000000	2,98	2,98	1,78	0,95	0,60	0,60	9,4
Maio	15400000	13	9200000000	4,91	4,91	3,66	1,73	0,88	0,88	8,1
Junho	15900000	19	4100000000	9,93	9,93	9,09	4,01	1,10	1,00	4,1
Julho	16300000	21	2900000000	14,15	14,15	13,83	6,00	1,44	1,00	2,9
Agosto	16600000	20	3400000000	12,23	12,23	11,56	5,21	1,23	1,00	3,4
Setembro	15800000	15	6300000000	6,78	6,78	5,42	2,59	1,04	1,00	6,3
Outubro	14900000	10	13300000000	3,52	3,52	2,35	1,20	0,71	0,71	9,5
Novembro	9600000	1	22800000000	2,18	2,18	1,02	0,44	0,27	0,27	6,2
Dezembro	8500000	-5	32500000000	1,68	1,68	0,59	0,28	0,16	0,16	5,4
Total			203300000000							86,0
coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7	coluna 8	coluna 9	coluna 10	coluna 11

Tabela 12 – Cálculo da fração solar pelo Helios-Chart.

Month	\overline{H}_τ		\overline{T}_a		L		X	Y	f	fL	
	(MJ/m ²)	[Btu/ft ²]	(°C)	[°F]	(GJ)	[MMBtu]				(GJ)	[MMBtu]
Jan.	11.9	1048.0	-7	19.4	36	34.1	1.54	0.35	0.24	8.6	8.2
Feb	15.5	1365.0	-6	21.2	30.4	28.8	1.64	0.49	0.35	10.5	10.0
Mar	15.8	1391.4	0	32.0	26.7	25.3	1.95	0.63	0.44	11.7	11.1
Apr	14.5	1276.9	7	44.6	15.7	14.9	2.98	0.96	0.60	9.4	8.9
May	15.4	1356.2	13	55.4	9.2	8.7	4.91	1.73	0.88	8.1	7.7
Jun	15.9	1400.2	19	66.2	4.1	3.9	9.93	4.01	1.00	4.1	3.9
Jul	16.3	1435.4	21	69.8	2.9	2.7	14.15	6.01	1.00	2.9	2.7
Aug	16.6	1461.9	20	68.0	3.4	3.2	12.23	5.22	1.00	3.4	3.2
Sep	15.8	1391.4	15	59.0	6.3	6.0	6.78	2.59	1.00	6.3	6.0
Oct	14.9	1312.1	10	50.0	13.2	12.5	3.54	1.21	0.71	9.4	8.9
Nov	9.6	845.4	1	33.8	22.8	21.6	2.18	0.44	0.27	6.2	5.9
Dec	8.5	748.5	-5	23.0	32.5	30.8	1.68	0.28	0.16	5.3	5.0
Total					203.2	192.6				85.9	81.4

Tabela 13 – Dados do exemplo de Duffie e Beckman (1991).

4.1.2 Comparação com Kehl (2004)

Os valores dos diversos parâmetros da localidade, características da instalação e de consumo do trabalho de Kehl (2004) são apresentados na tabela 14.

Localidade	Porto Alegre
Latitude (°)	- 30,04
Longitude (°)	51,2
Azimutal (°)	180
Ângulo de inclinação dos coletores (°)	40
Pontos de demanda	Chuveiro
Número de usuários	18
Temperatura da água quente (°C)	38
Número de banhos por dia	1
Tempo médio do banho (min)	10
Consumo médio de água quente para banho (l/min)	7

Tabela 14 - Dados do trabalho de Kehl (2004).

Para o cálculo da demanda energética de aquecimento, a temperatura da água da rede pública de abastecimento foi estimada como sendo aproximadamente 3°C abaixo da temperatura média ambiente naquele trabalho.

Na tabela 15 e figura 41 são apresentados, respectivamente, os valores e gráficos das frações solares correspondentes aos softwares *F-Chart* e *Termodim* reproduzidos de Kehl (2004) e gerados pelo *Helios-Chart*, considerando a variação do índice de claridade conforme Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1992)⁴. O software *Termodim* foi desenvolvido na UFRGS.

Mês	F-Chart	Termodim	Helios-Chart	Desvio HC/FC (%)	Desvio HC/T (%)
Janeiro	0,83	0,80	0,87	4,4	7,3
Fevereiro	0,81	0,80	0,88	8,5	8,9
Março	0,72	0,77	0,84	13,6	8,6
Abril	0,63	0,69	0,78	19,3	11,4
Maio	0,46	0,62	0,70	33,9	11,6
Junho	0,36	0,56	0,53	32,5	-6,0
Julho	0,46	0,56	0,58	21,1	2,8
Agosto	0,50	0,59	0,60	15,8	1,4
Setembro	0,58	0,62	0,62	6,7	0,0
Outubro	0,72	0,68	0,78	7,1	12,9
Novembro	0,80	0,73	0,81	1,4	10,3
Dezembro	0,84	0,77	0,86	1,3	10,5
Média dos Desvios				13,8	6,7

Tabela 15 – Valores da fração solar.

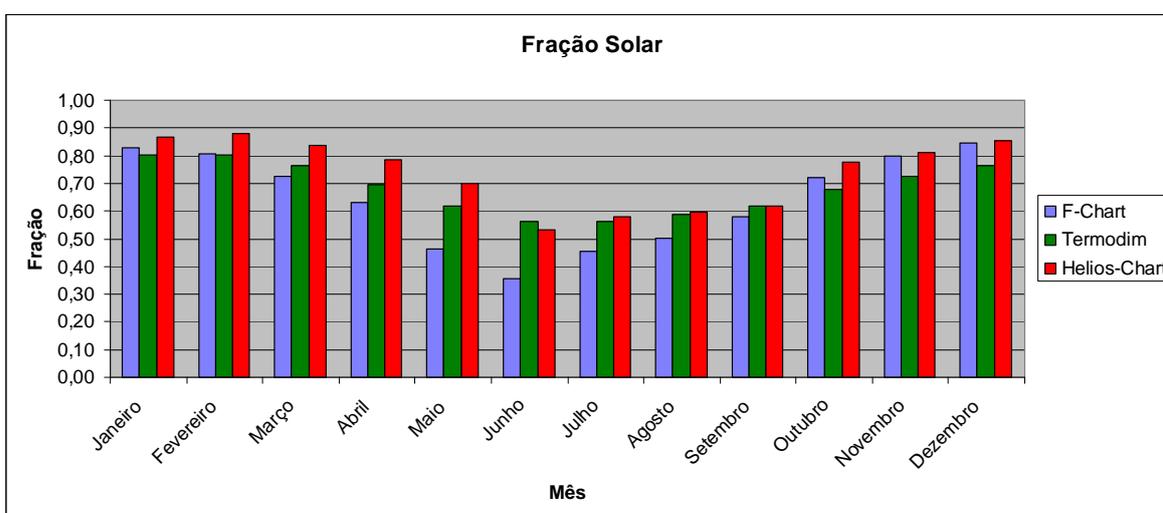


Figura 41 – Gráfico da fração solar.

⁴ Fonte (2) do Atlas Solarimétrico do Brasil.

Nos meses entre janeiro e maio os resultados do Helios-chart ficaram significativamente acima. Nos meses de junho a setembro os resultados ficaram mais próximos daqueles do Termodim. Nos meses restantes, os resultados ficaram mais próximos do F-Chart.

Como o software Termodim trabalha a partir de dados de radiação solar gerados pelo Radasol, também desenvolvido pela UFRGS, decidiu-se gerar novos dados com o Hélios-Chart, agora também utilizando dados da radiação solar produzidos pelo Radasol. A tabela 16 e figura 42 apresentam os novos resultados.

Mês	F-Chart	Termodim	Helios-Chart	Desvio HC/FC (%)	Desvio HC/T (%)
Janeiro	0,83	0,80	0,86	3,2	6,2
Fevereiro	0,81	0,80	0,84	3,8	4,3
Março	0,72	0,77	0,78	6,6	1,3
Abril	0,63	0,69	0,69	9,0	0,1
Maio	0,46	0,62	0,55	16,7	-11,4
Junho	0,36	0,56	0,41	13,1	-36,5
Julho	0,46	0,56	0,54	15,0	-4,8
Agosto	0,50	0,59	0,57	11,9	-3,2
Setembro	0,58	0,62	0,64	9,9	3,4
Outubro	0,72	0,68	0,77	6,5	12,3
Novembro	0,80	0,73	0,84	4,6	13,1
Dezembro	0,84	0,77	0,88	3,6	12,6
Média dos Desvios				8,6	-0,2

Tabela 16 – Valores da fração solar.

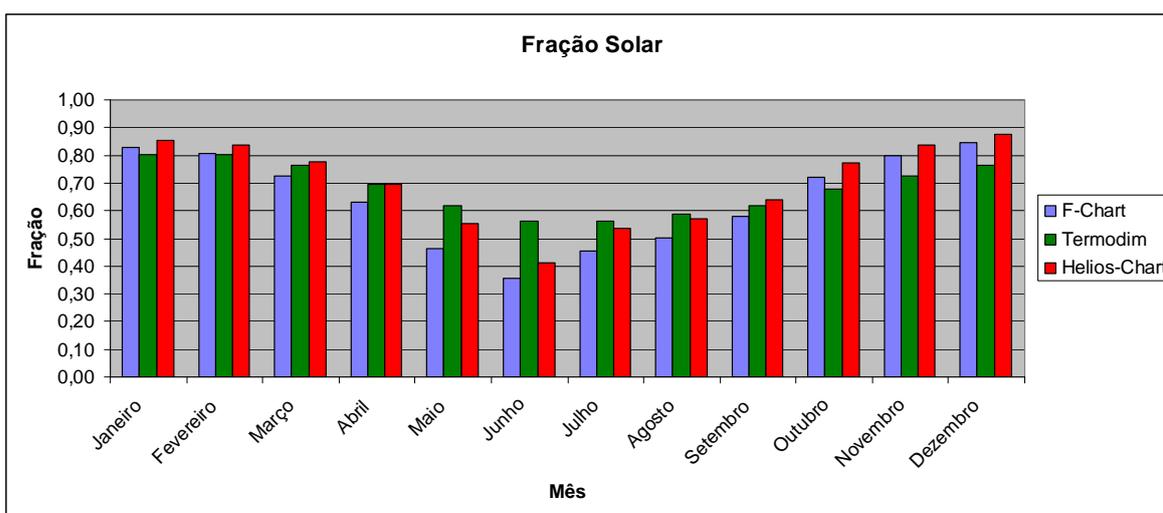


Figura 42 – Gráfico da fração solar.

Utilizando-se dados de radiação solar calculados pelo Radasol, verificou-se que os resultados gerados pelo Helios-Chart ficaram mais próximos daqueles dos demais softwares, e que a média dos desvios dos resultados da fração solar, entre os softwares Helios-Chart e Termodim ficou próxima de zero.

4.2 Radiação solar

Kehl (2004) utilizou para cálculo da radiação solar incidente o software Radasol. O programa conta com dados sobre radiação para inúmeras cidades do Brasil. Com estes dados e a partir das informações sobre latitude, longitude, desvio do coletor em relação norte e ângulo de inclinação do coletor, o programa informa de maneira gráfica a energia disponível em média mensal, sobre o plano dos coletores (Kehl, 2004). A tabela 17 apresenta uma comparação de resultados gerados pelo programa desenvolvido neste trabalho e gerados pelo Radasol. A figura 43 apresenta os mesmos resultados de forma gráfica.

Porto Alegre												
	$\beta = 40^\circ$						$\gamma = 180^\circ$					
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Radasol	19,0	18,4	17,1	16,0	13,2	11,1	13,7	14,3	15,6	18,3	19,5	20,2
Helios-Chart	18,5	19,1	18,1	17,4	15,5	12,8	13,8	14,0	14,2	17,4	17,7	18,6
Radasol (Média anual)	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
Helios-Chart (Média anual)	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
Fator de Correlação	2,32%	-3,45%	-5,65%	-8,52%	-18,04%	-14,83%	-0,24%	1,85%	8,78%	4,84%	8,85%	7,72%

Tabela 17 - Comparação de resultados gerados pelo Helios-Chart e gerados pelo Radasol.

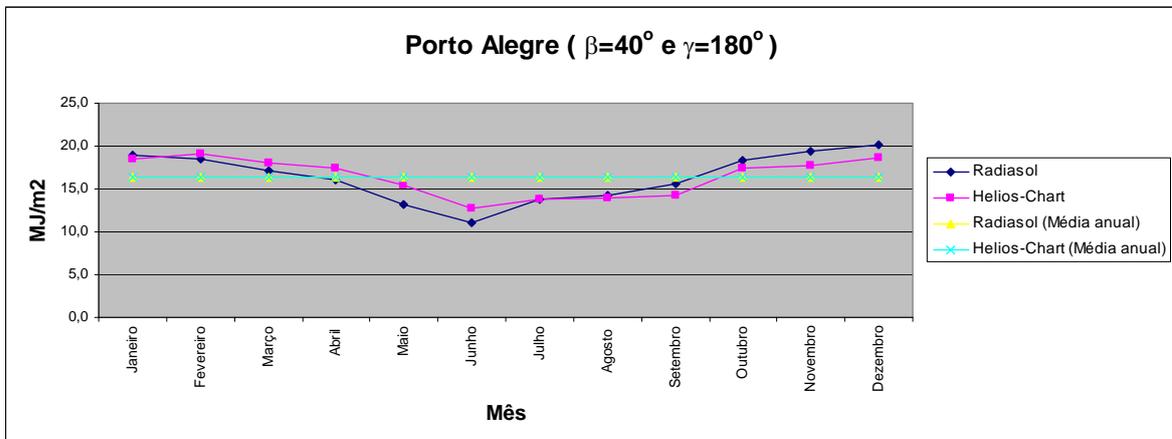


Figura 43 – Comparação gráfica dos resultados gerados pelo Helios-Chart e pelo Radasol.

No exemplo 3.2 de (Duffie, Beckman e Klein, 1977) são calculadas as radiações médias mensais para a cidade de Madison, Wisconsin (EUA). Na Tabela 18 são apresentados resultados gerados pelo Hélios-Chart, colunas 2 e 4, para o ângulo de inclinação do exemplo igual a 58°, bem como os valores correspondentes reproduzidos de (Duffie, Beckman e Klein, 1977), nas colunas 3 e 5. A figura 44 apresenta os mesmos resultados de forma gráfica.

Madison, Wisc. Solar Heating Design, pg.32 Duffie, Beckman e Klein				
Mês	Helios MJ/m2	F-Chart MJ/m2	Média Helios MJ/m2	Média F-Chart MJ/m2
janeiro	13,4	13,3	15,4	15,7
fevereiro	15,1	14,8		
março	17,4	17,5		
abril	15,2	15,7		
maio	14,9	15,7		
junho	15,5	16,8		
julho	16,4	17,4		
agosto	17,0	17,4		
setembro	18,7	18,5		
outubro	17,3	17,0		
novembro	11,7	11,6		
dezembro	12,5	12,4		
Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5

Tabela 18 - Comparação de resultados gerados pelo Helios-Chart com Duffie, Beckman e Klein (1977).

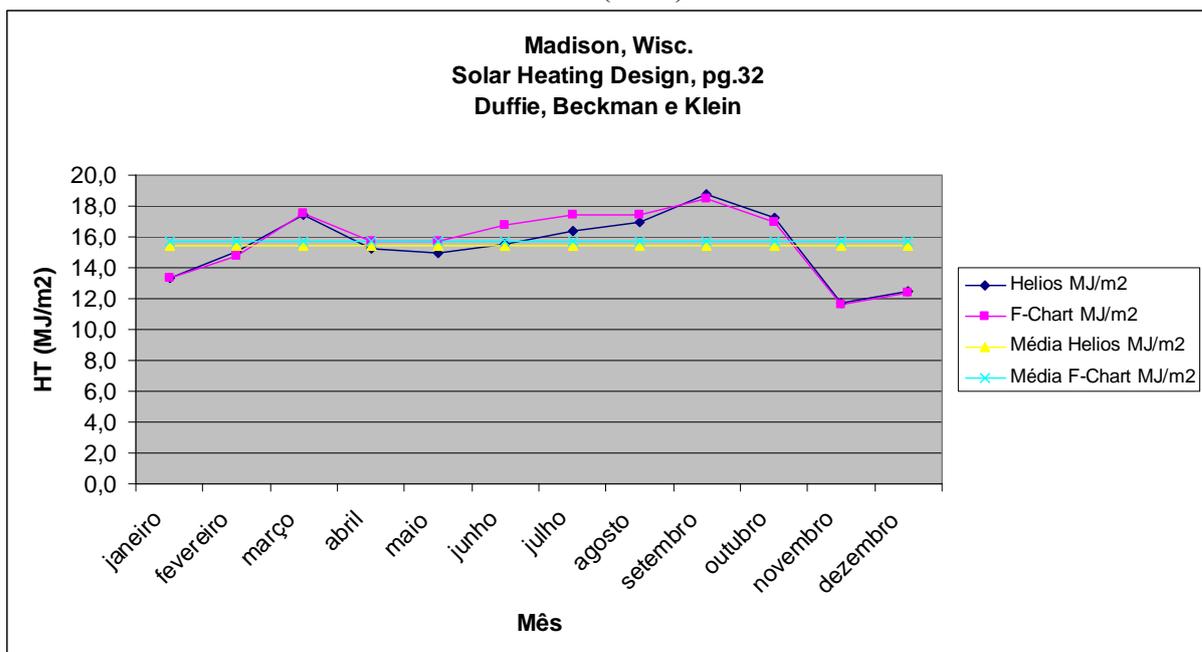


Figura 44 – Comparação gráfica dos resultados gerados pelo Helios-Chart com Duffie, Beckman e Klein (1977).

Na Figura 43 verifica-se que, para o caso de Kehl (2004), entre os meses de janeiro e julho os valores gerados pelo Helios-Chart estão acima daqueles gerados pelo Radasol, e no período compreendido entre agosto e dezembro ocorre o contrário. Na mesma figura pode ser observado que a média anual de radiação solar incidente coincide para ambos os programas. O maior desvio encontrado foi de 18% para o mês de maio. Estas diferenças eram esperadas, pois as bases de dados de radiação solar usadas nos dois programas são distintas. Já para o exemplo 3.2 de Duffie, Beckman e Klein (1977) verifica-se que o maior desvio foi de 8,1% no mês de junho, enquanto que a média anual apresentou um desvio de 1,6%. Neste segundo caso deve-se salientar que os valores da radiação solar global incidente no plano horizontal $\left(\bar{H}\right)$ utilizados no exemplo 3.2 foram extraídos do apêndice 2 da mesma fonte e representam dados meteorológicos medidos. Já os valores da radiação solar global incidente no plano horizontal $\left(\bar{H}\right)$ que foram usados no software Helios-Chart foram calculados para a mesma localidade.

5. Conclusões

O software *Helios-Chart* desenvolvido neste trabalho é mais adequado às empresas de engenharia e aos projetistas brasileiros porque utiliza dados meteorológicos provenientes do Atlas Solarimétrico Brasileiro e dados de coletores solares e reservatórios térmicos comerciais, provenientes dos testes oficiais, dentro do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), operacionalizado pelo Grupo de Estudo em Energia (GREEN/PUC-MG).

O software *Helios-Chart* calcula a área coletora utilizando uma rotina de otimização. O ângulo de inclinação dos coletores pode ser determinado por outra rotina de otimização buscando maximizar a radiação solar incidente em média anual ou apenas considerando os meses de inverno. Disto se tem outra vantagem.

A metodologia de cálculo da fração solar empregada (*F-Chart*) já está bastante consolidada e já era amplamente utilizada em cálculos nos projetos de energia solar, e por esta razão ela foi adotada.

Os resultados dos testes serviram para comprovar a aproximação dos cálculos realizados pelo software desenvolvido quando comparados aos valores impressos nas respectivas fontes adotadas para a sua aferição. Como o conjunto de testes foi pequeno, recomenda-se que testes adicionais sejam feitos. A falta de maior detalhamento dos softwares utilizados no trabalho de Kehl (2004) prejudicaram a análise efetuada.

Este software já permite escolher entre as diversas fontes de dados meteorológicos possíveis no atual Atlas Solarimétrico brasileiro. Este software deve ser estendido de forma a incluir a possibilidade de utilização do Atlas Solarimétrico do INPE.

Recomenda-se que sejam disponibilizadas pelo PBE as informações sobre perdas de carga dos coletores solares ensaiados, informações necessárias para o correto dimensionamento da bomba.

6. Sugestões para trabalhos futuros

1. Realizar a modelagem em regime transiente na base horária, de forma a permitir que o programa possa também ser utilizado para a simulação de desempenho de instalações já construídas, bem como, para fazer uma previsão de desempenho de instalações que se encontram na fase de projeto.

2. Incluir o modelo de reservatório estratificado, que será essencial para o item anterior.

3. Verificar entre os estudos disponíveis na literatura sobre índices de claridade, qual deles é o mais adequado ao Brasil, e incluí-lo como *default* deste software.

4. Acompanhar o levantamento e a análise de dezenas de pesquisadores no mundo, engajados na melhora do conhecimento do recurso solar disponível, particularmente da irradiação diária, mediante a sua geração sintética. A geração de séries temporais sintéticas da irradiação solar diária, que reproduzam as principais características estatísticas das séries históricas, viabiliza a simulação e a avaliação de desempenho dos sistemas solares submetidos a regime de longo prazo.

5. Realizar uma comprovação experimental do programa desenvolvido, através da simulação de uma instalação real, comparando valores gerados pelo programa contra valores medidos em campo.

6. Incluir neste programa um módulo para o dimensionamento da bomba.

7. Realizar simulações com arranjo de coletores em série, situação observada em muitas instalações, que vem sendo utilizada para facilitar o balanço hidráulico e ajustar as vazões do sistema dentro da faixa adequada ao melhor desempenho dos coletores solares. Quando o nível de temperatura desejado para a água de consumo cresce, a associação de coletores em série pode se tornar obrigatória.

7. Bibliografia

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.eletronbras.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://bhgzgreensrv02.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> 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.
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.
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^o.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.