

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

## **COLETOR SOLAR PLANO**

Projeto e construção de um sistema de aquecimento de água  
residencial utilizando um coletor solar plano.

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Graduação em  
Engenharia.

Edson Okumura Yokoyama  
Ricardo Kenji Tanikado

Orientador: Eitaro Yamane



São Paulo  
2002

**“Desafios foram feitos para serem vencidos”**

**Castro Alves 1847-1871**

**“Melhor que ser um politécnico,  
é ser um ex-politécnico”**

**Rui Carlos Botter, professor do PNV**

## AGRADECIMENTOS

Obrigado pai, mãe, guilherme, flávios, mariani, Karina, Magalicia.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Eitaro Yamane que nos dirigiu a um projeto concreto e de importância para a área de geração de energia.

Ao Prof. Dr. Mariani que nos apoiou durante este trabalho estimulando e cooperando nos diversos problemas encontrados até a conclusão deste trabalho.

Aos nossos familiares e amigos que participaram direta e indiretamente estimulando, participando e estimulando-nos por este longo período.

Obrigado.

Ricardo Kenji Tanikado

À minha família que tanto me apoio durante esses longos anos.

À minha namorada pelo estímulo e imensa compreensão.

Em especial aos professores Eitaro Yamane que ao longo desse ano pode nos proporcionar um aprendizado que jamais será esquecido e ao Prof. Antônio Luis Mariani que durante o tempo em que a gente esteve em contato, pude considera-lo mais que um professor , um verdadeiro amigo.

Ao Rogério técnico do laboratório de Mec-Flu e a todos que participaram direta ou indiretamente na realização de mais uma etapa na vida.

Edson Okumura Yokoyama



## Índice

Lista de Figuras .....	4
Nomenclaturas (Lista de Abreviações) .....	6
1. Introdução .....	7
2. Objetivos .....	8
3. Cronograma .....	9
4. Aspectos Técnicos .....	11
4.1 Histórico .....	11
4.2 Energia Solar .....	11
4.3 Energia Solar no Brasil .....	12
4.4 Fundamentação Teórica .....	14
4.4.1 O Sol .....	14
4.4.2 A Constante Solar .....	17
4.4.3 Emissão do Corpo Negro .....	20
4.4.4 Emissão Radiante (radiativa) pelo Sol .....	26
4.4.5 Radiação Solar Disponível .....	30
4.4.6 Instrumentos para Medição de Radiação Solar .....	30
4.4.7 Medidas da Duração da Luz Solar .....	32
5. Características de Radiação de Materiais Opacos .....	33
5.1 Superfícies Seletivas .....	33
5.2 Mecanismos de Seletividade .....	35



5.3 Propriedades Ótimas .....	36
6. Transmissão de Radiação Através do Vidro; Radiação Absorvida ...	38
6.1 Reflexão da Radiação .....	38
6.2 Absorção pelo vidro .....	40
6.3 Propriedades Ópticas de Coberturas de Coletores .....	41
6.4 Transmissividade para Radiação Difusa .....	43
6.5 Produto Transmissividade- Absorvidade .....	44
6.6 Radiação Solar Absorvida .....	44
7. Coletores Solares .....	49
7.1 Coletores de Baixa Concentração .....	49
7.2 Geometria dos Coletores .....	50
7.3 Montagem dos Coletores .....	57
7.4 Tipos de Instalação .....	61
7.5 Reservatório de Alimentação do Sistema de Aquecimento .....	65
7.6 Ângulo de Inclinação do Coletor .....	67
7.7 Eficiência do Coletor .....	67
7.8 Dimensões do Coletor em Função do Número de Pessoas .....	68
7.9 Coletores Econômicos .....	69
7.10 Considerações sobre o vidro e outros materiais .....	70
7.11 Resumo dos Materiais Normalmente Empregados na Construção dos Coletores .....	71
7.12 Balanço Térmico .....	71
7.13 Eficiência Térmica do Coletor .....	73
7.14 Temperatura da Água na Saída do Coletor .....	75



8. Nosso Coletor .....	78
8.1 Definição do Projeto .....	78
8.2 Materiais para Construção .....	81
8.3 Processos de Construção .....	83
8.4 Problema Encontrado .....	87
8.5 Soluções Possíveis .....	88
8.6 Solução Adotada .....	88
9. Dados Coletados .....	89
10. Conclusão .....	92
11. Referências Bibliográficas .....	93



## Lista de Figuras

Figura 4.1	Modelo simplificado do Sol	pg.16
Figura 4.2	A Estrutura do Sol	pg.17
Figura 4.3	Relação Sol-Terra	pg.18
Figura 4.4	Espectro Eletromagnético	pg.20
Figura 4.5	Espectro de um corpo negro, cinzento e real a $T=6000K$	pg.24
Figura 4.6	Espectro de emissão térmica a diferentes temperatura	pg.27
Figura 4.7	Distribuição espectral de fluxo emitido a partir da superfície solar	pg.27
Figura 4.8	Piroheliômetro Eppley de Incidência Normal	pg.30
Figura 4.9	Piranômetro Eppley Black and White	pg.31
Figura 4.10	Piranômetro Eppley Precision Spectral	pg.31
Figura 4.11	Piranômetro Eppley com anel de escurecimento para eliminação de radiação direta	pg.32
Figura 5.1	Uma superfície seletiva hipotética com um comprimento de onda de corte de $3\mu m$ .	pg.32
Figura 5.3	Característica do material em função da emissividade/absorvidade	pg.37
Figura 6.1	Ângulos de incidência e refração com índices de refração	pg.38
Figura 6.2	Transmissividade de 1,2,3 e 4 coberturas para três tipos de vidros	pg.46
Figura 6.3	ângulo de incidência efetivo da radiação difusa e radiação terrestre em superfícies inclinadas	pg.47
Figura 6.4	Curvas típicas de $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ para 1 a 4 coberturas.	pg.48
Figura 7.1	Esquemas de construção	pg.52
Figura 7.2	Tanque de estocagem	pg.56
Figura 7.3	Esquema de uma montagem de coletores em paralelo	pg.58
Figura 7.4	Montagem em série	pg.59
Figura 7.5	Montagem série-paralelo	pg.60
Figura 7.6	Circulação natural em circuito aberto	pg.63



Figura 7.7	Circulação natural em circuito fechado	pg.63
Figura 7.8	Circulação forçada em circuito aberto	pg.64
Figura 7.9	Circulação forçada em circuito fechado	pg.64
Figura 7.10	Sistema Misto com Aporte Elétrico	pg.65
Figura 7.11	Alimentação direta da caixa de água fria	pg.66
Figura 7.12	Alimentação direta e tubo de equilíbrio	pg.66
Figura 7.13	Gráfico – Eficiência do Coletor	pg.68
Figura 8.1	Detalhe interno: Intensificadores de troca de calor	pg.82
Figura 8.2	União das placas e Abraçadeira	pg.83
Figura 8.3	Detalhes de montagem: conector redutor de tubulação	pg.83
Figura 8.4	Suporte do coletor – indicação da inclinação	pg.84
Figura 8.5	Detalhamento de Vedação – Borracha Selante e Solda com Estanho	pg.85
Figura 8.6	Isolamento Térmico – lã de vidro	pg.85
Figura 8.7	Fase final de montagem – pintura	pg.86
Figura 8.8	Coletor solar de placas planas	pg.86
Figura 8.9	Aparelhos de medição e software de aquisição de dados	pg.87
Figura 8.10	Momento da ruptura da placa de cobre	pg.87
Figura 8.11	Coletor após reforma – detalhe novas abraçadeiras e nervura	pg.88





### Nomenclatura:

$G_{sc}$	constante solar	$T_{\odot}$	temperatura na superfície do sol
$G_{sc,\lambda}$	constante solar espectral	$R_{\odot}$	raio do sol
$\lambda$	comprimento de onda	$P_{\odot}$	força radiante total emitida pelo sol
$\nu$	Frequência	$\Delta\theta$	divergência angular
$F_{\lambda}^{(i)}$	fluxo espectral incidente	L	Longitude
$F_{\lambda}^{(a)}$	fluxo espectral absorvido	$E_h$	Energia de Emissão da Onda
$F_{\lambda}^{(r)}$	fluxo espectral refletido	$b$	Coefficiente Empírico
F	fluxo total	$\Delta\omega_i$	Ângulo Sólido
$a_{\lambda}$	Absorvidade espectral	q	Energia da Radiação
$r_{\lambda}$	Refletividade espectral	$\Delta f_i$	Incremento de Energia
$\epsilon_{\lambda}$	Emissividade espectral /emissividade monocromática		
$\epsilon$	Emissividade total		
$W_{B,\lambda}(T)$	Potência emissiva monocromática de um corpo negro		
$W_B(T)$	Potência emissiva de corpo negro		
$W(T)$	Potência emissiva de corpo não negro		
T	Temperatura em Kelvin		
h	Constante de Planck		
$C_0$	Velocidade da luz		
k	Constante de Boltzman		
N	índice de refração		
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman		
$\alpha$	Constante de Stefan-Boltzman		
r	Distância média entre Terra e sol		
$F_{\odot}$	fluxo total que sai da superfície do sol		



## 1. Introdução

Este trabalho contém um estudo teórico da radiação térmica e solar para possibilitar a construção de um SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AGUA POR COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA. Neste trabalho encontra-se também, uma apresentação de *piranômetros* e *piroheliômetros*, aparelhos de medição de radiação solar.

Foi construído um protótipo de um coletor solar plano com o intuito de diminuir custos e busca de novas alternativas de arranjos físicos e materiais de isolamento térmico.

Para realização deste relatório, foram necessários estudos de referências bibliográficas, pesquisas de funcionamento dos aparelhos e estudos de materiais alternativos.



## 2. Objetivos

O objetivo do trabalho foi dimensionar e construir de um protótipo de um sistema de aquecimento de água por coletor solar de placa plana de baixo custo, estudar e comparar o seu rendimento devido a diversos fatores como a necessidade do uso de uma placa de vidro ou do uso de material para isolamento térmica.

Para tanto estudou-se mudanças de arranjo físico e de material de isolamento térmica em relação aos coletores solares planos disponíveis no mercado.

Fez-se um detalhamento teórico relativo à radiação, tanto térmica, como solar. Tal estudo é fundamental para a compreensão do funcionamento do sistema de aquecimento de água utilizando-se coletores solares planos.

Estudamos os fenômenos físicos, os tipos de materiais empregados, os processos de construção e o desempenho de coletores solares.



### 3. Cronograma

Tabela 1-Cronograma

	<b>Atividade</b>	<b>Período</b>
Estudo de Viabilidade	Fundamentação Teórica	Março/Abril
	Análise específica de coletores solar	Maio
Projeto Básico	Sistema de aquecimento de água por coletor solar plano	Junho
Projeto Executivo	Definição do sistema de aquecimento de água	Julho
Planejamento de Produção	Montagem do sistema	Agosto/Setembro/ Outubro
Planejamento de Utilização	Testes	Novembro

#### 3.1 Estudo de Viabilidade

Nesta fase do projeto serão analisadas possíveis soluções para o problema apresentado. Soluções apresentadas serão analisadas segundo critérios técnicos e financeiros, a fim de se definir uma possível solução.

Sendo este um estudo superficial do projeto, existe a possibilidade de ser necessários ajustes e novos estudos, caso surja algum fator que inviabilize o projeto.

#### 3.2 Projeto Básico

Com a definição da solução, esta será estudada mais a fundo nessa fase do projeto. Ao final desta, espera-se ter uma documentação bem completa sobre as características principais do projeto, a fim de viabiliza-lo.



### **3.3 Projeto Executivo**

Toda informação obtida nas fases anteriores será utilizada para a execução do projeto propriamente dito. Faz-se a especificação de todo o projeto através de documentação técnica (relatórios e desenhos).

### **3.4 Planejamento da Produção**

Com o projeto definido, o foco principal estará voltado para a fabricação e montagem de todo o sistema de aquecimento de água.

Ao final desta fase, espera-se que o sistema todo esteja funcional para início da última fase.

### **3.5 Planejamento da Utilização**

É a última fase do projeto. Durante esta, espera-se fazer devidos testes e possíveis calibrações do sistema. Serão feitas perspectivas de durabilidade e confiabilidade do produto.

### **3.6 Observações a respeito do Cronograma**

Este cronograma tem como finalidade auxiliar o projeto, organizando sua evolução. Durante o desenvolvimento do trabalho, ele poderá ser alterado sempre que necessário, sem perdas para o projeto final.



## 4. Aspectos Técnicos

### 4.1 Histórico

“A energia solar poderia prover para o Brasil uma poupança de energia elétrica e de gás de nafta equivalente a 9,3 milhões de MWh, o que corresponde a cerca de 5% da energia atualmente consumida, por ano, nessas duas formas energéticas”.

Imagina-se que até 1990 a energia solar já poderia ter uma participação significativa no aquecimento doméstico de água e em alguns processos industriais que empregam intensivamente calor a baixas temperaturas (indústria têxtil e indústria de alimentos, por exemplo). Para tanto, seria necessária uma área total de coletores da ordem de 15 milhões de coletores do tipo doméstico. Assim, cerca de 10% dos domicílios em 1990 estariam providos com aquecimento solar.

Para realizar essa transformação, seria preciso investir US\$ 1 bilhão, ao preço médio de US\$ 250 por aparelho. (...) A maior dificuldade para a difusão dos coletores domésticos é ainda o custo: o tempo de retorno do investimento está calculado atualmente em dez ou quinze anos, prazo longo demais para que o consumidor se sinta estimulado.” (Vieira, CESP, 1978, p. 56).

Pelo texto, nota-se que a preocupação na utilização de energia solar já vem de longa data. Em 1978, imaginou-se que, ao final de um pouco mais de 10 anos seria possível instalar coletores solares em cerca de 10% dos domicílios no país. Ledo engano; hoje, começo do século XXI, existem menos de 500 mil coletores solares, sendo que quase na totalidade voltados para o uso doméstico, a um preço médio de R\$1400,00 o sistema completo (dados do Engenheiro doutorando Laerte Bernardes Arruda, PCC-EPUSP).

### 4.2 Energia Solar

A energia solar é a fonte permanente de energia mais abundante do mundo. A quantidade de energia solar interceptada pela Terra é da ordem de



170 trilhões de KW, uma quantidade 5000 vezes maior que a soma de todas as outras formas de energias naturais (nuclear terrestre, geotérmica, e energia gravitacional e energia gravitacional lunar). Desse total, cerca de 30% é refletida para o espaço, 47% é convertida em calor de baixa temperatura e re-radiada para o espaço, e 23% alimenta o ciclo de evaporação-precipitação da biosfera; menos de 0,5% é representada em energia cinética de ventos e ondas e no armazenamento fotossintético das plantas. A quantidade de energia solar interceptada pela Terra é somente uma ínfima fração (da ordem de 1 por milionésimo) da energia total irradiada em forma de radiação eletromagnética proveniente do processo de fusão nuclear.

Embora seja abundante, a energia solar que colide na atmosfera terrestre é relativamente pequena. Transpassada a atmosfera terrestre, a energia se enfraquece, devido a fenômenos meteorológicos e poluição do ar. A energia solar que chega a superfície terrestre é de duas formas: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é colimada e é capaz de formar sombra; a radiação difusa é dispersa ou refletida pela atmosfera e não é colimada. A proporção de radiação direta para difusa varia com o clima, com a localização e com o horário. A quantidade de radiação direta diminui de acordo com o aumento da poluição do ar.

#### **4.3 Energia Solar no Brasil**

O Brasil é muito privilegiado não só pela sua superfície mas pelo fato de ter grande parte de seu território compreendido entre o Equador e o trópico de



Capricórnio. Esta característica faz com que exista uma certa uniformidade de incidência de energia solar na superfície horizontal ao longo do ano, o que facilita sua captação. Estimando-se a energia incidente numa superfície horizontal, integrando-se ao longo da área do país, pode-se estimar que o potencial de utilização de energia solar que pode ser captada numa superfície horizontal, não se considerando a atenuação pela atmosfera, no Brasil é da ordem de  $29 \cdot 10^{15}$  kWh por ano. A eficiência de utilização da energia solar incidente é menor para diferenças maiores de temperatura entre fluido aquecido e a temperatura ambiente, para a mesma radiação incidente. Então, pode-se esperar que em regiões tropicais os sistemas de utilização de energia solar operem mais eficientemente.

Nas diversas capitais brasileiras, observa-se que quanto maior a temperatura média ao longo do ano, maior a radiação solar incidente ao longo do ano. Este fato sugere que a água quente possa ser produzida a um custo mais baixo nestes lugares. Entretanto, como a utilização de água quente não é muito grande em lugares quentes, esta aparente vantagem é compensada pela falta de mercado para esta aplicação. Em lugares frios o inverso se verifica.





## 4.4 Fundamentação Teórica

### 4.4.1 O SOL (o sol modelado)

O sol é a mais antiga forma de energia disponível na Terra. Isto inclui a energia na forma de calor diretamente, assim como energias eólicas, hidroelétricas e de combustíveis de origem fóssil. Os combustíveis fósseis existem hoje como consequência da fotossíntese, processo do qual, plantas convertem energia solar em energia química. Um estudo completo da tecnologia da energia solar só é possível com uma perfeita análise da radiação solar.

O sol, a estrela mais próxima da Terra, emite energia para manter a temperatura no planeta e produzir uma atração gravitacional necessária para manter o planeta em uma órbita circular próxima. O sol tem massa de  $M_{\odot} = 1.99 * 10^{30}$  kg ( $\approx 3.3 * 10^5$  a massa da Terra) e raio de  $R_{\odot} = 6.96 * 10^8$  m ( $\approx 109$  o raio da Terra). A distância entre a Terra e o sol varia entre 1.0167 AU (aphelion  $\sim$  4 de julho) até 0.983 AU (perilion  $\sim$  4 de janeiro) e tem em média um valor de 1 AU (1 AU = astronomical unit  $\approx 1.5 * 10^{11}$ m).

O interior do sol é inacessível para nós para uma experimentação direta. Entretanto, baseado em observações da superfície solar e em considerações teóricas, acredita-se que a temperatura em seu interior é de cerca de 15 milhões K. A composição química do sol é de principalmente hidrogênio com uma pequena parte de hélio. Estes dois elementos, que representam cerca de 96 a 99 % da massa do sol, estão sobre uma enorme pressão e somente a enorme força de atração gravitacional do sol, mantém esta massa reunida. Energia é gerada no interior do sol através de reações de fusão nuclear de hidrogênio. Esta



energia percorre o caminho do núcleo para a superfície e é emitida para o espaço principalmente na forma de radiação eletromagnética. A superfície do sol, a fotosfera, é atualmente a região de transição em que a densidade cai rapidamente. Como nosso estudo se move do interior do sol para a parte mais de fora da fotosfera, passamos de um espectro opaco escuro médio para um relativamente claro/transparente. Além disso, a temperatura cai para aproximadamente 6000K. Acima da fotosfera está a atmosfera solar, chamada de cromosfera, porque ela absorve certas cores de radiação emitida pela fotosfera. Como ela é relativamente clara, nós ignoraremos seus efeitos na emissão de radiação solar.

Grande parte da radiação que nos atinge emana da fotosfera, cujo espectro solar é determinado através de propriedades óticas e térmicas da superfície solar. O simples modelo usado aqui assume que o sol comporta-se como um corpo negro cuja superfície se mantém a uma temperatura de aproximadamente entre 5000 a 6000K. Essa temperatura de superfície conserva-se constante como uma fonte de energia localizada no seu interior. Devido a essa elevada temperatura, o brilho da superfície e a radiação eletromagnética são emitidas em toda as direções do espaço.

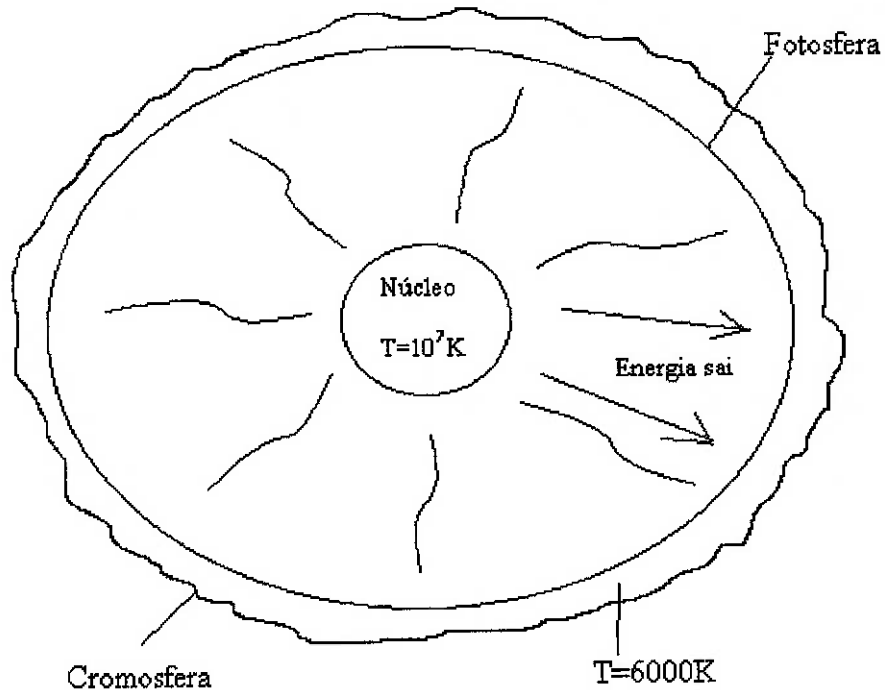


Figura 4.1 Modelo simplificado do Sol

Um esquema da estrutura do Sol é mostrada na fig. 4.2. Estima-se que 90% da energia gerada encontra-se na região de  $0,0$  a  $0,23 R$  (onde  $R$  é o raio do Sol) que contém 40% da massa do Sol. À distância de  $0,7 R$  a temperatura cai para aproximadamente  $130.000 K$  e a densidade para  $70 \text{ kg/m}^3$ . Entre  $0,7$  e  $1,0 R$ , o processo de convecção se torna importante a ponto da região ser conhecida como Zona Convectiva. Nela a temperatura cai para aproximadamente  $6.000 K$  e a densidade por volta de  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$ .

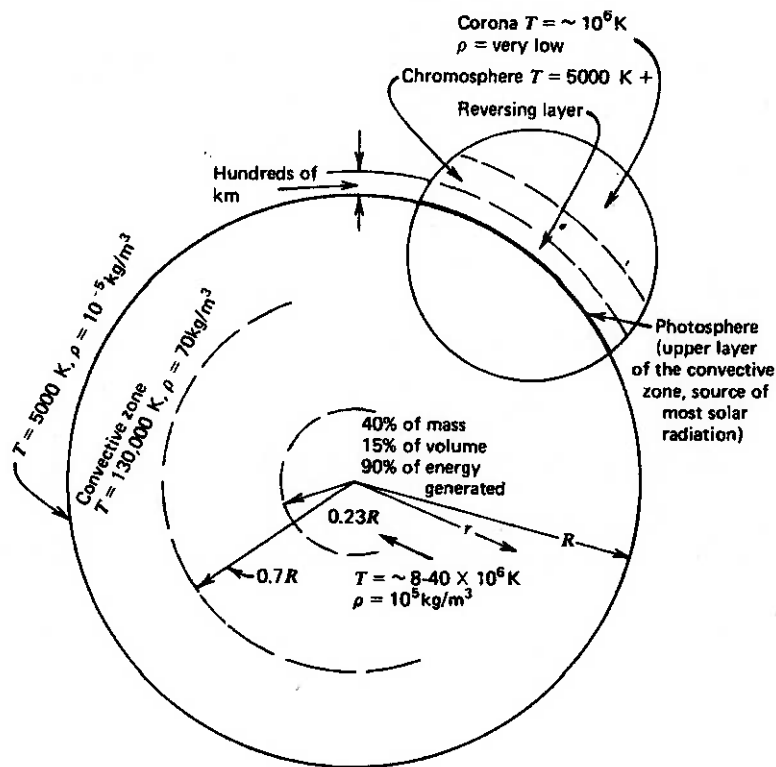


Figura 4.2 A Estrutura do Sol

A camada mais importante do Sol é a fotosfera onde os gases que ela é composta são extremamente ionizados e dispostos a absorver e emitir espectro contínuo de radiação.

A fotosfera é a fonte da maior parte da radiação solar.

#### 4.4.2 A Constante Solar

A fig. 4.3 mostra esquematicamente a geometria da relação Sol-Terra. Devido à excentricidade da órbita da Terra, a distância varia 1,7%. Tomando  $1,495 \cdot 10^{11}$  m como a distância média, o Sol subtende um ângulo de 32 minutos a um ponto da Terra.

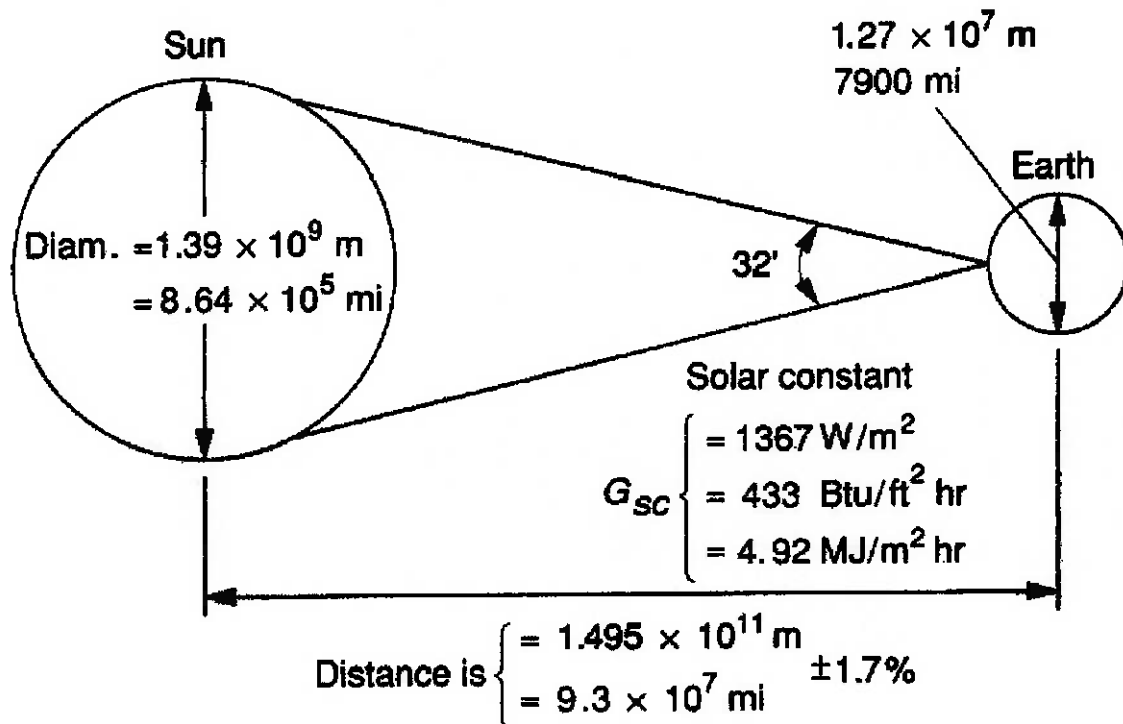


Figura 4.3 Relação Sol-Terra

A radiação emitida pelo Sol e a relação Sol-Terra resultam em uma intensidade aproximadamente fixa através da atmosfera terrestre. A constante solar,  $G_{sc}$ , é a energia do Sol por unidade de área da seção perpendicular à direção de propagação da radiação pela distância média entre o Sol e a Terra desconsiderando os efeitos da atmosfera.

Existem diversos valores para a constante solar. Neste trabalho, adotaremos o valor de:

$$G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$$

que é um valor com variação de  $\pm 1\%$  devido a erros de leitura e tomada de dados.



#### 4.4.3 Emissão do Corpo Negro:

Radiação eletromagnética é a transmissão de energia na forma de ondas, contendo um componente elétrico e outro magnético, por ser produzida pela aceleração de uma carga elétrica em um campo magnético. Cada onda é caracterizada por um comprimento de onda  $\lambda$  e uma frequência  $\nu$ . No espaço livre todas as ondas viajam na mesma velocidade,  $c_0 = 2.9979 \cdot 10^8 \text{m/s}$ . A frequência, comprimento de onda e velocidade de cada onda é relacionada por:

$$\nu\lambda=c_0$$

A maior frequência é a de menor comprimento de onda e vice-versa. Todo espectro eletromagnético é mostrado na fig 4.5 . Somente uma estreita banda de comprimento de ondas,  $0.4\mu\text{m} < \lambda < 0.7\mu\text{m}$ , são visíveis ao olho humano. Aqueles comprimentos de onda cujo limite da visibilidade está situado na extremidade violeta ( $\lambda < 0.4\mu\text{m}$ ) são chamados de ultravioletas e são invisíveis; aqueles na extremidade vermelha ( $\lambda > 0.7\mu\text{m}$ ) são os infravermelhos que também são invisíveis ao olho humano. Como aproximadamente metade da radiação solar é infravermelha, a visibilidade dos componentes da radiação solar é de menos de 40 % da energia solar total irradiada.

Quando a radiação eletromagnética é incidida na superfície de um corpo, este pode transmitir, refletir ou absorver. Se o corpo for opaco não é possível transmitir a radiação. A energia radiante por unidade de tempo e comprimento de onda incidente sobre a superfície é chamada de fluxo espectral incidente,  $F_\lambda^{(i)}$ . Da mesma forma, os fluxos espectrais absorvido e refletido são chamados  $F_\lambda^{(a)}$  e  $F_\lambda^{(r)}$  respectivamente. O subscrito  $\lambda$  indica que estamos trabalhando com um componente do comprimento de onda. O fluxo total na distribuição é:



$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda$$

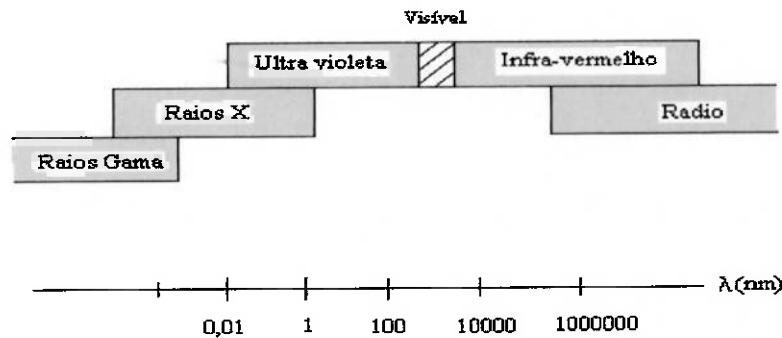


Figura 4.4 - Espectro Eletromagnético

O espectro da radiação térmica é a energia emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas por qualquer corpo aquecido a uma dada temperatura.

Definimos a absorvidade espectral  $a_{\lambda}$  e a refletividade espectral  $r_{\lambda}$  da superfície do corpo por:

$$a_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}^{(a)}}{F_{\lambda}^{(i)}} \quad \text{e} \quad r_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}^{(r)}}{F_{\lambda}^{(i)}} \quad (4.1)$$

Quando o corpo é opaco, o que não é refletido da superfície precisa ser absorvido, então podemos escrever:

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} = 1 \quad (4.2)$$

Realmente,  $a_{\lambda}$  e  $r_{\lambda}$ , para superfícies reais, dependem do comprimento de onda do fluxo incidente e da direção de incidência da radiação. Por exemplo, muitas superfícies absorvem radiação bem quando incididas normalmente, mas não absorvem eficientemente quando a radiação é incidida em ângulos oblíquos,



é o chamado efeito direcional. Não levaremos em conta esta dependência da direção de incidência e assumiremos que a superfície é um absorvedor isotrópico. Entretanto, a refletividade e a absorvidade espectrais variam consideravelmente de acordo com o comprimento de onda do fluxo radiante incidente. Muitos pigmentos podem aparecer brancos para o olho, porque eles refletem bem no espectro visível mas podem ser excelentes absorvedores de radiação infravermelha.

Isto pode ser útil para definir as seguintes idealizações de superfícies reais:

-*Corpo Negro*: qualquer corpo cuja superfície absorve todos componentes radiação eletromagnética incidente, independentemente do comprimento de onda ou direção de incidência. Temos:

$$a_{\lambda} = 1 \quad (r_{\lambda} = 0) \text{ para todo } \lambda$$

-*Corpo Cinzento*: qualquer corpo cuja absorvidade está entre a do corpo negro e a do corpo branco, para qualquer comprimento de onda e direção de incidência da radiação. Para esses corpos, temos:

$$a_{\lambda} = a \quad (\text{para todo } \lambda) \text{ onde } 0 < a < 1$$

Não existem superfícies reais perfeitamente negras. Para radiação solar, corpo negro tem, em média, uma absorvidade de  $a = 0,97$ . Prata polida, cuja maior refletividade tem  $a = 0,07$ .

É um fato experimental da natureza que quando qualquer corpo se mantém a uma temperatura constante, sua superfície emite radiação





eletromagnética característica chamada de radiação térmica. Esta radiação é geralmente emitida em todas as direções e contém todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. O fluxo térmico emitido pelo corpo depende das suas características superficiais e também de sua temperatura. Para superfícies absorvedoras isotrópicas, o fluxo térmico é isotrópico e sua distribuição espectral é dada por:

$$F_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} W_{B,\lambda}(T), \quad (4.3a)$$

onde  $\epsilon_{\lambda}$  é uma característica da superfície chamada de emissividade espectral e  $W_{B,\lambda}(T)$  é chamado de potência emissiva monocromática de um corpo negro. Esta função universal de  $\lambda$  e  $T$  é dada pela *Função de Planck*:

$$W_{B,\lambda}(T) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc_0}{n\lambda kT} - 1\right) \right)}, \quad (4.3b)$$

onde as constante da função são:

$$h(\text{constante de Planck}) = 6,6252 * 10^{-16} \text{ J-s}$$

$$c_0(\text{velocidade da luz}) = 2,9979 * 10^8 \text{ m/s}$$

$$k(\text{constante de Boltzman}) = 1,3806 * 10^{-23} \text{ J/K}$$

O fluxo total radiante emitido pela superfície é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann

$$W_B(T) = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} W_{B,\lambda}(T) d\lambda = n^2 \sigma T^4 \quad (4.4)$$



onde  $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c_0^2 h^3} = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ N/cm}^2 \text{ K}^4$

A emissividade espectral de uma superfície isotrópica, é igual a sua absorvidade espectral ou

$$\epsilon_{\lambda} = a_{\lambda} \quad (\text{Lei de Kirchhoff}) \quad (4.5)$$

Segue-se da equação anterior, que o corpo negro ( $a_{\lambda} = 1$ ) é o mais eficiente radiador com  $\epsilon_{\lambda} = 1$  para todos comprimentos de onda. Então para o corpo negro a equação 4.3a fica:

$$F_{\lambda, CN} = W_{B, \lambda}(T),$$

esta função que descreve o fluxo espectral emitido por uma superfície negra a uma temperatura T, é a função de Planck. Já um corpo branco ( $\alpha = \epsilon = 0$ ), não emite radiação térmica; e para um corpo cinzento, emite radiação de acordo com:

$$F_{\lambda, CC} = \epsilon W_{B, \lambda}(T) \quad (0 < \epsilon < 1) \quad (4.6)$$

A emissão espectral de corpos negro, cinzento e real a T=6000K está mostrada na figura 4.5.

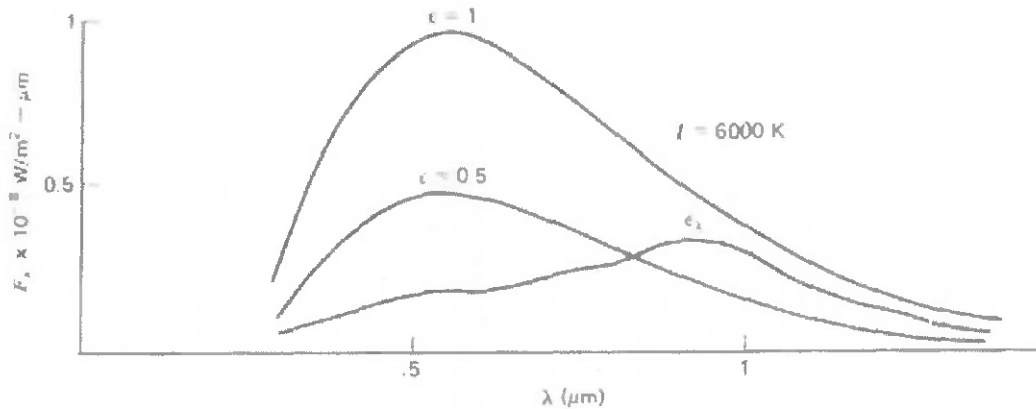


Figura 4.5 Espectro de um corpo negro, cinzento e real a  $T=6000\text{K}$  onde  $\epsilon_\lambda$  representa um corpo real.

Note que a função espectral de um corpo negro é igual a função de Planck, enquanto que a função espectral de um corpo cinzento tem o mesmo formato mas com um fator de redução  $\epsilon$ .

A figura 4.6 mostra a função de Planck como função do comprimento de onda para diferentes temperaturas. Cada curva tem área finita abaixo dela e cada uma tem um comprimento de onda máximo,  $\lambda_{\max}$ , que resulta em um  $W_{B,\lambda}$  máximo. Pode-se mostrar que a seguinte propriedade matemática de  $W_{B,\lambda}$  é válida:

$$\lambda_{W(B,\lambda)\max} \cdot T = \alpha \text{ (cte)} \quad (4.7a)$$

e

$$\int_0^{\infty} W_{B,\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{(Lei de Stefan-Boltzmann)} \quad (4.7b)$$

onde  $\alpha$  e  $\sigma$  são constantes universais:



$$\alpha = 2898 \mu m K$$
$$\sigma = \frac{5,6696 * 10^{-8} N}{m^2 * K^4} \quad (\text{constantes de Stefan-Boltzmann})$$

Nota-se que o comprimento de onda de cada  $W_{B,\lambda}$  varia inversamente com a temperatura T; e que a área total abaixo de  $W_{B,\lambda}$  e conseqüente fluxo térmico total emitido por um corpo negro é proporcional a quarta potência da temperatura T.

O  $\lambda_{\max}$  de uma distribuição de Planck qualquer é freqüentemente dita que representa a “cor” característica, embora não necessariamente a cor detectada pelo olho humano. Apesar disso, o fato de que  $\lambda_{\max}$  decresce com o crescimento de T, explica o porquê um corpo negro fica vermelho forte em uma dada temperatura e fica esbranquiçado quando a temperatura aumenta. A brancura indica a presença de componentes azulados.

O fluxo total emitido por um corpo negro deriva da equação da lei de Stefan-Boltzmann:

$$F_{CN} = W_B(T) = \sigma T^4 = (5,67 * 10^{-8} N / m^2 K^4) T^4 \quad (4.8)$$

A emissão do corpo negro aumenta muito quando aumentamos a temperatura.

Para um corpo cinzento, temos as equações:

$$F_{CC} = \epsilon \sigma T^4 \quad (0 < \epsilon < 1) \quad (4.9)$$

$$\epsilon = \frac{W(T)}{W_B(T)} \quad \text{emissividade total}$$



$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda}(T)}{W_{B,\lambda}(T)} \quad \text{emissividade monocromática}$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{se o corpo for negro } \tau = 0)$$

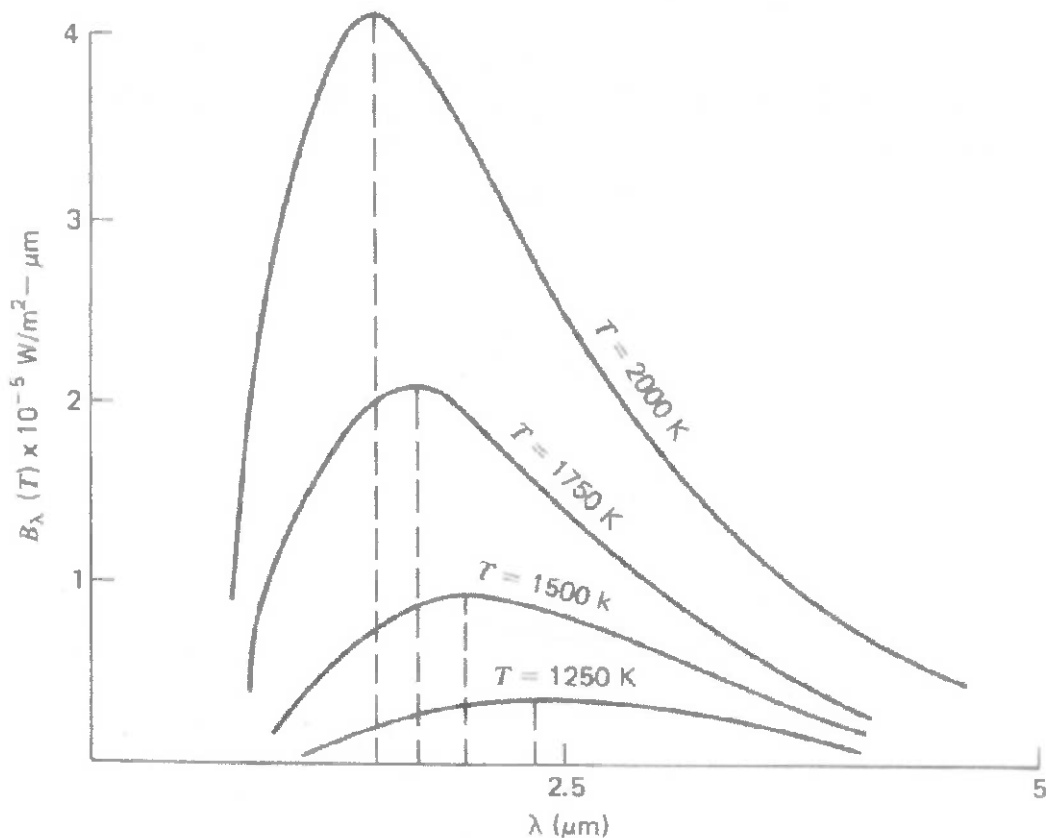


Figura 4.6 Espectro de emissão térmica a diferentes temperaturas. As linhas tracejadas mostram os valores de  $\lambda_{\max}$

#### 4.4.4 Emissão Radiante (radiativa) pelo Sol

Tomando o modelo do sol como um corpo negro de temperatura constante,  $T$ , então o fluxo radiante emitido pela superfície pode ser representado pela distribuição de Planck. A distribuição espectral observada do sol difere levemente da  $W_{B,\lambda}$  porque o sol não está em equilíbrio e nem em



estado constante. Apesar de tudo, uma boa aproximação do espectro solar é uma curva de corpo negro correspondendo a uma temperatura  $T \approx 5800K$ , como pode ser observado na figura 4.7.

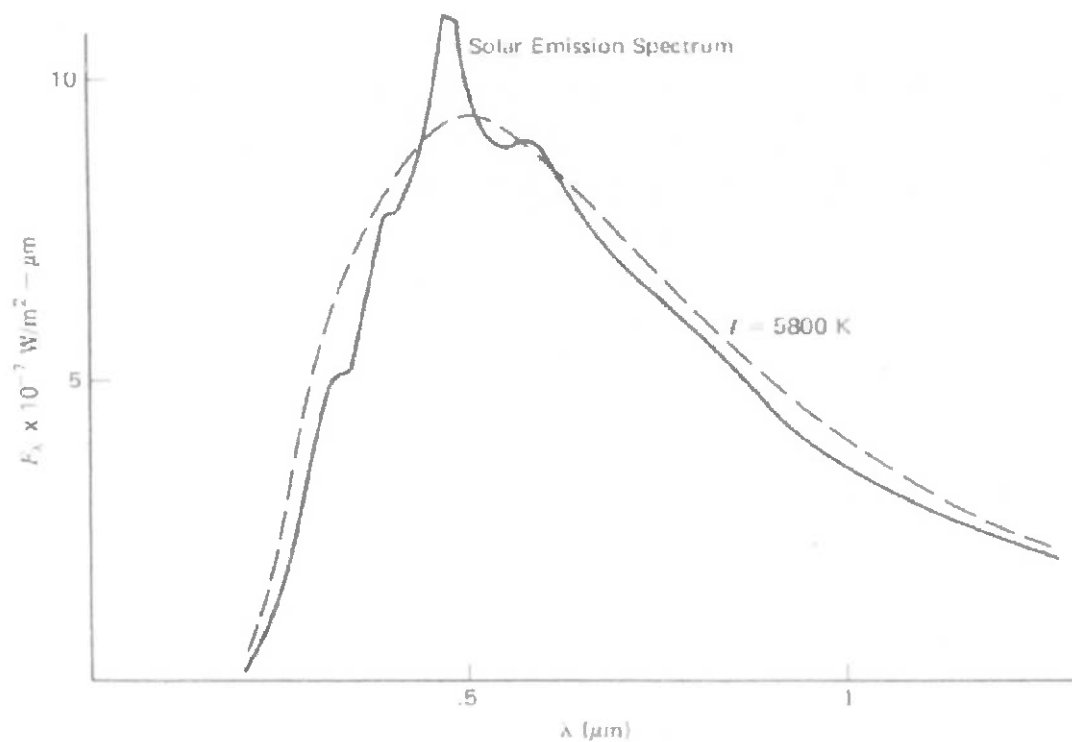


Figura 4.7 Distribuição espectral de fluxo emitido a partir da superfície solar. A linha tracejada é a emissão de um corpo negro a  $T = 5800K$

Pode-se calcular o comprimento de onda característico do espectro solar:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 * 10^3 \mu m * K}{5800K} = 500nm = 0,500 \mu m ,$$

que corresponde à luz verde. O fluxo total que sai da superfície do sol é:



$$F_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 = \frac{5,670 * 10^8 W}{m^2 * K^4} (5800K)^4 = 6,416 * 10^7 W / m^2$$

Esta radiação é difusa (viaja em todas as direções) quando sai da superfície solar. A força radiante total emitida pelo sol é obtida multiplicando-se o fluxo acima pela área superficial do sol:

$$\begin{aligned} P_{\odot} &= F_{\odot} 4\pi R_{\odot}^2 \\ P_{\odot} &\cong (6,42 * 10^7 W / m^2) 4\pi (6,96 * 10^8 m)^2 \\ P_{\odot} &\cong 3,91 * 10^{26} W \end{aligned}$$

Se o sol emite radiação isotropicamente, esta enorme energia, chamada de luminosidade por astrônomos, é emitida igualmente em todas as direções do espaço. Como a distância do sol aumenta, esta força espalha-se em superfícies esféricas de área crescente. Conseqüentemente, a intensidade varia inversamente com o quadrado da distância do centro do sol. Para uma distância  $r$ , a área superficial é de  $4\pi r^2$  e o fluxo radiante que atravessa esta superfície é:

$$\begin{aligned} F &= \frac{P_{\odot}}{4\pi r^2} = \frac{4\pi R_{\odot}^2 F_{\odot}}{4\pi r^2} \\ \text{ou} \quad F &= \frac{R_{\odot}^2 F_{\odot}}{r^2} \cong \frac{3,11 * 10^{25}}{r^2} W / m^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Isto porque a distância da Terra ao sol varia ao longo do ano, e o fluxo total que chega à Terra também varia. Para uma distância entre Terra e sol média de  $r=1,5 * 10^{11} m$ , o fluxo será:

$$F \cong \frac{3,11 * 10^{25}}{(1,50 * 10^{11})^2} = 1382 W / m^2 \quad (4.11)$$



O valor do fluxo é chamado de *constante solar*, que como já mencionado, não é exatamente uma constante, mas varia com a estação e um pouco com a atividade solar. Note também, que para o valor encontrado para o fluxo assumiu-se que o espectro solar é o espectro de um corpo negro a ~5800K. Se alterarmos essa temperatura para 5762K, a constante solar cairá para ~1352 W/m<sup>2</sup>. O valor da constante solar foi medida por diversos pesquisadores numa faixa entre 1350 a 1382 W/m<sup>2</sup>. A discrepância chega a aproximadamente 2 por cento. Arbitraremos que a constante solar vale 1367 W/m<sup>2</sup> e a temperatura do espectro é de ~6000K.

A equação 4.10 também é válida para a distribuição espectral e podemos escrever:

$$\begin{aligned} G_{SC,\lambda} &= \frac{R_{\odot}^2}{r^2} F_{\odot\lambda} = \frac{R_{\odot}^2}{r^2} W_{B,\lambda}(6000K) \\ &\cong 2,165 * 10^{-5} W_{B,\lambda}(6000K) (W / m^2) \end{aligned} \quad (4.12)$$

com

$$G_{SC} = \int_0^{\infty} G_{SC,\lambda} d\lambda = 1367 W / m^2$$

Conseqüentemente, a distribuição espectral do fluxo quando chega ao topo da atmosfera terrestre é, essencialmente, a mesma emitida pelo sol. Entretanto, cada componente espectral pode ser atenuada igualmente durante trânsito.





#### 4.4.5 Radiação Solar Disponível

Neste tópico serão descritos instrumentos para medição de radiação solar, os dados da radiação solar e os cálculos de informações necessárias dos dados.

Dados diários são geralmente disponíveis e a radiação horária pode ser estimada da radiação diária. Pode-se usar a radiação mensal total para alguns cálculos de projeto, porém, como o desempenho do processo geralmente não é linear com a radiação solar, o uso de médias pode levar a sérios erros se as não linearidades não são levadas em conta.

#### 4.4.6 Instrumentos para Medição de Radiação Solar

São de dois tipos:

O **piroheliômetro** é um instrumento que usa um detector colimado para medição de radiação solar e de uma pequena porção do céu atingida pelo Sol (isto é, radiação direta) de incidência normal.



Figura 4.8 Piroheliômetro Eppley de Incidência Normal



O **piranômetro** é um instrumento para a medição da radiação total solar hemisférica (direta + difusa), usualmente em uma superfície horizontal. Se a radiação direta é bloqueada, o instrumento mede a radiação difusa na sombra.

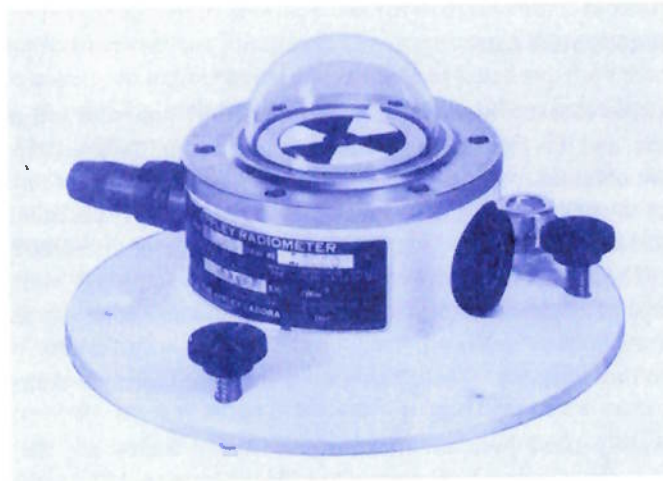
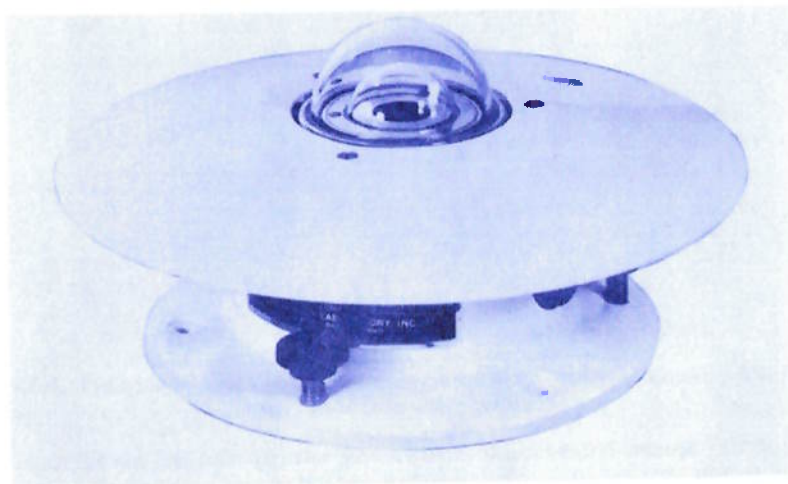


Figura 4.9 Piranômetro Eppley Black and White



Figuras 4.10 Piranômetro Eppley Precision Spectral

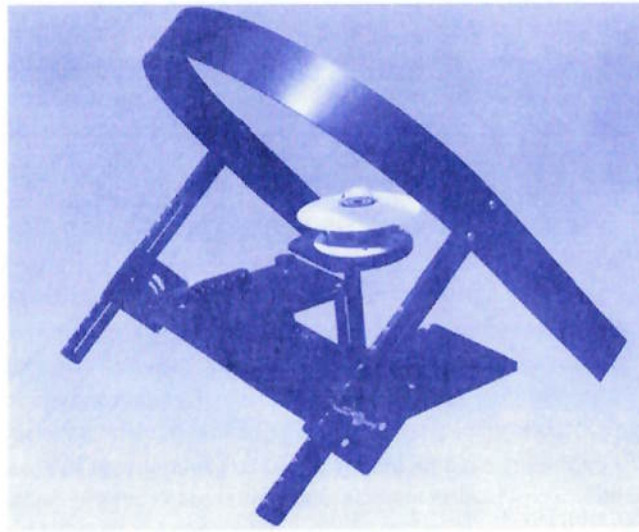


Figura 4.11 Piranômetro Eppley com anel de escurecimento para eliminação de radiação direta

#### 4.4.7 Medidas da Duração da Luz Solar

O tempo de luz solar, que é, o tempo durante o qual a luz do Sol é visível, é usada para estimar a radiação média da radiação solar. Dois instrumentos são muito usados, o registrador de luz solar Campbell-Stokes usa uma esfera de vidro de aproximadamente 10 cm de diâmetro como uma lente que produz uma imagem do Sol na superfície oposta da esfera. Uma tira de papel tratado padronizado é montado ao redor de uma apropriada parte da esfera, e a imagem do Sol queima o papel sempre que a radiação direta está acima de um nível crítico. O comprimento da porção queimada do papel fornece um índice de duração da luz do Sol. Essas medições são incertas em diversas contas: a interpretação do que constitui a porção queimada é incerta, o instrumento não responde a baixos níveis de radiação no começo e fim do dia, e a condição do papel depende da sua umidade.

O registrador fotoelétrico de luz solar incorpora duas células fotoelétricas de selênio, uma das quais é obscurecida da radiação direta e a



outra é exposta. Na ausência de radiação direta, os dois detectores indicam (aproximadamente) o mesmo nível de radiação. Quando a radiação direta incide no disco exposto, a saída desta célula é maior do que a do obscurecido. A duração da diferença de radiação crítica detectada pelas duas células é uma medida da duração da luz do Sol.

## **5. Características de Radiação de Materiais Opacos**

### **5.1 Superfícies Seletivas**

Coletores solares devem ter alta absorvidade para radiação no espectro da energia solar. Ao mesmo tempo, eles perdem energia por uma combinação de mecanismos incluindo radiação térmica das superfícies absorvedoras, e é desejável ter a mais baixa possível perda por emissividade de longo comprimento de onda. A temperatura destas superfícies é menor que 200 °C (473K), enquanto a temperatura efetiva da superfície do Sol é aproximadamente 6000 K. Assim, a faixa do comprimento de onda da radiação emitida só sobrepõe ligeiramente o espectro solar. Dado essas circunstâncias, é possível criar uma superfície com alta absorvidade solar e baixa emissividade de longo comprimento de onda, que são, as superfícies seletivas.

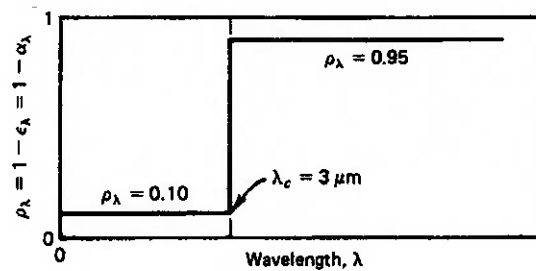


Figura 5.1 Uma superfície seletiva hipotética com um comprimento de onda de corte de  $3\mu\text{m}$ .

O conceito de superfície seletiva está ilustrado na Figura 5.1. Essa superfície idealizada é chamada de uma superfície semi-cinzenta, pois pode ser considerada cinzenta no espectro solar (i.e., em comprimentos de onda menores do que aproximadamente  $3\mu\text{m}$ ) e também cinzenta, mas com propriedades diferentes, no espectro infravermelho (i.e., em comprimentos de onda maiores do que aproximadamente  $3\mu\text{m}$ ). Para esta superfície idealizada, a refletividade abaixo desse nível de comprimento de onda é muito baixo. Para uma superfície opaca  $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ , então nesta faixa  $\alpha_\lambda$  é muito alta. Em comprimentos de onda maiores do que  $\lambda_c$ , a refletividade é quase unitária, e assim  $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ , a emissividade nesta faixa é baixa.

A absorvidade da energia solar e a refletividade da radiação de longo comprimento de onda são determinados de dados da refletividade monocromática pela integração sobre uma faixa espectral apropriada. Para uma operação normal de coletores solares planos, as temperaturas serão sempre baixas o suficiente nas quais essencialmente todas as energias irão emitir comprimentos de onda maiores do que  $3\mu\text{m}$ .



## 5.2 Mecanismos de Seletividade

Muitos métodos de preparação de superfícies seletivas tem sido desenvolvidos com base nos vários mecanismos ou combinações de mecanismos para alcançar a seletividade.

Coberturas que tem alta absorvidade para radiação solar e alta transmissividade para radiação de pequeno comprimento de onda podem ser aplicados em substratos com baixa emissividade. A cobertura absorve energia solar e o substrato diminui a emissão de radiação de radiação de longo comprimento de onda. As coberturas podem ser homogêneas ou ter estrutura particular, suas propriedades são então, as propriedades inerentes ópticas de qualquer material de cobertura ou de propriedades do material e da estrutura da cobertura. Muitas das coberturas usadas são de metal-óxido e os substratos são metais. Exemplos são os óxidos de cobre em alumínio e óxido de cobre em cobre. Uma cobertura de sulfeto de níquel-zinco pode ser aplicada sobre ferro galvanizado.

Superfícies seletivas de cromo preto têm sido amplamente adotadas. O substrato é usualmente uma camada de níquel em uma base de aço ou cobre. As superfícies são formadas por eletrodeposição em um banho em ácido crômico e outros agentes. Em amostras de laboratório, foram obtidas absorvidades de 0.95 a 0.96 e emissividades de 0.08 a 0.14, enquanto as propriedades médias de amostras de linha de produção de coletores planos foram de  $\alpha = 0.94$  e  $\epsilon = 0.08$ . As superfícies apresentam boa durabilidade em exposição a ambientes úmidos.

A absorvidade das coberturas podem aumentar com a adoção de avançados fenômenos de interface. Algumas superfícies usadas em substratos altamente reflexivas são semicondutores que tem alta absorvidade no espectro



da energia solar mas que tem alta transmissividade de ondas de longo comprimento de onda. Muitos desses materiais também tem altos índices de refração e assim refletem a energia solar incidente. Essa perda por reflexão pode ser reduzida com coberturas secundárias anti-reflexivas.

Uma consideração crítica no uso de superfícies seletivas é sua durabilidade. Coletores solares precisam ser projetados para operar essencialmente sem manutenção por muitos anos, e as coberturas e os substratos precisam manter suas propriedades em atmosferas úmidas, oxidantes e em elevadas temperaturas. Experiências mostraram que coberturas de cromo preto em outros tipos de aplicações e óxido de cobre em cobre ou em cromo preto podem ser duráveis.

### 5.3 Propriedades Ótimas

Em coletores de placa plana, é geralmente mais crítico ter alta absorvidade do que baixa emissividade. É a característica de muitas superfícies que existem em relações entre  $\alpha$  e  $\varepsilon$  como mostrados pela Figura 5.3. No caso da superfície de cromo preto, a melhor espessura da camada é óbvia. Numa cobertura de PbS, a massa ótima por unidade de área não é imediata. A melhor combinação precisa ser em função dos efeitos das duas propriedades na operação do sistema de energia solar completo. Mas a generalização pode ser feita para que  $\alpha$  esteja próxima da sua melhor performance.

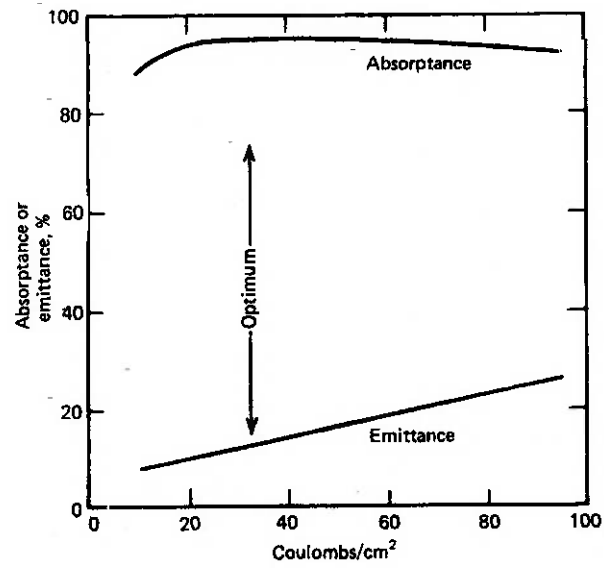


Figura 5.3 Característica do material em função da emissividade/absorvidade





## 6. Transmissão de Radiação Através do Vidro; Radiação Absorvida

A transmissão, reflexão, e absorção de radiação solar pelas várias partes de um coletor solar são importantes na determinação da performance do coletor. A transmissividade, refletividade, e absorvidade são funções da radiação incidente, espessura, índice de refração, e coeficiente de extinção do material. Geralmente os índices de refração  $n$  e os coeficientes de extinção  $K$  do material da cobertura são funções do comprimento de onda da radiação. Entretanto, neste capítulo, todas as propriedades serão inicialmente assumidas como independente do comprimento de onda.

### 6.1 Reflexão da Radiação

Para superfícies translúcidas, Fresnel derivou expressões para a reflexão de radiação não polarizada na passagem do meio 1 com índice de refração  $n_1$  e na passagem do meio 2 com índice de refração  $n_2$  :

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (6.1.1)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (6.1.2)$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (6.1.3)$$

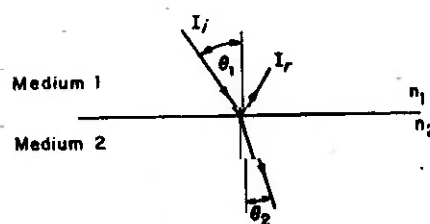


Figura 6.1 Ângulos de incidência e refração com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$



onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de incidência e refração respectivamente como mostrados na Figura 6.1. A Equação 6.1.1 representa a componente perpendicular da radiação não polarizada,  $r_{\perp}$ , e a Equação 6.1.2 representa a componente paralela da radiação não polarizada  $r_{\parallel}$ . (Paralela e perpendicular referem-se ao plano definido pelo feixe incidente e a superfície normal). A Equação 6.1.3 então, dá a reflexão da radiação não polarizada como uma média das duas componentes. Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são relacionados aos índices de refração pela lei de Snell,

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} \quad (6.1.4)$$

Assim, se o ângulo de incidência e os índices de refração forem conhecidos, as Equações 6.1.1 até a 6.1.4 são suficientes para calcular a refletividade da interface.

Para radiação de incidência normal,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  e as Equações 6.1.3 e 6.1.4 podem ser combinadas para dar

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (6.1.5)$$

Se um dos meios é o ar, (i.e., um índice de refração aproximadamente unitário), a Equação 6.1.5 se torna

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (6.1.6)$$

Em aplicações solares, a transmissão de radiação é através de uma parede ou filme de material então, existem duas interfaces por cobertura que causam perdas por reflexão. Na incidência oblíqua, a radiação refletida na interface é



diferente para cada componente de polarização, então a radiação transmitida e a refletida tornam-se particularmente polarizadas. Conseqüentemente, ela é necessário tratar cada componente de polarização separadamente.

Desprezando a absorção no material da cobertura mostrada na Figura 6.1.2 e considerando neste momento que somente a componente perpendicular da polarização da radiação incidente,  $(1-r_{\perp})$  do feixe da radiação incidente alcança a segunda interface. Disto,  $(1-r_{\perp})^2$  passa através da interface e  $r_{\perp}(1-r_{\perp})$  é refletida de volta à primeira, e assim por diante. Somando os termos transmitidos, a transmissividade para a componente perpendicular da polarização é

$$\tau_{\perp} = \frac{(1-r_{\perp})^2}{1-r_{\perp}^2} = \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \quad (6.1.7)$$

Resulta a mesma expansão exatamente quando a componente paralela da polarização é considerada. As componentes  $r_{\perp}$  e  $r_{\parallel}$  não são iguais (exceto na incidência normal), e a transmissividade da radiação inicialmente não polarizada é a transmissividade média das duas componentes.

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right) \quad (6.1.8)$$

onde o subscrito  $r$  é somente para lembrar que significa somente as perdas por reflexão.

## 6.2 Absorção pelo vidro

A absorção da radiação em um meio particularmente transparente é descrito pela lei de Bouguer, que é baseada na suposição da radiação absorvida



ser proporcional à intensidade local do meio e a distância  $x$  que a radiação tem que atravessar no meio:

$$dI = -IKdx \quad (6.2.1)$$

onde  $K$  é a constante de proporcionalidade, o coeficiente de extinção, que é assumido para ser uma constante no espectro solar. Integrando ao longo do comprimento atual no meio (i.e., de zero a  $L/\cos \theta_2$ ) fornece

$$\tau_a = \frac{I_{\text{transmitido}}}{I_{\text{incidente}}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) \quad (6.2.2)$$

onde o subscrito  $a$  lembra que somente a perda por absorção foi considerada. Para vidro, o valor de  $K$  varia de aproximadamente  $4\text{m}^{-1}$  para vidro “água branca” (que aparece branco quando visto na extremidade) a aproximadamente  $32\text{m}^{-1}$  para um vidro pobre (esverdeado na extremidade).

### 6.3 Propriedades Ópticas de Coberturas de Coletores

A transmissividade, refletividade, e absorvidade de uma cobertura simples, causam perdas de reflexão e absorção. Essas perdas podem ser determinadas pelas técnicas de traçado de raio similares às usadas para derivar a Equação 6.1.7. Para a componente perpendicular da polarização, a transmissividade  $\tau_{\perp}$ , refletividade  $\rho_{\perp}$ , e absorvidade  $\alpha_{\perp}$  da cobertura são

$$\tau_{\perp} = \tau_a \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \left( \frac{1-r_{\perp}^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} \right) \quad (6.3.1)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} (1 + \tau_a \tau_r) \quad (6.3.2)$$

$$\alpha_{\perp} = (1 - \tau_a) \left( \frac{1 - r_{\perp}}{1 - r_{\perp} \tau_a} \right) \quad (6.3.3)$$



Resultados similares são encontrados para as componentes paralelas da polarização. Para radiação incidente não polarizada, as propriedades ópticas são encontradas pela média das duas componentes.

A equação para a transmissividade de uma cobertura de coletor pode ser simplificada notando que o último termo da Equação 6.3.1 (e sua equivalente para a componente paralela da polarização) é aproximadamente unitária, assim  $\tau_a$  é raramente menor do que 0.9 e  $r$  é da ordem de 0.1 para as coberturas de coletores na prática. Com esta simplificação e com a Equação 6.1.8, a transmissividade de uma cobertura simples se torna

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (6.3.4)$$

Esta é uma relação satisfatória para coletores com materiais de cobertura e ângulos de interesse prático.

A absorvidade de uma cobertura de coletor solar plano pode ser aproximado deixando o último termo da Equação 6.3.3 ser unitário de forma que

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (6.3.5)$$

Embora o termo desprezado na Equação 6.3.3 seja maior do que o termo desprezado na Equação 6.3.1, a absorvidade é muito menor do que a transmissividade de forma que a acurácia total das duas aproximações é aproximadamente a mesma.

A refletividade de uma cobertura simples é então encontrada de  $\rho = 1 - \alpha - \tau$ , de forma que

$$\rho \cong \tau_a(1 - \tau_r) = \tau_a - \tau_r \quad (6.3.6)$$



A vantagem das Equações 6.3.4 a 6.3.6 sobre as Equações 6.3.1 a 6.3.3 é que a polarização considerada em equações aproximadas para o termo  $\tau_r$  no lugar de expressões complicadas para cada propriedade óptica.

#### 6.4 Transmissividade para Radiação Difusa

A análise anterior só se aplica para a componente direta da radiação solar. A radiação incidente em um coletor solar também consiste de radiação solar espalhada pelo céu e refletida no solo. Em princípio, a maior parte da radiação que passa através da cobertura pode ser calculada integrando a radiação transmitida sobre todos os ângulos. Entretanto, a distribuição angular desta radiação é geralmente desconhecida.

Para a radiação incidente isotrópica (i.e., independente do ângulo), a integração pode ser realizada. A apresentação dos resultados pode ser simplificada pela definição de um ângulo equivalente para radiação direta que dá a mesma transmissividade como para a radiação difusa. Para uma ampla faixa de condições encontradas em aplicações de coletores solares, o ângulo equivalente é  $60^\circ$ . Em outras palavras, a radiação direta incidente em um ângulo de  $60^\circ$  tem a mesma transmissividade que uma radiação isotrópica difusa.

Coletores solares são usualmente orientados de forma que eles “possam ver” tanto céu como terra. Se a radiação difusa do céu e a radiação refletida da terra são isotrópicos, então a transmissividade do vidro pode ser encontrada pela integração da radiação direta sobre ângulos de incidência apropriados.



## 6.5 Produto Transmissividade- Absorvidade

Para usar a análise do próximo capítulo, é necessário avaliar o produto transmissividade-absorvidade ( $\tau\alpha$ ). Da passagem da radiação através da cobertura e incidente na placa, uma fração é refletida de volta à cobertura. Embora, toda essa radiação não seja perdida parte dela é refletida de volta à placa.

A situação é ilustrada na Figura 6.5.1 onde  $\tau$  é a transmissividade da cobertura no ângulo desejado e  $\alpha$  é a absorvidade angular da placa absorvedora. Da energia incidente,  $\tau\alpha$  é absorvida pela placa absorvedora e  $(1-\alpha)\tau$  é refletida de volta à cobertura. A reflexão da placa absorvedora é assumida como difusa, então a fração  $(1-\alpha)\tau$  que incide na cobertura é de radiação difusa e  $(1-\alpha)\tau\rho_d$  é refletida de volta à placa absorvedora. A quantidade  $\rho_d$  refere-se à refletividade da cobertura para radiação difusa incidente pelo lado dos fundos e pode ser estimada pela Equação 6.3.6 como a diferença entre  $\tau_a$  e  $\tau$  no ângulo de  $60^\circ$ .

## 6.6 Radiação Solar Absorvida

Pré-determinar a performance do coletor requer informações da energia solar absorvida pela placa absorvedora. A radiação incidente tem três distribuições espectrais diferentes: radiação direta, radiação difusa, e radiação refletida terrestre, e cada uma delas deve ser tratada separadamente. Os detalhes dos cálculos dependem de qual modelo de radiação difusa pelo céu será usado. Usando o conceito de radiação difusa isotrópica na base horária, pode-se utilizar a equação da radiação absorvida através do produto( $\tau\alpha$ ):



$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6.9.1)$$

onde  $(1 + \cos \beta)/2$  e  $(1 - \cos \beta)/2$  são os fatores de vista do coletor para o céu e do coletor para a terra, respectivamente. Os subscritos  $b$ ,  $d$ , e  $g$  representam direta, difusa, e terrestre. Para um dado ângulo do coletor, a Figura 6.3 dá o ângulo efetivo de incidência da radiação difusa e refletida terrestre, e a Figura 6.2 podem ser usadas para encontrar os valores de absorvidade e transmissividade. A equação 6.5.1 ou a 6.5.2 pode então ser usada para encontrar  $(\tau\alpha)_d$  e  $(\tau\alpha)_g$ . O ângulo  $\theta$  para radiação direta, que é necessária na determinação de  $R_b$ , é usado para encontrar  $(\tau\alpha)_b$ . Alternativamente,  $(\tau\alpha)_n$  pode ser encontrado das propriedades de cobertura e a Figura 6.4 pode ser usada nos ângulos apropriados de incidência em cada fluxo de radiação para determinar os três produtos de transmissividade-absorvidade.



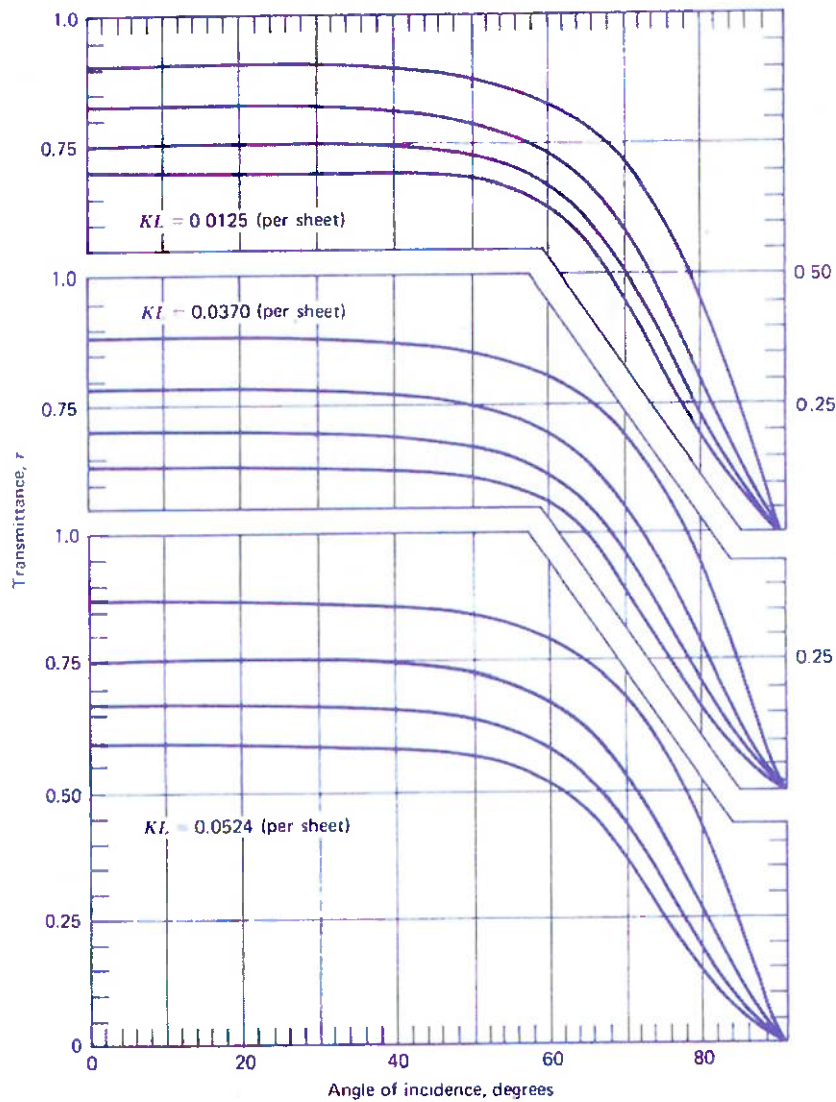


Figura 6.2 Transmissividade (considerando absorção e reflexão) de 1,2,3 e 4 coberturas para três tipos de vidros.

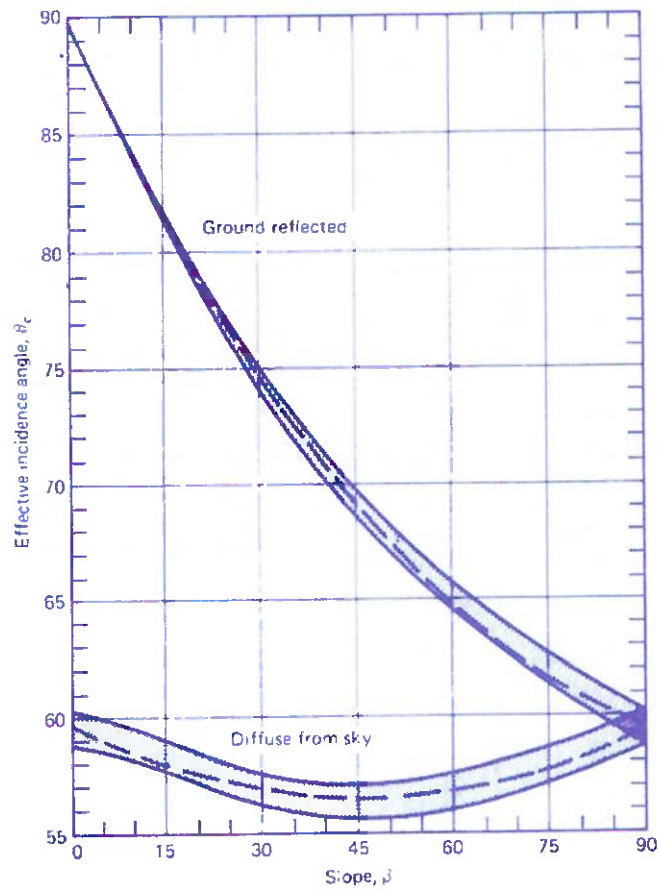


Figura 6.3 ângulo de incidência efetivo da radiação difusa e radiação terrestre em superfícies inclinadas.

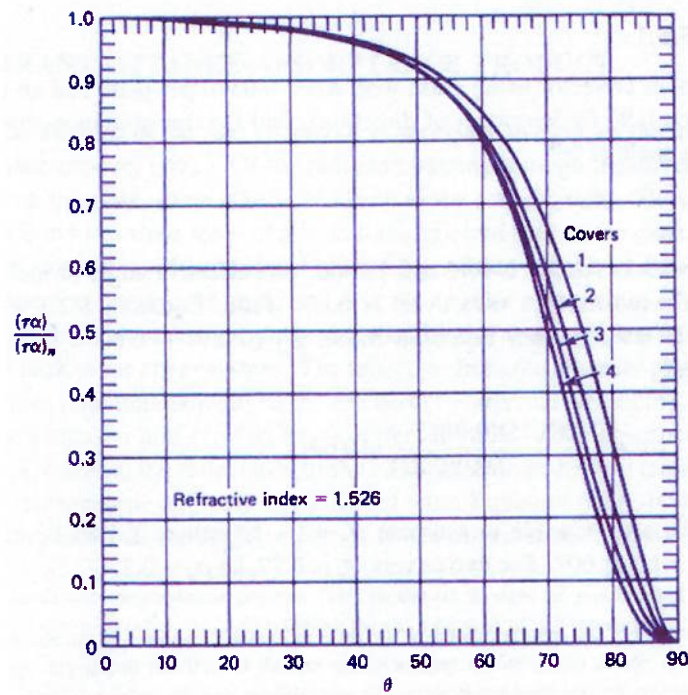


Figura 6.4 Curvas típicas de  $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$  para 1 a 4 coberturas.



## 7. Coletores Solares

Coletores solares são dispositivos utilizados na captação da radiação solar. Estes coletores são sistemas que empregam a conversão termodinâmica e conforme a temperatura obtida, são classificados em coletores de baixa, média e alta concentração.

### 7.1 Coletores de Baixa Concentração

Estes dispositivos são mais conhecidos pela denominação de coletores de placa plana ou coletores planos.

De um modo geral eles são constituídos de uma caixa termicamente isolada na parte inferior, contendo sobre este isolamento uma chapa metálica pintada de preto fosco, podendo ou não ter sobre a chapa uma tubulação, dependendo se o coletor foi projetado para aquecimento de ar ou água. A parte superior do coletor está fechada por um ou dois vitrais formados por vidros planos transparentes, dependendo do nível de temperatura desejado para o fluido de trabalho.

O funcionamento baseia-se na absorção da radiação pela chapa preta, a qual é transformada em calor que por sua vez é transferido ao fluido.

Os coletores podem ser montados na horizontal o que não é muito freqüente, ou em posição inclinada que é a maneira normalmente usada. Esta inclinação é função da latitude do lugar onde o coletor será instalado.

Ambas as montagens são fixas podendo no entanto o coletor inclinado ser móvel, o que não é muito freqüente, em virtude do custo de instalação,



mesmo porque o ganho energético obtido com o sistema móvel não é muito maior que o obtido com o sistema estacionário.

Os coletores de um vitral permitem obter temperaturas entre 70°C e 80°C. Empregando-se dois vitrais estas temperaturas podem ir além de 100°C até um limite de 200°C aproximadamente, porém neste caso a pintura preta da chapa coletora deverá ser substituída por uma pintura seletiva além de um melhor isolamento térmico.

## **7.2 Geometria dos Coletores**

A forma geométrica empregada na construção dos coletores planos é via de regra a forma retangular, nada impede contudo que outras formas como a circular, quadrada, trapezoidal, possam ser utilizadas, muito embora estas formas conduzam a desperdícios dos materiais empregados na construção dos coletores devido às dimensões padronizadas destes materiais encontrados comercialmente.

Um coletor plano para aquecimento de água é constituído de:

- uma cobertura transparente
- uma placa absorvedora da radiação
- uma camada de material isolante
- uma caixa metálica, com fundo
- um reservatório de água quente.

### **7.2.1 A Cobertura Transparente**

Devido a falta nacional de polímeros que possam substituir com eficiência o vidro plano empregado na cobertura transparente dos coletores, este



item pesa consideravelmente no custo de fabricação dos sistemas de absorção, devido ao alto preço de comercialização deste material.

A espessura do vidro empregado na cobertura está compreendida entre 3 a 4 mm.

A cobertura transparente tem duas finalidades básicas:

- Reduzir as perdas térmica devido ao efeito convectivo;
- Provocar o efeito estufa.

### **7.2.2 A Placa Absorvedora da Radiação Solar**

No conjunto do coletor plano, a placa absorvedora é o item mais importante do sistema de aquecimento considerando o fato de que é ao nível de sua superfície que se processa a conversão da radiação em calor.

A placa absorvedora é formada pelo conjunto chapa-tubo, constituindo uma peça única, o que proporciona melhor transferência da energia calorífica entre esta e o fluido de trabalho, a água.

Os tubos são dispostos em forma de uma grade. Entre as inúmeras disposições, a grade formada por tubos paralelos é a mais usual.

A construção da placa absorvedora da radiação solar empregada nos coletores planos para aquecimento de água, obedece normalmente aos esquemas de construção da figura 7.1.

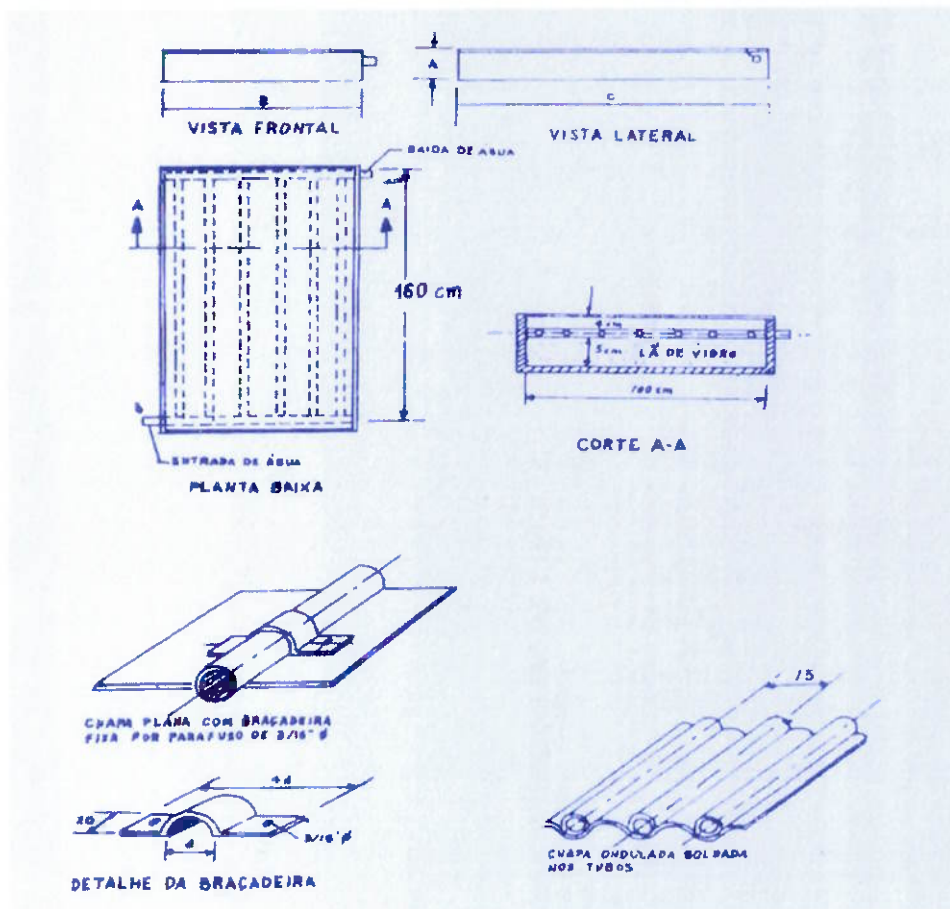


Figura 7.1 Esquemas de construção

As dimensões básicas podem ser alteradas dependendo da conveniência do usuário.

Entre as disposições mostradas para fixação da chapa aos tubo, a que indica a união feita por solda branca corrida em toda a extensão do tubo, é a mais indicada por garantir uma melhor ligação entre os dois elementos. As outras soluções oferecem contudo resultados satisfatórios porém sempre que possível deverão ser evitadas por oferecerem a possibilidade de um mal contato entre a chapa e o tubo, o que dificultaria a transferência de calor entre estes elementos.



Algumas fábricas de coletores nacionais estão empregando perfis especiais de chapa onde os tubos são a ela fixados por pressão.

Uma solução interessante é o emprego de chapas onduladas pois isto proporciona um aumento de área na captação da radiação solar incidente.

### 7.2.3 Isolamento Térmico

Os coletores planos são dispositivos que funcionam segundo a conversão térmica da radiação solar, transferindo o fluxo energético proveniente da radiação incidente para o fluido de trabalho que circula no interior da grade de tubos da placa coletora.

Para que o sistema possa funcionar de acordo com os níveis térmicos desejados, é importante reduzir ao máximo as perdas térmicas, já que tratando-se de sistemas que funcionam à temperaturas superiores às do ambiente, é importante evitar as respectivas trocas de calor. Isto é obtido com o emprego de materiais isolantes, de baixa condutibilidade térmica (K), onde a lã de vidro é entre todos o material mais empregado.

Um baixo valor de (K) não é suficiente para definir um bom isolante térmico. Ele deve ainda satisfazer aos seguintes requisitos:

- custo aquisitivo baixo
- ser resistente às temperaturas a que será submetido
- possuir boa resistência mecânica
- ser resistente à ação das intemperes.

O melhor isolamento é o ar cujo (K) é igual a 0,02.





Sendo a maioria dos isolantes térmicos de constituição fibrosa ou porosa, eles serão tão mais isolantes quanto maior for a quantidade de ar neles aprisionado, pois isto torna o (K) destes materiais tanto quanto possível próximo do (K) do ar. Apesar disso, a porosidade dos isolantes deve obedecer as dimensões determinadas. O aumento progressivo da porosidade poderá ocasionar movimentos convectivos no ar aprisionado, o que gerará um aumento nas trocas de calor, fazendo com que o material perca as suas propriedades isolantes.

No caso de se usar lã de vidro, esta deverá formar um colchão de 5 centímetros de espessura, suficiente para as aplicações a baixa temperatura.

#### **7.2.4 Caixa do Coletor**

A caixa do coletor é o elemento estrutural do sistema de aquecimento.

Vários são os materiais empregados em sua construção:

- fibra de vidro
- chapa de ferro galvanizado
- plástico rígido
- fibrocimento
- chapa ou perfil de alumínio
- alvenaria de cimento
- madeira
- perfis especiais, geralmente alumínio extrudado

A madeira seria a solução mais indicada por possuir baixa condutibilidade térmica e ser facilmente trabalhável, mas nem por isso a mais



econômica pelo fato de apresentar uma vida útil reduzida quando exposta às intemperes.

Entre os materiais relacionados para a construção da caixa do coletor, a escolha é mais por uma questão de custo e disponibilidade de mercado. A preferência deve ser dada à aqueles materiais de baixa condutibilidade térmica já que isto auxilia a reduzir as respectivas perdas.

Apesar do alumínio ser um bom condutor de calor, ele tem sido usado com frequência, em forma de perfil, para compor a caixa do coletor.

Com exceção do alumínio, a caixa do coletor deverá receber um acabamento externo com tinta clara brilhante ou na tonalidade alumínio.

A parte inferior da caixa poderá ser de chapa metálica ou de madeira. Optando-se pela madeira, o compensado naval de 4 milímetros de espessura é o mais indicado.

Deve-se ter o cuidado de deixar a superfície superior da caixa a mais regular possível, pois isto facilita a colocação da cobertura transparente assim como facilita também a vedação com silicone ou outro material de mesmas características.

Os perfis leves utilizados na construção da caixa do coletor deverão ser contraventados para eliminar a tendência à flexão lateral, o que poderá ocasionar danos à cobertura transparente durante o transporte do coletor para o local de instalação.

#### **7.2.5 Reservatório de Água Quente**

A fim de garantir o suprimento noturno de água quente, assim como nos dias chuvosos, a água previamente aquecida na placa coletora será armazenada



em um tanque termicamente isolado, parte integrante do sistema de aquecimento.

A estocagem é formada por um duplo tanque construído em chapa metálica, de ferro galvanizado, entre os quais existe um revestimento de lã de vidro ou de outro material isolante de mesmas características, na espessura de 5 centímetros.

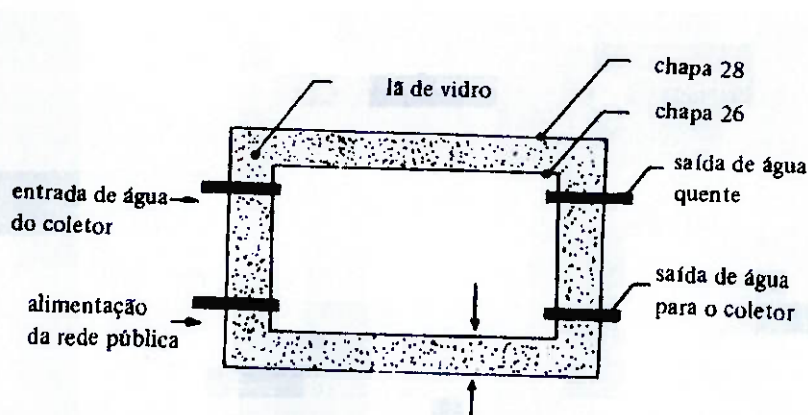


Figura 7.2 Tanque de estocagem

Muito embora não seja de emprego corrente, a estocagem de água quente pode ser feita em reservatórios com múltiplo isolamento térmico. Esta prática proporciona uma redução das perdas térmicas, porém tem a desvantagem de aumentar os custos de construção do reservatório.

Nas aplicações domiciliares o emprego de reservatórios com múltiplo isolamento é desnecessário, salvo nos casos em que se deseja um mínimo de variação da temperatura da água 24 horas por dia.



### 7.3 Montagem dos Coletores

Grandes volumes de água a serem aquecidos exigem evidentemente grandes áreas de captação da radiação solar, já que esta é por natureza uma energia diluída.

Se bem que parecesse lógico nestes casos a construção de coletores de grandes dimensões, verifica-se de imediato a impraticabilidade de tal medida em virtude das dificuldades de transporte e instalação de tais sistemas. Por outro lado, sendo os coletores construídos com materiais de dimensões pré-estabelecidas pela indústria, isto constitui um parâmetro determinante das dimensões máxima do coletor.

Baseado portanto nas dimensões padronizadas dos fabricantes de chapa metálica, perfis, tubos, vidro, materiais isolantes, o projeto de um coletor deverá ser feito de tal modo que as dimensões destes materiais possam ser aproveitadas com o mínimo de perdas.

Normalmente as dimensões dos coletores para aquecimento de água estão entre 1,6 a 2,0 metros quadrados, muito embora isto não signifique que não possam ser construídos módulos de maiores dimensões.

Sistemas de aquecimento de água em grandes volumes exigem a instalação de vários coletores. Nestes casos costuma-se dispor os módulos de três maneiras distintas, dependendo do tipo de circulação da água no sistema:

- a- montagem em paralelo
- b- montagem em série
- c- montagem série-paralelo



### 7.3.1 Montagem em paralelo

Neste tipo de montagem a água circula no interior do coletor através da tubulação da placa coletora da mesma maneira que circularia no caso de um único coletor. Portanto não se verifica aumento da temperatura da água de um módulo de coletor para o seguinte, na hipótese de que todos os módulos sejam de mesmas dimensões e igualmente construídos.

Na montagem em paralelo a circulação natural (termo-sifão), funciona corretamente. O depósito de estocagem de água quente deverá ser montado de tal modo que a sua parte inferior mantenha uma cota de 60 centímetros de altura em relação à saída de água quente dos coletores, pois a pressão exercida pela respectiva coluna de água assim obtida e a diferença de temperatura da água do sistema facilita o início e a manutenção do processo de circulação de água pôr termo-sifão.

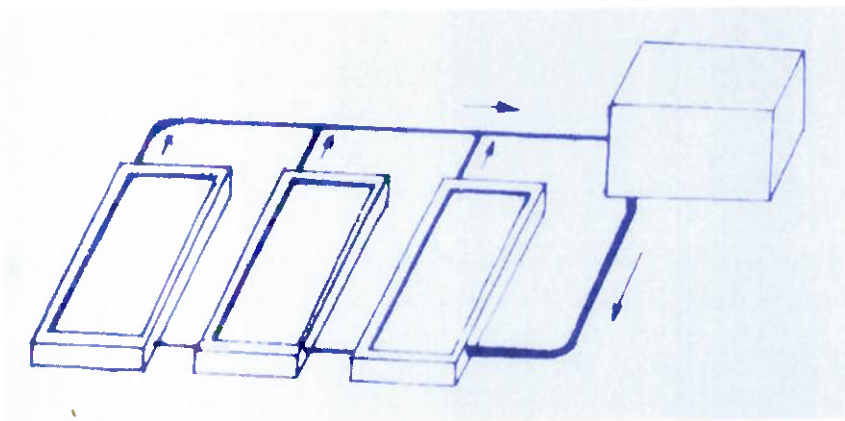


Figura 7.3 Esquema de uma montagem de coletores em paralelo.

### 7.3.2 Montagem em Série

Esta montagem apresenta características bem diferentes da anterior já que a medida em que a água vai circulando pelos coletores, a sua temperatura vai sendo gradativamente elevada de tal modo que ao chegar no último coletor



da série, a temperatura atingida pela água é bem maior que a obtida no módulo inicial da série. Isto significa dizer que os coletores trabalham a temperaturas diferentes e sempre em ordem crescente segundo a direção do fluxo.

Sendo a eficiência do coletor inversamente proporcional à sua temperatura, conclui-se que os últimos coletores da montagem em série apresentam eficiências menores.

Quando a temperatura é muito elevada, costuma-se melhorar o isolamento térmico destes coletores e sempre que possível usar dupla cobertura transparente.

Na montagem em série utiliza-se a circulação forçada pôr meio de bomba já que o aumento de pressão verificado no circuito do coletor dificultará o processo natural de termo-sifão, em decorrência de um aumento de resistência à passagem da água.

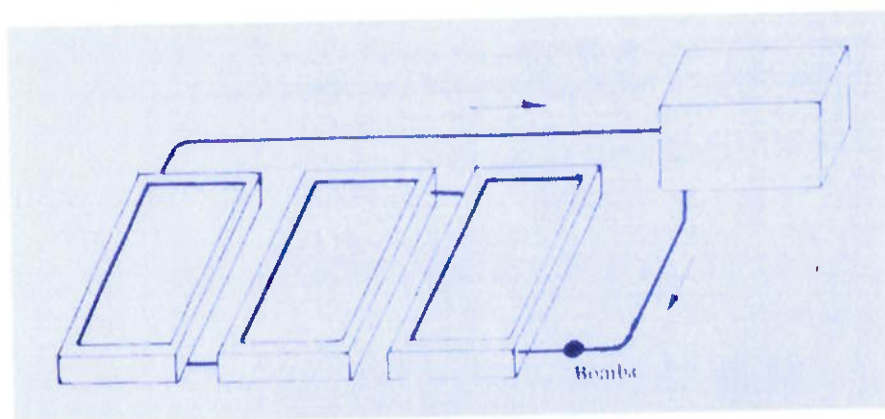


Figura 7.4 Montagem em série

### 7.3.3 Montagem em Série-Paralelo

Uma outra maneira de dispor os coletores é fazendo uma associação das duas montagens anteriormente citadas, constituindo o que se chama de montagem série-paralelo.



Nesta montagem conforme esquematizada na figura 7.5, é necessário prever um espaçamento ( $c$ ) entre os módulos para eventuais trabalhos de manutenção. Este espaçamento não deve ser superior a 40 centímetros.

Em qualquer montagem, as ligações entre os módulos poderá ser feita por mangote de borracha ou lona, com fixação pôr braçadeiras e em seguida protegida com isolante térmico.

Na figura 7.5 é mostrada um tipo de montagem onde a circulação natural (termo-sifão) não é aconselhada. Neste caso a circulação da água nos coletores é feita por meio de uma bomba.

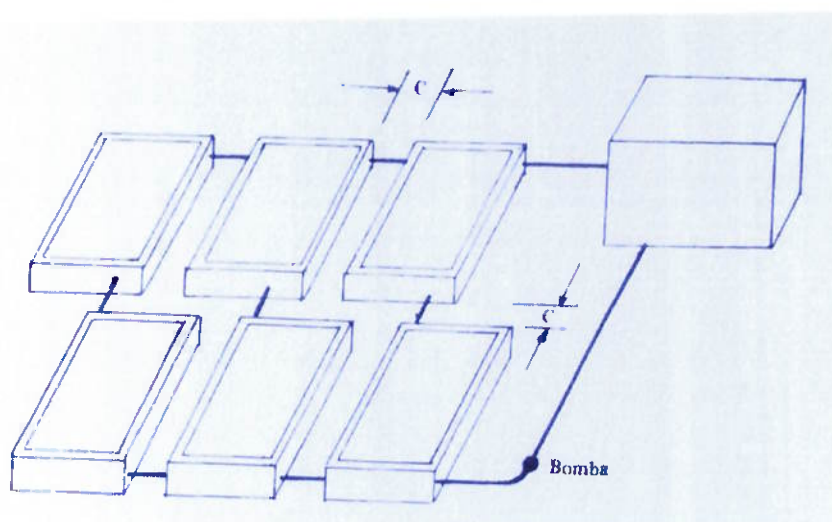


Figura 7.5 Montagem série-paralelo

No caso de instalação residencial os coletores poderão ser instalados sobre o telhado, quer diretamente sobre as telhas, quer montados em apoios de alvenaria ou mesmo estruturas metálicas projetadas com tal finalidade.

As montagens série-paralelo são geralmente utilizadas quando se necessita de grandes volumes de água e neste caso deve-se estudar cuidadosamente o local de instalação do coletor. Optando-se pela montagem



aérea, deve-se verificar se a estrutura do telhado suporta a carga adicional decorrente do sistema em operação.

Nas aplicações residenciais dificilmente se pensaria numa montagem série-paralelo já que o número de coletores é muito inferior ao exigido para aquele tipo de montagem.

As instalações de superfície, no caso de residência, devem ser evitadas não somente por questões estéticas mais, principalmente, por motivo de segurança contra danos materiais por eventuais arremessos de pedras, objetos e movimentação de animais domésticos.

Os coletores operando no hemisfério sul (caso do Brasil), serão orientados para o norte verdadeiro e inclinados de um ângulo igual ao da latitude do lugar, No caso de instalações com circulação natural (termo-sifão), o coletor deverá ser inclinado de mais  $10^\circ$  além do ângulo da latitude. Este aumento no ângulo de inclinação do coletor além de facilitar o início do processo de termo-sifão tem ainda como finalidade compensar a variação anual da declinação solar de modo que a radiação incidente durante todo o ano seja a mais perpendicular possível.

Para sistemas com circulação forçada a inclinação do coletor será igual à latitude do lugar para qualquer que seja o valor deste ângulo.

#### **7.4 Tipos de Instalação**

Basicamente são cinco tipos de instalação de coletores solares para aquecimento de água.

- Circulação natural em circuito aberto
- Circulação natural em circuito fechado





- Circulação forçada em circuito aberto
- Circulação forçada em circuito fechado
- Sistema misto com aporte elétrico (circuito aberto ou fechado)

#### **7.4.1 Circulação Natural em Circuito Aberto**

Neste tipo de instalação a ângulo de inclinação do coletor será  $10^\circ$  maior que o ângulo da latitude pois uma maior inclinação do coletor facilita o processo de circulação da água no sistema.

O termo-sifão é baseado na diferença de densidade da água a temperaturas diferentes. O termo-sifão só será interrompido quando a intensidade de radiação for insuficiente para manter a temperatura de água a níveis diferentes ou quando for alcançado o equilíbrio térmico entre o coletor e o tanque de estocagem de água quente.

Entre o nível do reservatório e a saída de água quente do coletor, deverá existir um desnível de pelo menos 60 centímetros para que o termo-sifão funcione corretamente.

O circuito é dito aberto quando a água no consumo circula no interior da grade de tubos do coletor.

Os coletores de alumínio não devem ser utilizados em circuito aberto principalmente quando se trata de água muito clorada, pois o cloro ataca rapidamente o alumínio, danificando o coletor.

Para este tipo de água recomenda-se o emprego de coletores de ferro galvanizado ou cobre, sendo este último o material mais recomendado.

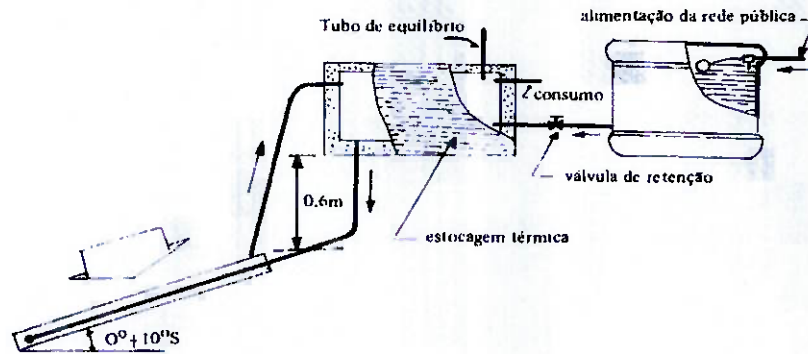


Figura 7.6 Circulação natural em circuito aberto

#### 7.4.2 Circulação Natural em Circuito Fechado

A diferença fundamental entre este tipo de instalação e a anterior, é a introdução de um trocador de calor no circuito do coletor, localizado no interior do reservatório de água quente.

Neste caso os coletores de alumínio podem ser empregados já que o fluido de trabalho poderá ser um óleo fino ou mesmo água destilada. A água quente para o consumo troca calor com o trocador instalado no interior do reservatório de água quente sem que tenha que passar pela tubulação da grade do coletor.

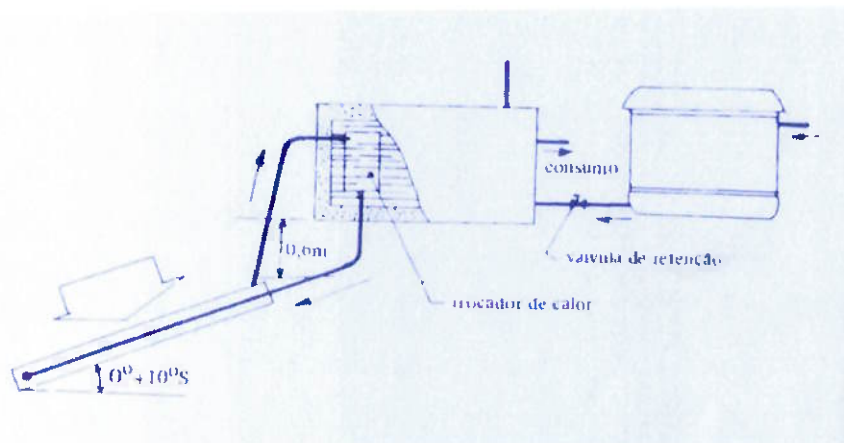


Figura 7.7 Circulação natural em circuito fechado



### 7.4.3 Circulação Forçada em Circuito Aberto

Este tipo de instalação tem as mesmas características do sistema de circulação natural em circuito aberto, diferindo apenas pela introdução de uma bomba no circuito do coletor.

A introdução de uma bomba para a circulação da água no coletor permite variar a posição do tanque de estocagem de água quente podendo este ser instalado abaixo do coletor.

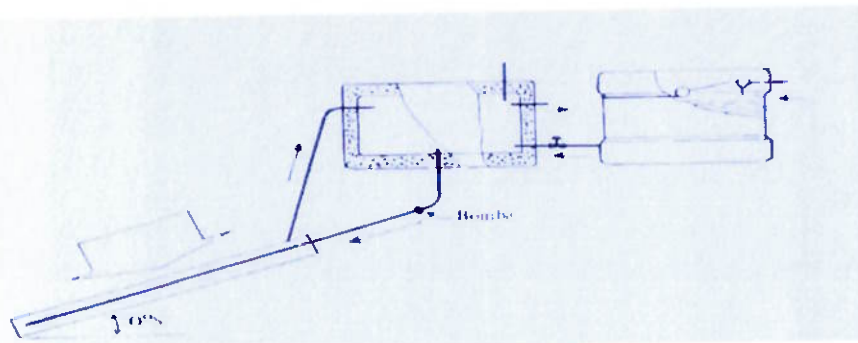


Figura 7.8 Circulação forçada em circuito aberto

### 7.4.4 Circulação Forçada em Circuito Fechado

Este tipo de instalação é semelhante ao sistema de circulação natural em circuito fechado, adicionando-se ao sistema uma bomba, para circulação da água no sistema de aquecimento.

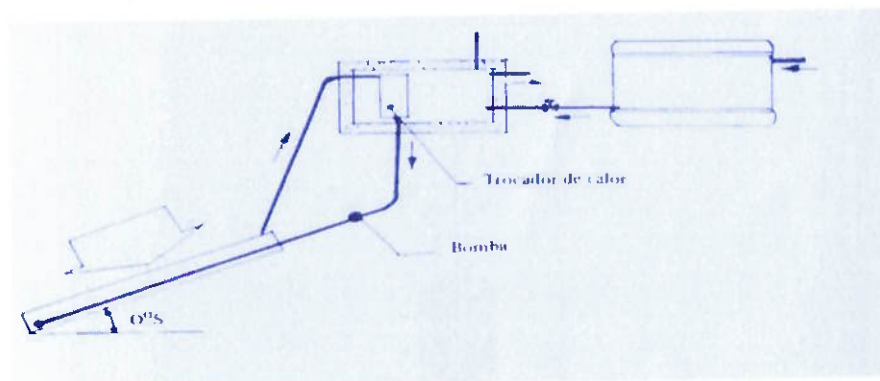


Figura 7.9 Circulação forçada em circuito fechado



#### 7.4.5 Sistema Misto com Aporte Elétrico

O sistema com aporte elétrico pode ser formado por qualquer um dos tipos de instalação descritos anteriormente onde se adiciona um aquecedor elétrico comandado por um termostato.

Sempre que não houver radiação suficiente para manter o nível de temperatura desejado para água, o termostato é ativado e comanda uma resistência elétrica que irá manter a água na temperatura desejada. O mesmo termostato será regulado para desativar a resistência tão logo a água atinja a temperatura desejada.

Este tipo de instalação é indicado quando se deseja manter a água sempre à mesma temperatura. Dos sistemas descritos é o de custo mais elevado em virtude das sofisticações introduzidas.

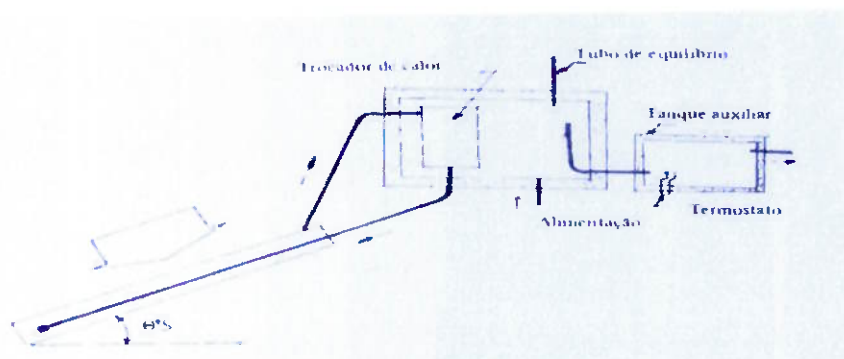


Figura 7.10 Sistema Misto com Aporte Elétrico

#### 7.5 Reservatório de Alimentação do Sistema de Aquecimento

O sistema de aquecimento constituído pelo coletor e reservatório de água quente, pode ser alimentado de várias maneiras:

- Diretamente do reservatório de água fria da residência com fluxo de água regulado por bóia



- Diretamente do reservatório de água fria da residência sem o emprego da bóia, mantendo o reservatório de água quente totalmente cheio pela introdução de um tubo de equilíbrio
- Alimentação independente do reservatório de água fria da residência, comandado por bóia.

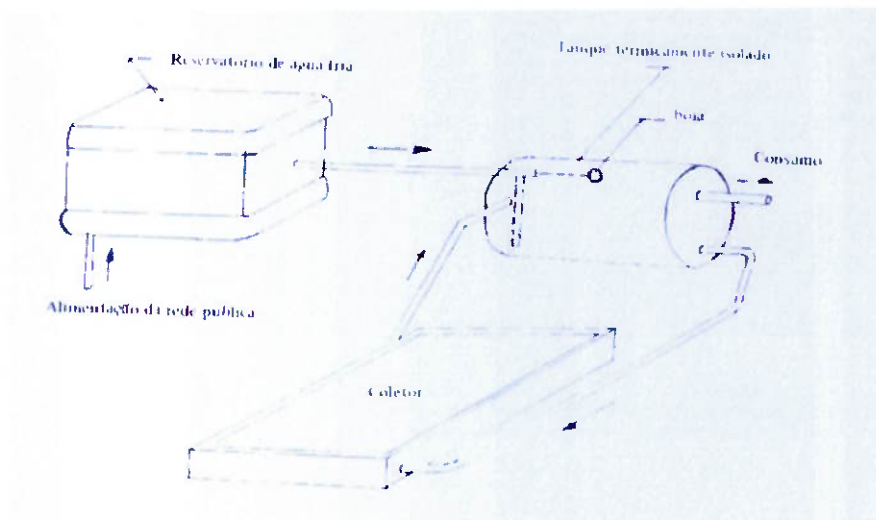


Figura 7.11 Alimentação direta da caixa de água fria

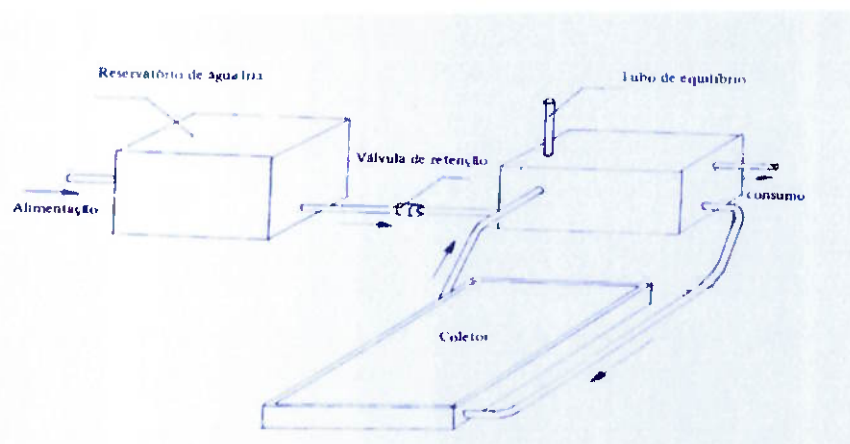


Figura 7.12 Alimentação direta e tubo de equilíbrio

Quando se optar por um sistema de ligação conforme representado na Figura 7.12, deve-se colocar uma válvula de retenção no circuito de



alimentação do reservatório de água quente para evitar a entrada da água aquecida na rede de distribuição de água fria da residência.

Nesta instalação é necessário a colocação de um tubo de equilíbrio no reservatório de água quente, que deverá ficar acima do nível superior do reservatório de água fria, para evitar transbordamento e manter o sistema na pressão atmosférica.

### **7.6 Ângulo de Inclinação do Coletor**

O ângulo de inclinação do coletor é muito importante para que se possa captar o máximo de radiação solar. Este ângulo é igual ao da latitude do lugar onde o coletor será instalado. Normalmente, adiciona-se a este ângulo  $10^\circ$ , para compensar a variação anual da declinação solar, principalmente nos sistemas a termo-sifão pois isto facilita a convecção natural da água no circuito do coletor.

### **7.7 Eficiência do Coletor**

A eficiência do coletor é inversamente proporcional à diferença de temperatura do coletor e a temperatura ambiente. Quanto maior o  $\Delta T$ , menor a eficiência do coletor. Este no entanto não é o único fator a ser considerado no cálculo da eficiência. O tipo de superfície absorvedora, o número de coberturas transparentes, a intensidade da radiação, o isolamento térmico empregado; exercem influência destes elementos na eficiência do coletor.

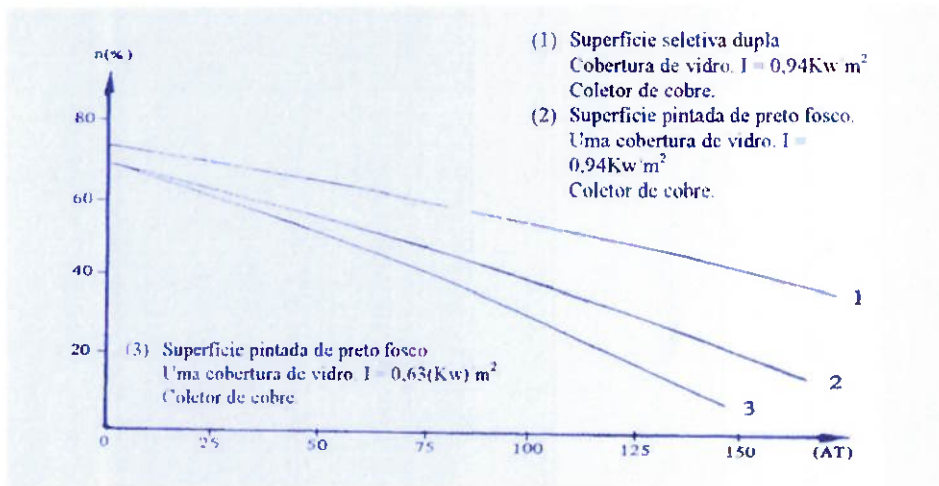


Figura 7.13 Gráfico – Eficiência do Coletor

### 7.8 Dimensões do Coletor em Função do Número de Pessoas

As dimensões de um coletor são via de regra obtida pelo cálculo onde vários parâmetro são levados em consideração entre eles, a radiação, tipo de superfície absorvedora, material do coletor. Apesar disso, nas regiões bastantes ensolaradas como é o caso do nordeste brasileiro, a prática recomenda que é possível dimensionar o coletor apenas em função do número de usuários. Sem incorrer em erros significativos, pode-se empregar a seguinte tabela:

Número de Pessoas	Área do Coletor	Volume de água, Aquecida por dia
4	3,0 m <sup>2</sup>	200 litros
8	5,0 m <sup>2</sup>	500 litros
12	8,0 m <sup>2</sup>	1000 litros



## 7.9 Coletores Econômicos

Os coletores normalmente encontrados comercialmente são construídos em cobre, o que encarece o sistema de aquecimento em virtude do preço elevado do material. É o material mais indicado devido a sua condutibilidade térmica, facilmente trabalhável, porém o seu preço de comercialização tem contribuído muito para que os sistemas solares de aquecimento de água sejam acessíveis a uma camada da população mais desfavorecida.

Os coletores de cobre, quando bem projetados, permitem obter temperaturas elevadas e têm uma vida útil estimada em vinte anos. Para reduzir os custos dos coletores poderíamos partir para duas alternativas: a primeira seria empregar materiais menos nobres como ferro galvanizado, cuja durabilidade é superior a 10 anos com o retorno do capital empregado entre 3 a 4 anos. A segunda alternativa seria construir coletores de cobre com eficiências mais elevadas, o que representaria aquecer um maior volume de água, utilizando uma mesma área de coletor que aqueceria um menor volume a uma temperatura mais elevada, o que exigiria um misturador para tornar possível a utilização desta água.

O tanque de água quente poderia ser feito com um tambor de 200 litros assim como poderia se empregar materiais menos nobres na construção da caixa do coletor. Estas alternativas evidentemente que não seriam indicadas para produção industrial. São apenas maneiras mais econômicas de se construir artesanalmente sistemas solares de aquecimento de água, com resultados satisfatórios.





### 7.10 Considerações sobre o vidro e outros materiais

A cobertura transparente usualmente empregada nos coletores planos é um dos itens que pesam bastante no custo do coletor, devido a seu preço elevado.

O alto teor de óxido de ferro existente na composição do vidro nacional normalmente encontrado no comércio, é identificado pelos vidros de bordas esverdeadas, o que os torna de qualidade inferior para as aplicações solares. A não planeidade do vidro compromete suas qualidades óticas, podendo concorrer para aumentar as perdas da radiação incidente, por reflexão.

Os vidros de bordas esverdeadas chegam a absorver de 5 a 10% da radiação solar.

O vidro mais indicado é o de bordas de cor branca. O teor de óxido de ferro nestes vidros é de 0,01%, o que permite transmitir cerca de 92% da radiação solar.

O vidro temperado, mais resistente e de melhor qualidade que os vidros comuns, seria o indicado para a cobertura transparente dos coletores planos. Ocorre porém, que o custo elevado desse material torna o custo final do sistema muito elevado.

Na verdade, não só o vidro como todos os materiais usualmente empregados na construção dos coletores planos, são materiais considerados nobres como o cobre, o alumínio e o próprio vidro, de emprego bastante difundido na indústria em geral e na construção civil, cujos preços de comercialização tornam-se cada vez mais elevados.



### 7.11 Resumo dos Materiais Normalmente Empregados na Construção dos Coletores Planos para Aquecimento de Água

Descrição	Material	Observação
Cobertura Transparente	Vidro plano transparente de 3 a 4 mm de espessura	Sempre que possível evitar o emprego de vidros de bordas esverdeadas.
Placa absorvedora De radiação	-Chapas: ferro preto, ferro galvanizado cobre, alumínio -Tubos: ferro galvanizado, alumínio, cobre	De preferência usar cobre para a placa absorvedora. A tubulação de alumínio só deverá ser usada em coletores em circuito fechado. O ferro é mais econômico de que o cobre porém é de menor vida útil.
Isolamento Térmico	Lã de vidro, lã de rocha, raspa de madeira seca	De preferência usar lã de vidro. A raspa de madeira é um bom isolante desde que devidamente seca.
Caixa do coletor	Madeira pintada, chapa metálica, perfil de alumínio	O perfil de alumínio é o mais indicado.
Reservatório de água	Ferro galvanizado, Fibra de vidro	Evitar caixa tipo fibrocimento para reservatório de água quente.
Rede de distribuição	Ferro galvanizado, cobre, plástico rígido de parede	Isolar e proteger o circuito aéreo contra umidade.

### 7.12 Balanço Térmico

O desempenho de um coletor está relacionado com a energia por ele absorvida e a energia perdida. A relação entre elas define o seu balanço térmico.

A equação representativa deste balanço é dado por:



$$Q = Q_a - Q_P \quad \text{onde:}$$

$Q$  = calor líquido entregue pelo coletor ao fluido de trabalho

$Q_a$  = calor absorvido pelo coletor

$Q_P$  = calor perdido pelo coletor (perdas térmicas)

O calor absorvido  $Q_a$  é função de :

- a) energia incidente ( $I_r$ )
- b) área útil do coletor ( $A_c$ )
- c) fator ( $\lambda\alpha$ ) que representa o produto transmissividade-absorvidade da cobertura transparente e placa absorvedora, fator este referido como eficiência ótica do sistema. Temos:

$$Q_a = I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha$$

As perdas térmica ( $Q_P$ ) são referidas à temperatura ( $T_P$ ) da placa coletora em relação à temperatura ( $T_a$ ) do ambiente.

Outras perdas térmicas como as verificadas por convecção, são bem mais significativas. Se bem que estas perdas podem ser calculadas, porém na prática a representamos por um coeficiente de perda ( $P_t$ ), de tal modo que:

$$Q_P = P_t \cdot A_c \cdot (T_P - T_a)$$

Substituindo os valores de  $Q_a$  e  $Q_P$ , temos;

$$Q = I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha - P_t \cdot A_c \cdot (T_P - T_a)$$



Sendo  $I_r$  normalmente expresso por unidade de área e sendo  $Q$  o calor líquido na área do coletor, poderemos expressar o seu valor por unidade de área, de modo que:

$$q = \frac{Q}{A_c} = \frac{I_r \cdot A_c \cdot \lambda \alpha}{A_c} - \frac{P_t \cdot A_c \cdot (T_p - T_a)}{A_c} = I_r \cdot \lambda \alpha - P_t (T_p - T_a)$$

A equação acima é conhecida como equação de HOTTEL-WHILLIER.

### 7.13 Eficiência Térmica do Coletor

A eficiência térmica do coletor é expressa por:

$$\eta = \frac{q}{I_r}$$

Substituindo a equação de Hottel-Whillier na expressão acima:

$$\eta = \lambda \alpha - \frac{P_t \cdot (T_p - T_a)}{I_r}$$

A representação gráfica desta equação em um par de eixos cartesianos, dá origem a uma reta que permite obter informações importantes relacionadas com a eficiência do coletor.

As perdas representadas por  $P_t$  ocorrem por diversos mecanismos. Entre a placa absorvedora e a cobertura transparente assim como entre as laterais do



coletor e seu exterior, as perdas térmicas são devidas a radiação e convecção, porém em diferentes proporções. Entre o isolamento térmico e o exterior do coletor, as perdas são por condução.

Muito embora estas perdas possam ser calculadas, é comum estimar um valor para elas, de tal modo que  $(P_t)$  possa ser considerado constante. Para um coletor bem projetado o valor de  $P_t$  se situa entre 0,5 e 0,75 W/°Cm<sup>2</sup>.

O termo  $\lambda\alpha$  (produto transmissividade do vidro pela absorvidade da placa coletora de radiação), depende do tipo da cobertura transparente, número de coberturas e tipo de placa absorvedora.

No caso mais geral (pintura de preto fosco e uma cobertura transparente) o produto  $\lambda\alpha$  é considerado constante e igual a 0,8.

Analisando o gráfico abaixo concluímos que:

- o ponto de intersecção (B) da reta AB com o eixo das abscissas representa o quociente de  $\lambda\alpha / P_t$
- o ponto de intersecção (A) da reta AB com o eixo das ordenadas dá o valor do produto  $\lambda\alpha$
- a reta AB é o valor negativo de  $P_t$

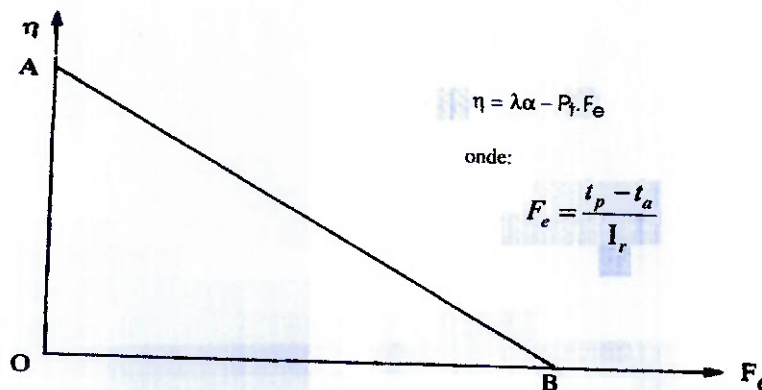


Figura 27. Gráfico de eficiência do coletor para determinados valores de  $(\lambda\alpha)$  e  $(P_t)$ .



É importante notar que o eixo OY e o eixo OX do gráfico representam respectivamente os valores da eficiência ( $\eta$ ) e da função eficiência ( $F_e$ ) do coletor considerado.

#### 7.14 Temperatura da Água na Saída do Coletor

As variações da temperatura ambiente e radiação incidente em um coletor solar durante um determinado tempo de operação do sistema, não oferece condições para determinar com precisão a temperatura de trabalho efetiva do fluido, a não ser no caso em que se utilize a média diária ou mensal dos parâmetros tais como intensidade de radiação, temperatura ambiente, outros.

No presente cálculo os valores obtidos são valores instantâneos que servem para se ter uma razoável idéia da temperatura da água na saída do coletor, podendo no instante seguinte haver uma variação do valor calculado, bastando para isso que haja uma variação significativa da incidência solar no sistema de aquecimento.

Consideramos os seguintes elementos:

$t_e$  – temperatura da água na entrada do coletor

$t_s$  – temperatura da água na saída do coletor

O calor sensível transferido à água será:

$$\Delta T = t_s - t_e$$



A quantidade de calor necessária para transferir à água uma temperatura correspondente a  $\Delta T$  será:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot (t_s - t_e) \quad \text{onde}$$

$\dot{m}$  = fluxo de massa dado em litros/hora

$C_p$  = calor específico da água dado em Kcal/kg °C

Parte do calor transferido à água pelo coletor é por sua vez cedido ao ambiente, que se encontra a uma temperatura  $T_a$ .

Durante o percurso da água no interior da grade de tubos do coletor, a sua temperatura vai gradativamente aumentando, a partir de  $t_e$  até atingir  $t_s$  na saída do coletor, ao mesmo tempo em que parte do calor absorvido pela água vai sendo transferido para o ambiente. Isto constitui uma perda térmica ( $T_p$ ) dado por:

$$T_p = \left( \frac{t_s + t_e}{2} \right) - T_a$$

onde o calor perdido ( $Q_p$ ) devido a queda de temperatura do fluido ao trocar calor com o ambiente, vem dado por:

$$Q_p = K \cdot A_c \cdot T_p = K \cdot A_c \cdot \left[ \left( \frac{t_s - t_e}{2} \right) - T_a \right] \quad \text{onde}$$



$K$  = coeficiente de absorção do vidro ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$A_c$  = área do coletor em  $\text{m}^2$

$T_a$  = temperatura ambiente em  $^\circ\text{C}$

A quantidade de calor incidente no coletor será:

$$Q_i = I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha$$

e o calor útil absorvido pelo coletor será:

$$Q_u = Q_i - Q_p$$

Expressão que expressa o balanço térmico do coletor.

Substituindo nesta equação os seus termos pelos seus respectivos valores:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (t_s - t_e) = I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha - K \cdot A_c \cdot \left[ \left( \frac{t_s + t_e}{2} \right) - T_a \right]$$

$$t_s = \frac{2I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha + t_e \left( 2\dot{m} \cdot C_p - K \cdot A_c \right) + 2K \cdot A_c \cdot T_a}{2\dot{m} \cdot C_p + K \cdot A_c}$$

onde:

os valores correntes de  $K$  são:

- um vitral:  $K = 5,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- dois vitrais:  $K = 3,3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

O fator  $\lambda\alpha$  é aproximadamente 0,8





## 8. Nosso Coletor

No mercado atual, existem dezenas de fabricantes de coletores solares, porém, a forma e a tecnologia empregada são praticamente as mesmas (coletor solar de dutos aletados, pintados de preto fosco, isolados com lã de vidro ou poliuretano expandido e cobertos com uma placa de vidro, em geral, com 3 mm de espessura). Tendo conhecimento desse fato, resolvemos mudar a forma do nosso protótipo e no lugar de dutos aletados, criamos um coletor de duas placas paralelas, onde a água, em vez de passar por dutos, passa entre as placas em contato direto. Devido a custos maiores, substituiríamos a lã de vidro por isopor, podendo ser isopor picado e embalado em sacos plásticos e trocar a placa de vidro por um material transparente de mesmas características (kevlar, acrílico ou lonas plásticas transparentes e resistentes).

### 8.1 Definição do projeto

Definido o tipo de coletor a ser montado (coletor solar plano de placas paralelas), definimos:

- a) Material das placas de absorção: cobre
  - b) Material da caixa do coletor: madeira
  - c) Isolante Térmico: lã de vidro (cedida gentilmente pelo colega Guilherme)
  - d) Quantidade de água a ser aquecida: 50 litros
  - e) Cobertura Transparente: 1 placa de vidro
- a) Utilizamos cobre como material das placas, pois esse material apresentou a melhor relação custo/benefício. Além de ser um ótimo condutor térmico, é vendido no mercado na forma de chapas em diversas espessuras e tamanhos.



Optamos por chapas de 0,5 e 0,8 mm de espessura nas placas superior e inferior respectivamente e de 1,20 m de comprimento por 0,60 m de largura, assim teríamos um coletor de quase um metro quadrado de área.

- b) Foi escolhida a madeira como base para a caixa do coletor, pois esta, já um material de isolamento térmico e é de baixo custo e de fácil obtenção.
- c) Inicialmente iríamos utilizar como material isolante isopor. Podendo ser qualquer tipo de isopor; placas ou isopores utilizados no empacotamento de equipamentos como televisores ou computadores. Colocaríamos pequenos pedaços de isopor ou então isopor picado em sacos plásticos a fim de isolá-los de eventuais vazamentos, que ficariam entre as placas de cobre e o suporte de madeira. Esta seria uma maneira de aproveitar um material que é muito pouco reciclado, apesar de amplamente utilizado pelas indústrias e comércio. Porém, acabamos por utilizar a lã de vidro devido ao comodismo e à facilidade de manuseio e obtenção, uma vez que um colega nos cedeu uma amostra de que havia sobrado de um antigo projeto e era o suficiente para isolarmos tanto as placas quanto os dutos que ligam o reservatório térmico ao coletor.
- d) Inicialmente iríamos utilizar como material isolante isopor. Podendo ser qualquer tipo de isopor; placas ou isopores utilizados no empacotamento de equipamentos como televisores ou computadores. Colocaríamos pequenos pedaços de isopor ou então isopor picado em sacos plásticos a fim de isolá-los de eventuais vazamentos, que ficariam entre as placas de cobre e o suporte de madeira. Esta seria uma maneira de aproveitar um material que é muito pouco reciclado, apesar de amplamente utilizado pelas indústrias e comércio. Porém, acabamos por utilizar a lã de vidro devido ao comodismo



e à facilidade de manuseio e obtenção, uma vez que um colega nos cedeu uma amostra de que havia sobrado de um antigo projeto e era o suficiente para isolarmos tanto as placas quanto os dutos que ligam o reservatório térmico ao coletor.

- e) Definimos o volume de água a ser aquecido em 50 litros devido à limitação que as placas de cobre nos impuseram. Havíamos calculado que 1 m<sup>2</sup> de coletor solar aquece aproximadamente 75 litros de água, como nosso coletor possui 0,70 m<sup>2</sup>, o volume de água a ser aquecido será de aproximadamente 50 l. Com o cálculo desse valor, tornou-se possível o cálculo da espessura do coletor (distância entre placas de cobre), que foi de aproximadamente 15 cm, que aproximamos para 0,5 polegada, isto devido ao fato de ser facilmente encontrado no comércio barras de seção quadrada de cobre de 0,5”.
- f) Decidimos por colocar uma placa de vidro transparente, devido, principalmente, ao temor de que sem o efeito estufa provocado pela cobertura transparente, o rendimento do coletor fosse insatisfatório. Pensamos em outros materiais que teriam a mesma função, porém optamos pelo vidro porque conseguimos uma placa de 3 mm de espessura de tamanho compatível com o nosso coletor. Os materiais que poderiam substituir o vidro seriam o filme de kevlar, porém é um material extremamente caro e de difícil obtenção em pequenas quantidades, e o acrílico transparente, este porém torna-se opaco em pouco tempo quando em contato com a luz solar.



## 8.2 Materiais para a construção

- 2 placas de cobre de 0,5 e 0,8 mm de espessura
- 1 eixo quadrado de cobre de 1/2” de lado
- madeira para o suporte
- parafusos e porcas
- um reservatório térmico
- dutos de 42 e 15 mm de diâmetro
- conector de redução e expansão
- massa de soldagem química
- tinta preta fosca
- cobertura transparente (placa de vidro)

## 8.3 Processos de construção

Na montagem do coletor, quem praticamente definiu o tamanho foram as chapas de cobre, por elas é que passará a água a ser aquecida e elas são a principal parte do coletor. As chapas possuem 1,20 x 0,60 m de dimensão, logo o coletor deve ser um pouco maior que as chapas.

Primeiramente serrou-se dois pedaços iguais de tubo de 42mm de diâmetro com cerca de 0,90 m de comprimento. Fez-se dois rasgos no tubo de aproximadamente 0,60 m de comprimento com uma fresa de topo de 12 mm no laboratório de máquinas da área térmica. Estes rasgos servirão para encaixar as placas de cobre e ligá-los ao reservatório térmico. Devido à precariedade da máquina e do péssimo estado de conservação da mesma, com folgas muito grandes, o rasgo feito ficou um pouco maior no comprimento e bem maior na largura esperada, que deveria ser a da fresa.



A fim de se intensificar a troca de calor entre a placa superior e o fluido, instalamos na placa inferior alguns intensificadores de troca de calor, que servirão para direcionar o escoamento e aumentar a turbulência dentro das placas, aumentando conseqüentemente a troca de calor.



Figura 8.1 Detalhe interno: Intensificadores de troca de calor

Para a união das placas de cobre, colocamos o eixo quadrado nas extremidades, no sentido do comprimento das placas, furamos e juntamos as placas com parafuso e porcas de latão M4. Para melhor vedação colocamos a massa de soldagem química entre as placas e o eixo. Após a placa coletora estar pronta, juntamos os dutos com o rasgo previamente feito. Para uma melhor fixação, colocamos duas abraçadeiras de alumínio nas extremidades da placa, juntando a placa absorvedora ao duto.



Figura 8.2 União das placas e Abraçadeira

Para uma boa performance do escoamento, a velocidade de entrada na placa deveria ser baixa, por isso optamos por utilizar um conector de redução de diâmetro de tubulação, que diminui a velocidade do fluido que entra em um pleno e homogeneiza o escoamento para dentro das placas.



Figura 8.3 Detalhes de montagem: conector redutor de tubulação



O suporte do coletor foi montado todo de madeira com ressaltos na chapa inferior, para a fixação da chapa coletora e acomodação do isolamento térmico entre a placa de cobre e a madeira. O ângulo de inclinação da placa deve ser igual à latitude local acrescido de  $10^\circ$ , para uma melhor absorção nos meses de inverno. A latitude de São Paulo é de  $23,5^\circ\text{S}$  e portanto a inclinação do coletor deve ser de aproximadamente  $30^\circ$ . O coletor deve estar sempre direcionado para o norte geográfico, para um maior tempo de exposição à radiação solar ao longo de um dia.

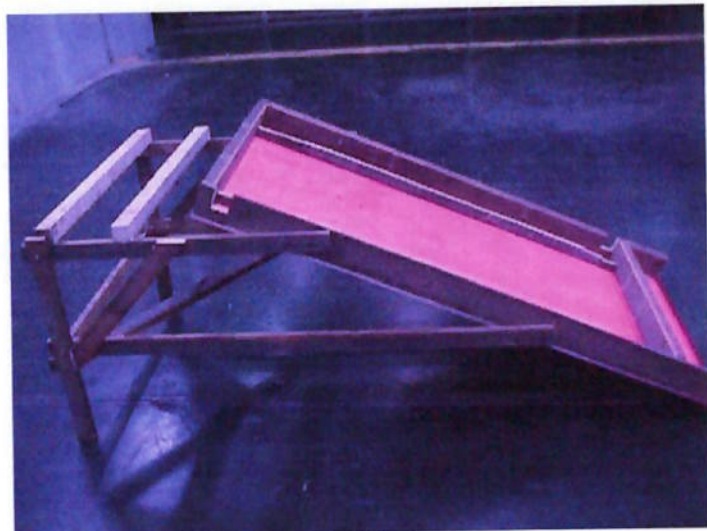


Figura 8.4 Suporte do coletor – indicação da inclinação

Para a vedação entre as chapas e os tubos de cobre, utilizou-se uma massa plástica de soldagem química, que é um selante de borracha poliuretânica que agüenta temperaturas de até  $80^\circ\text{C}$ . Para os tubos e os conectores e cotovelos, utilizamos solda de estanho para a vedação completa.



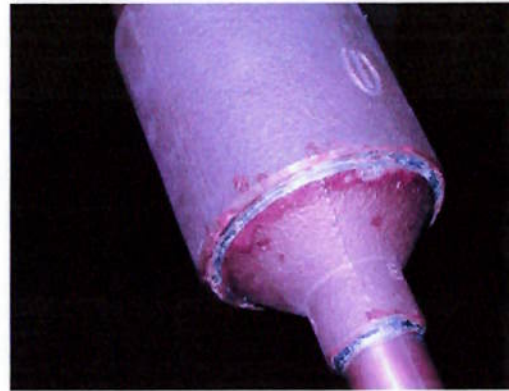
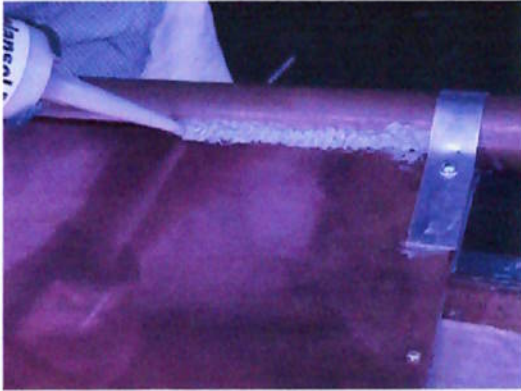


Figura 8.5 Detalhamento de Vedação – Borracha Selante e Solda com Estanho

Para o isolamento térmico utilizamos uma cobertura de lã de vidro de 2” de espessura, que é a quantidade recomendada para uma boa isolamento.

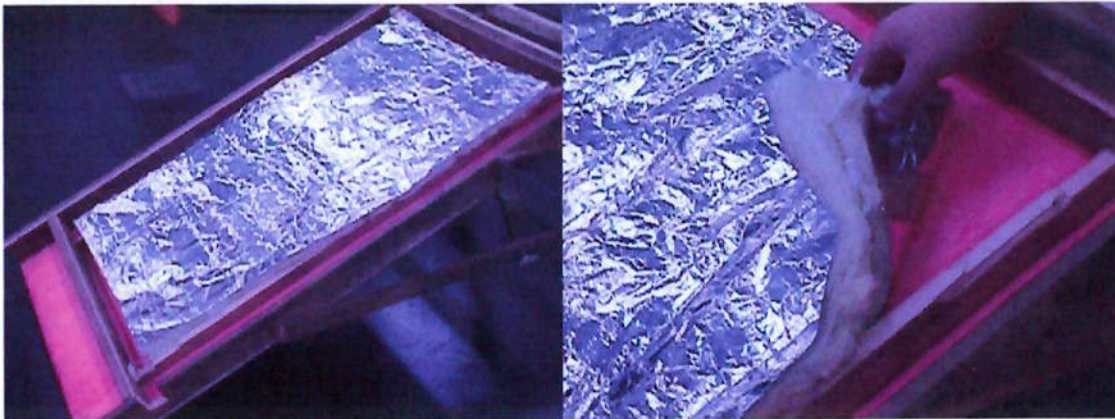


Figura 8.6 Isolamento Térmico – lã de vidro

O reservatório térmico também deve estar isolado termicamente, para tanto, cobrimos o reservatório com uma camada de lã de vidro de 1” de espessura. Após a secagem da massa de vedação, pintamos a placa superior com uma tinta preta fosca, pois esta ajudaria na absorção da energia solar.



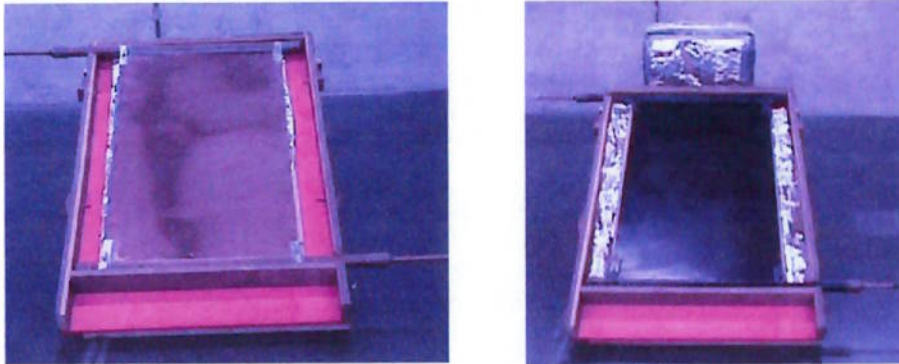


Figura 8.7 Fase final de montagem – pintura

Após a colocação do coletor em sua posição, uni-se os dutos que saem da placa coletora ao reservatório térmico e acomodou-se a placa de vidro sobre a placa coletora apoiada diretamente na base de madeira do suporte do coletor.

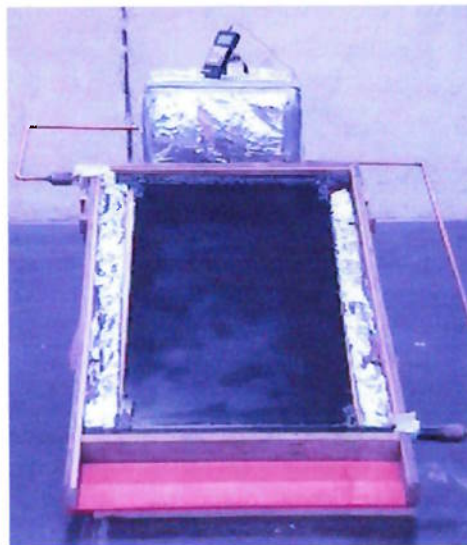


Figura 8.8 Coletor solar de placas planas

Para a medição dos dados de temperatura d'água utilizou um termômetro Probe TP-100, aparelhos Instrutherm THR-080 CRS-10 e o software Lutron para se fazer a aquisição de dados. Para a medição de fluxo térmico (radiação solar) ao longo dos dias



utilizamos dos dados da WEBBEE, que fica dentro da Cidade Universitária ([www.webbee.org.br](http://www.webbee.org.br)).



Figura 8.9 Aparelhos de medição e software de aquisição de dados

#### 8.4 Problema Encontrado

Após o coletor estar montado e pronto para ser testado ao sol (já fora testado com água sem muita pressão), a placa de cobre superior de 0,5mm de espessura não agüenta a pressão de pouco menos de 1 mca (metro de coluna d'água) e se deforma, quebrando toda a vedação plástica feita nas placas.

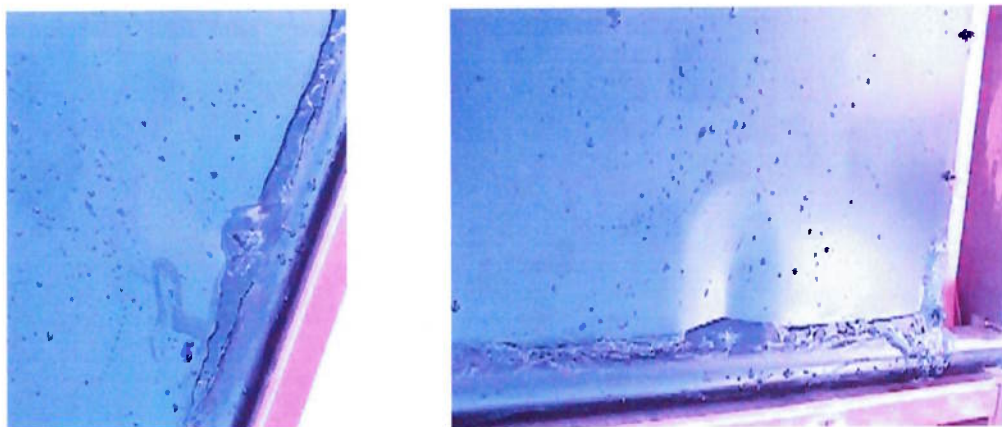


Figura 8.10 Momento da ruptura da placa de cobre



## 8.5 Soluções Possíveis

- Colocar maior número de abraçadeiras;
- Trocar solda plástica por solda metálica;
- Colocar nervuras de aço ao longo do coletor;
- Diminuição da área das extremidades (menor área de contato direto entre dutos e placa);
- Parafusar os intensificadores de troca de calor ao longo da placa.

## 8.6 Solução Adotada

Após análise dentro das possíveis soluções encontrados, foram tomadas as seguintes decisões:

- Colocar uma nervura de aço na parte inferior do coletor;
- Parafusar alguns intensificadores de troca de calor na região central da placa;
- Colocar maior número de abraçadeiras (duas na parte inferior e uma na parte superior).

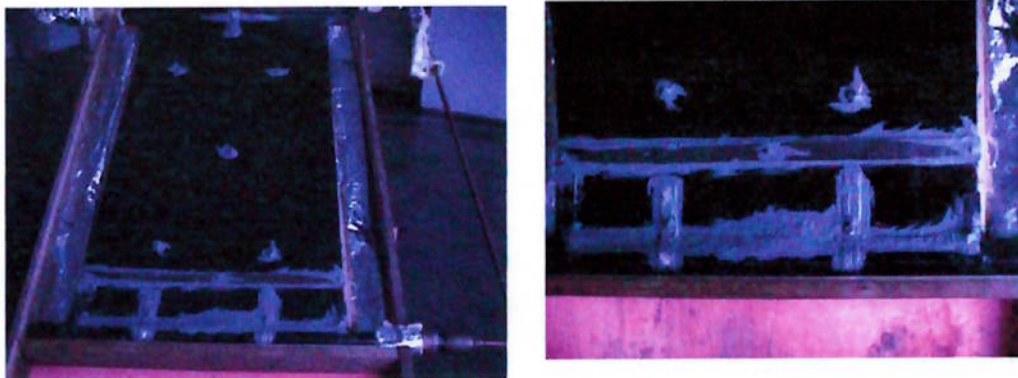


Figura 8.11 Coletor após reforma – detalhe novas abraçadeiras e nervura



## 9. Dados Coletados

- Data 07/12/2002 – dia claro ensolarado
- Temperatura inicial da água 23.3°C

### Sistema WebBee

Período :: De **2002-12-07 07:00:00**  
Até **2002-12-07 19:20:00**

	<b>DIA</b>	<b>HORA</b>	<b>VALOR</b>				
				38	07/12/2002	13:10	459
				39	07/12/2002	13:20	373
				40	07/12/2002	13:30	310
				41	07/12/2002	13:40	329
				42	07/12/2002	13:50	399
				43	07/12/2002	14:00	357
				44	07/12/2002	14:10	262
				45	07/12/2002	14:20	193
				46	07/12/2002	14:30	197
				47	07/12/2002	14:40	279
				48	07/12/2002	14:50	295
				49	07/12/2002	15:00	245
				50	07/12/2002	15:10	245
				51	07/12/2002	15:20	293
				52	07/12/2002	15:30	317
				53	07/12/2002	15:40	380
				54	07/12/2002	15:50	446
				55	07/12/2002	16:00	459
				56	07/12/2002	16:10	445
				57	07/12/2002	16:20	413
				58	07/12/2002	16:30	389
				59	07/12/2002	16:40	362
				60	07/12/2002	16:50	344
				61	07/12/2002	17:00	333
				62	07/12/2002	17:10	308
				63	07/12/2002	17:20	253
				64	07/12/2002	17:30	242
				65	07/12/2002	17:40	169
				66	07/12/2002	17:50	117
				67	07/12/2002	18:00	102
				68	07/12/2002	18:10	137
				69	07/12/2002	18:20	190
				70	07/12/2002	18:30	111
				71	07/12/2002	18:40	67
				72	07/12/2002	18:50	21
				73	07/12/2002	19:00	3
				74	07/12/2002	19:10	7
				75	07/12/2002	19:20	0
1	07/12/2002	07:00	5				
2	07/12/2002	07:10	29				
3	07/12/2002	07:20	29				
4	07/12/2002	07:30	27				
5	07/12/2002	07:40	29				
6	07/12/2002	07:50	33				
7	07/12/2002	08:00	58				
8	07/12/2002	08:10	82				
9	07/12/2002	08:20	112				
10	07/12/2002	08:30	149				
11	07/12/2002	08:40	162				
12	07/12/2002	08:50	206				
13	07/12/2002	09:00	230				
14	07/12/2002	09:10	205				
15	07/12/2002	09:20	253				
16	07/12/2002	09:30	280				
17	07/12/2002	09:40	334				
18	07/12/2002	09:50	286				
19	07/12/2002	10:00	420				
20	07/12/2002	10:10	420				
21	07/12/2002	10:20	522				
22	07/12/2002	10:30	546				
23	07/12/2002	10:40	485				
24	07/12/2002	10:50	542				
25	07/12/2002	11:00	651				
26	07/12/2002	11:10	672				
27	07/12/2002	11:20	688				
28	07/12/2002	11:30	544				
29	07/12/2002	11:40	403				
30	07/12/2002	11:50	479				
31	07/12/2002	12:00	595				
32	07/12/2002	12:10	505				
33	07/12/2002	12:20	643				
34	07/12/2002	12:30	615				
35	07/12/2002	12:40	675				
36	07/12/2002	12:50	614				
37	07/12/2002	13:00	762				

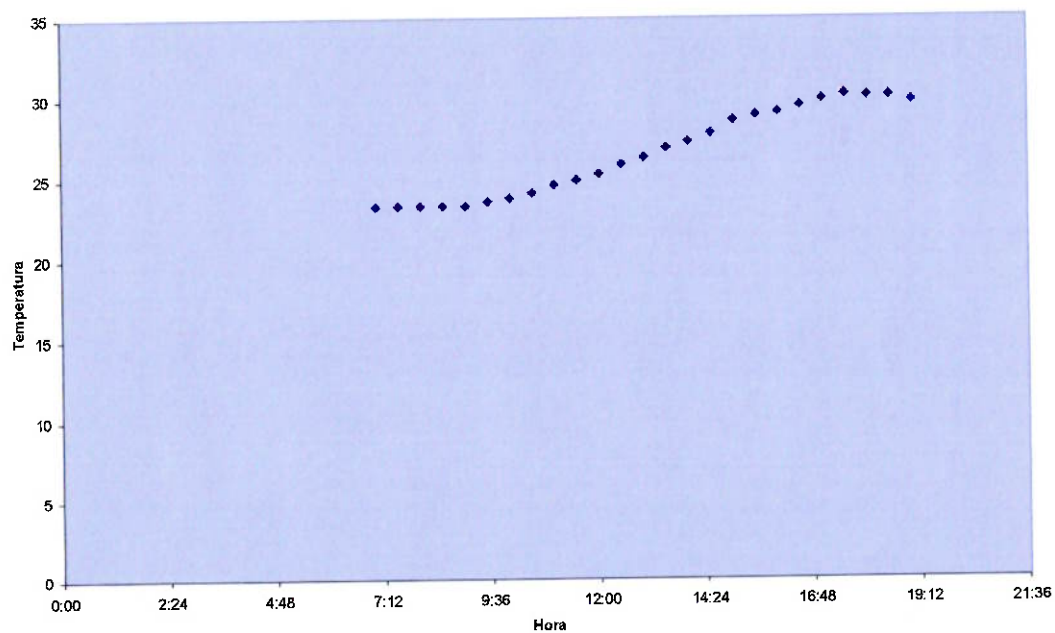
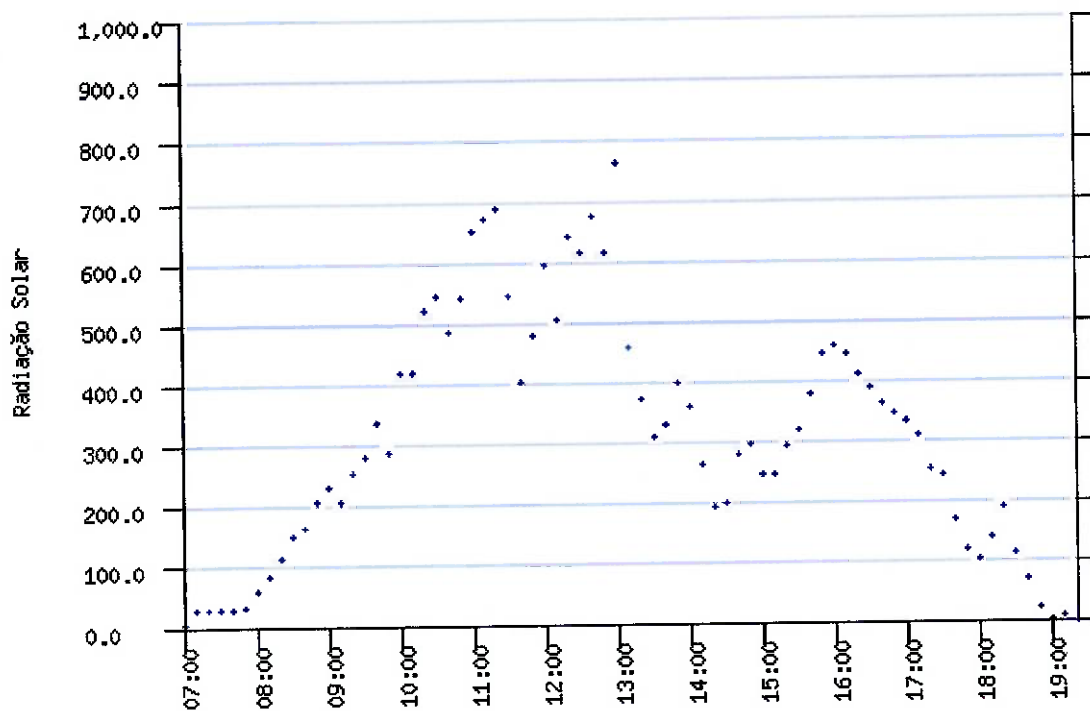
Qtd de registros :: 75

Sistema WebBee em desenvolvimento.





### WebBee





- Data 08/12/2002 – dia nublado com ameaça de chuva
- Temperatura inicial da água 19.6°C

### Sistema WebBee

Período :: De 2002-12-08 07:00:00  
Até 2002-12-08 11:00:00

	<b>DIA</b>	<b>HORA</b>	<b>VALOR</b>
1	08/12/2002	07:00	34
2	08/12/2002	07:10	45
3	08/12/2002	07:20	61
4	08/12/2002	07:30	74
5	08/12/2002	07:40	60
6	08/12/2002	07:50	54
7	08/12/2002	08:00	66
8	08/12/2002	08:10	77
9	08/12/2002	08:20	87
10	08/12/2002	08:30	85
11	08/12/2002	08:40	96
12	08/12/2002	08:50	131
13	08/12/2002	09:00	169
14	08/12/2002	09:10	169
15	08/12/2002	09:20	157
16	08/12/2002	09:30	129
17	08/12/2002	09:40	118
18	08/12/2002	09:50	93
19	08/12/2002	10:00	35
20	08/12/2002	10:10	25
21	08/12/2002	10:20	31
22	08/12/2002	10:30	41
23	08/12/2002	10:40	89
24	08/12/2002	10:50	139
25	08/12/2002	11:00	152

*Qtd de registros :: 25*

Sistema **WebBee** em desenvolvimento.

Experiência interrompida devido à chuva



## 10. Conclusão

Chegar até aqui é uma vitória e uma glória para qualquer politécnico! Fazer esse último trabalho foi muito prazeroso, é bem verdade que é também extremamente cansativo e muitas vezes estressante porém, conseguir atingir a metas e ver o trabalho de um ano todo tornando-se realidade, é uma sensação indescritível!

Chegamos até aqui com muito esforço e dedicação, mas antes de tudo, foram nossos mestres que nos guiaram até a glória e gostaríamos de agradecê-los mais uma vez por tudo: Muito Obrigado!

Teremos caminhos diferentes, alguns continuarão na área acadêmica, outros irão para fábricas, bancos e consultorias, mas guardaremos a POLI em um cantinho especial do coração.



## 11. Referências Bibliográficas

- [1] Duffie, J.A.; Beckman, W.A., **Solar Engineering of Thermal Processes**, Wiley-Interscience Publication, New York, 1991.
- [2] Wieder, S., **An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers**, Krieger Publishing Company, Florida, 1992.
- [3] Kreider, J.F.; Kreith, F., **Solar Heating and Cooling**, Mc Graw Hill, Washington, 1996.
- [4] Incropera, F.P.; DeWitt, D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1998.
- [5] Robinson, N., **Solar Radiation**, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1970.
- [6] Bezerra, A.M., **Aplicações Térmicas da Energia Solar**, UFPB/Editora Universitária, João Pessoa, 1998.
- [7] Reddy, T.A., **The Design and Sizing of Native Solar Thermal System**, Oxford Science Publications, Oxford, 1987.
- [8] Vieira, A.H.G.; Nova, A.C.B.; Scarpinella, C.A.; Ferreira, J.J.A.; Lima, L.E.; Rosa, R.C.C.; Segawa, S., **Consumo Energético no Brasil: Perspectivas para 1990**, Livraria Cultura Editora, 1978.
- [9] Boyle, G., **Renewable Energy – Power for a Sustainable Future**, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [10] La Rovere, E.L.; Rosa, L.P.; Rodrigues, A.P., **Economia e Tecnologia da Energia**, Editora Marco Zero, Rio de Janeiro, 1985.
- [11] Holman, J.P., **Transferência de Calor**, Mc Graw Hill, São Paulo 1997.
- [12] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 10184, Coletores Solares Planos Para Líquidos – Determinação do Rendimento Térmico**, Jan/1988.
- [13] Serway, R.A., **Física 4 para Cientistas e Engenheiros**, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1996.
- [14] Kuae, L.K.N.; Bonessio, M.C.M.; Villela, M.C.O., **Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses**, editoração de Reis, M.G.C., EPUSP, São Paulo, 1991.
- [15] Kaminski, P.C., **Desenvolvendo Produtos com Planejamento, Criatividade e Qualidade**, LCT Editora, Rio de Janeiro, 2000.