

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE FORMATURA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO
DE ÁGUA COM ENERGIA SOLAR - MÉTODO F-CHART

Autor: Roberto Toshiaki Shishido

Orientador: Silvio de Oliveira Junior

- 1986 -

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. *Silvio de Oliveira Junior* pela segura e vital orientação prestada durante todas as fases, da pesquisa bibliográfica à conclusão.

A *Maria Cristina Assumpção* pela ajuda inestimável, sem a qual não seria possível a apresentação deste trabalho.

E em especial aos meus pais pela compreensão e incentivo demonstrados em toda minha formação.

S U M Á R I O

O objetivo deste trabalho é fazer uma aplicação numérica do método F-Chart, no dimensionamento de um sistema de aquecimento de água.

Apresentamos, inicialmente, informações gerais a respeito da energia solar, bem como os princípios teóricos dos coletores planos e seus sistemas.

Descrevemos, sucintamente, o método F-Chart e, como exemplo de aplicação, foi adotado um projeto de porte multifamiliar, ou seja, com características de utilização doméstica, mas com carga térmica maior.

Finalmente, são feitos alguns comentários a respeito dos resultados obtidos.

I N D I C E

1	- INTRODUÇÃO E APLICAÇÕES GERAIS DA ENERGIA SOLAR.....	01
1.1	- Introdução	01
1.2	- Aproveitamento da Energia Solar.....	03
2	- O SOL E A RADIAÇÃO SOLAR.....	13
2.1	- O Sol.....	13
2.2	- A Constante Solar e Aspectos da Radiação Solar.....	15
3	- COLETORES SOLARES.....	25
3.1	- Tipos de Coletores.....	25
3.2	- Coletores Planos.....	26
3.3	- Coletores Concentradores.....	27
4	- TEORIA DOS COLETORES PLANOS.....	30
4.1	- Equação do Balanço de Energia.....	30
4.2	- Coeficiente Global de Transferência de Calor.....	31
4.3	- Fator de Remoção de calor.....	33
4.4	- O Produto Transmissividade-Absortividade.....	35
4.5	- Testes de Rendimento de Coletores.....	37
4.6	- Efeito da Orientação do Coletor.....	40
5	- SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	42
5.1	- Configurações Usuais.....	43
5.2	- Análise do Sistema Coletor Solar - Reservatório Térmico..	45
6	- O MÉTODO F-CHART.....	48
6.1	- F - A Fração da Carga Térmica Suprida pela Energia Solar.	49
6.2	- Influência da Capacidade do Reservatório Térmico.....	52
6.3	- Sistemas para Aquecimento Exclusivo de Água.....	53

7	- APLICAÇÃO DO MÉTODO F-CHART.....	55
7.1	- A Instalação.....	56
7.2	- Avaliação da Carga Térmica.....	57
7.3	- Cálculo da Fração F.....	61
7.4	- Conclusão.....	63
8	- BIBLIOGRAFIA.....	66
9	- ANEXOS.....	68

1 - INTRODUÇÃO E APLICAÇÕES GERAIS DA ENERGIA SOLAR

1.1 - Introdução

O homem sempre usou a energia solar. No entanto, até algum tempo atrás, o uso mais imediato restringia-se a alimentação com os vegetais, que vivem da fotossíntese, e com os animais que também consomem estes vegetais. Esta matéria prima, também, foi sempre utilizada na construção das habitações e como combustível para as primeiras fogueiras.

O desenvolvimento e as crescentes necessidades de suplementação de energia para a manutenção do organismo, desencadearam um processo de procura e descoberta de fontes de energia das mais variadas formas. Em quase todas estas fontes de energia, entretanto, é comprovada a participação da energia do sol, seja no carvão, nas hidroelétricas ou mesmo na energia eólica.

Atualmente, a maior parte da energia que move o mundo é de origem fósil, não renovável. Devido à crescente demanda, seja pelo aumento da população, como pelo aumento da energia suplementar per capita, que a sociedade moderna exige, há uma grande preocupação com relação à exaustão das reservas de petróleo e gás. Se forem mantidos os ritmos atuais do consumo e seu crescimento, essas reservas poderão se esgotar num tempo variável de 20 a 60 anos e o carvão pode esgotar-se dentro de 200 anos. Certamente a indicação de cifras como estas é passível de

críticas, pois dependem dos critérios utilizados para a sua avaliação, porém, é óbvio que as reservas tendem a tornar-se escassas e, em determinado momento, não muito distante, os custos de extração poderão atingir o limite da inviabilidade.

Há também a questão da poluição. Todos os combustíveis convencionais geram grande quantidade de poluentes, pondo em risco a sobrevivência da natureza. No caso da combustão da lenha há uma dupla agressão ao equilíbrio ecológico, pela fumaça e pela devastação das florestas. Os programas e as iniciativas de reflorestamento, têm transformado as antigas florestas em "desertos verdes" com "efeitos benéficos" ao ecossistema muito discutíveis.

A energia nuclear, muito defendida por alguns, apresenta também o problema da poluição, na forma radioativa, além de apresentar custo por KWh muito elevado. Somese a estes fatores o fato de que, em termos de segurança, não há ainda uma confiabilidade em níveis desejáveis.

Uma solução extrema para os problemas energéticos, ainda em fase de pesquisa, seria a fusão do deutério. No entanto, ainda não se conseguiu o necessário controle da reação que ocorre na bomba de hidrogênio.

Entretanto, já temos um reator a fusão em pleno funcionamento suprimindo a Terra de energia, sendo aqui responsável pelo calor, pela atividade biológica, pela forma

ção dos ventos e rios e de todas as reservas de carvão e petróleo. Trata-se do Sol.

As plantas, como a cana-de-açúcar e a mandioca, armazenam energia solar através da fotossíntese. Destas plantas pode-se obter o álcool, que é um combustível renovável, cuja viabilidade técnica e econômica é indiscutível, como podemos constatar através da experiência brasileira na área.

Podemos, no entanto, utilizar a energia solar de uma forma menos indireta, obtendo-se calor ou eletricidade diretamente, aplicando-o em sistemas domésticos., agrícolas ou até industriais.

A captação da energia solar é um problema, pois naturalmente esta energia é bastante difusa e isto onera muito os sistemas de absorção e armazenamento. A tecnologia , entretanto, tem passo a passo conseguido otimizar os sistemas e prevê-se, principalmente no mundo industrializa-do, um grande aumento na participação da energia prove-niente da radiação solar, seja com a realização de projetos ambiciosos, de grandes proporções, como com a proliferação de sistemas familiares com aplicações domésticas.

1.2 - Aproveitamento da Energia Solar

Já disse Melvin Calvin, Prêmio Nobel de Química, que a quantidade de energia solar que atinge a Terra, em dez

dias é equivalente a todas as reservas de combustível conhecidas. Entretanto, a utilização direta dos efeitos térmicos da energia solar, ainda é muito restrita e o principal uso comercial, mesmo em países altamente desenvolvidos, está concentrada no aquecimento de água e de ambientes (em regiões frias) e na secagem de produtos agrícolas, ou seja, típicas aplicações de energia a baixas temperaturas.

No Brasil, o aproveitamento da energia solar direta restringe-se a pequenos investimentos, principalmente de sistemas que utilizam os chamados coletores de baixa concentração. Sistemas de média e alta concentração de radiação solar, constituídos de formas parabólicas ou cilindro-parabólicas não são facilmente encontráveis, salvo em laboratórios de pesquisa.

Há também a possibilidade de se converter diretamente a radiação solar incidente em energia elétrica, por meio das chamadas células fotovoltaicas. Estas unidades, confeccionadas com material semicondutor, apresentam eficiência de conversão variável entre 5 a 12%, dependendo do material empregado (normalmente silício ou sulfato de cádmio).

Uma aplicação bastante interessante para as células fotovoltaicas, é no suprimento de energia elétrica em estações radiotransmissoras remotas.

Com relação a aplicações industriais de energia solar, no Brasil elas são praticamente inexistentes. A utilização de sistemas auxiliares para o pré-aquecimento de

água, por exemplo, para alimentação de caldeiras, reduziria consideravelmente o consumo de BPF nesses processos térmicos. Certamente um dos problemas que deve ter acarretado o engavetamento dos projetos, além do alto custo de implantação, é a exigência de grandes áreas para a instalação dos equipamentos, nem sempre disponíveis nos parques industriais. Esse problema seria parcialmente contornado com a utilização de sistemas de média ou alta concentração de radiação e, neste caso, a desvantagem estaria na necessidade da ocorrência de radiação direta, nem sempre presente.

A seguir apresentaremos algumas aplicações correntes, da energia solar.

1.2.1 - Aquecimento de água

O aquecimento de água, para diversas finalidades, constitui-se numa das mais práticas e eficientes utilizações dos efeitos térmicos da radiação solar.

Sistemas domésticos com coletores não concentradores, ou seja, os mais simples, envolvem cerca de 70 a 80% de todas as aplicações para o aproveitamento da energia solar existentes no mundo.

O sistema mais simples é esquematizado na fig. 1.1 e é constituído por um coletor que capta as radiações solares e um reservatório isolado termicamente. Há também a indicação de um disposi-

tivo auxiliar de aquecimento, quando se deseja manter a temperatura constante no reservatório, mesmo sem insolação.

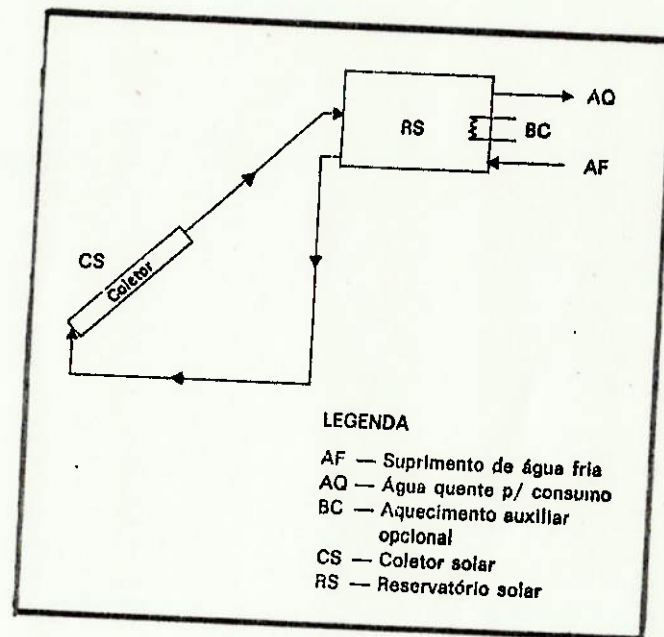


Fig. 1.1 - Esquema de uma instalação solar de aquecimento de água.

A água que circula pelo coletor é aquecida e, por convecção natural, sobe até o reservatório, provocando a circulação da água. Este sistema é denominado termossifônico e a circulação pode também ser em circuito fechado, sendo o calor extraído por meio de um trocador de calor como vemos na fig. 1.2.

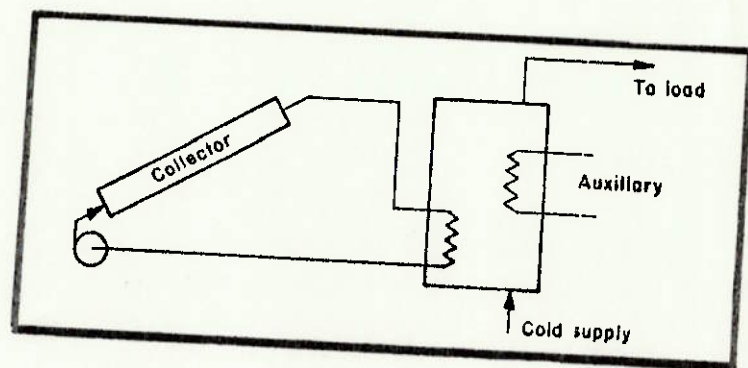


Fig.1.2 - Aquecedor solar com circulação forçada.

No circuito secundário do trocador de calor pode circular água ou outro fluido qualquer, ou ainda operar como fonte quente para determinado processo térmico.

Pode-se também utilizar diretamente o ar atmosférico como fluido de trabalho, forçando-o por meio de ventiladores no interior dos coletores. Uma instalação desse tipo seria mais leve e simples e com menor ocorrência de problemas devidos a corrosão, mas tem aplicações mais restritas, notadamente relacionadas à calefação de ambientes (não muito comuns no Brasil) e na secagem de produtos agrícolas que será analisada posteriormente.

Uma outra forma de aquecer água é através do tanque solar ("solar pond"). Trata-se de um re cipiente com aproximadamente 1m de profundidade, contendo água com uma concentração variável de sais dissolvidos. Dessa forma, há um gradiente de concentração e um gradiente de temperatura inverso ao normal, de forma que não há convecção de água. A temperatura no fun do é maior e o calor pode ser extraído através de um trocador de calor.

1.2.2 - Secagem Solar

A secagem pode ser por exposição direta à ação dos raios solares ou por meio de secadores solares, os quais têm aplicação maior na secagem de frutas, carnes, peixes, grãos, etc. .

A secagem de produtos alimentícios consiste em remoção de umidade até um teor máximo tolerável que permita o armazenamento em condições ambientais por longos períodos, sem a perda das propriedades nutritivas. O armazenamento de produtos desidratados tem vantagens no que diz respeito ao baixo custo e simplicidade da operação, em relação a processos como refrigeração, enlatamento e tratamentos com produtos químicos inibidores.

Em função do produto que se deseja secar, a geometria de um secador solar pode mudar muito, mas o princípio de funcionamento permanece.

Na figura 1.3 apresentamos um esquema de um secador solar típico, apropriado à secagem de frutas e produtos agropecuários.

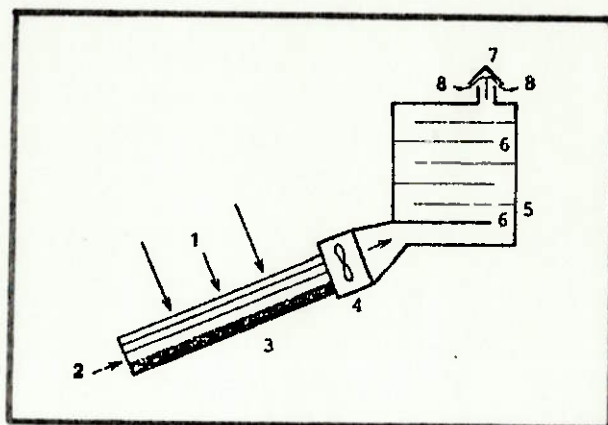


Fig.1.3 - Esquema básico de um secador solar.

O secador da fig. 1.3 possui um coletor solar (3) que aquece o ar admitido em (2) e inclui um ventilador opcional (4). A circulação de ar pode ocorrer naturalmente pelo efeito termossifônico. O silo (5) é dotado de bandejas (6) onde o produto a ser secado é colocado. Note-se que a temperatura no interior do silo pode ser controlada por meio do ventilador.

1.2.3 - Destilador Solar

O destilador é um equipamento adequado às regiões próximas ao mar, desprovidas de rios ou onde a água potável inexista em quantidades satisfatórias em razão da salinidade das reservas naturais do sub-solo.

Um esquema básico de um destilador solar é mostrado na figura 1.4. É composto de um tanque raso, dentro do qual é colocada a água salgada. Há uma cobertura de vidro ou plástico que provocam o efeito estufa, aumentando a temperatura interna.

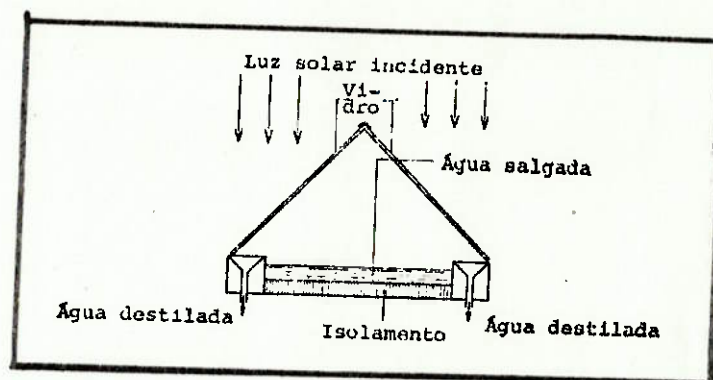


Fig. 1.4 - Esquema de um destilador solar.

Note-se que a utilização de vidro é melhor em relação ao plástico, pois obtém-se um efeito estufa mais intenso e o vapor condensado forma uma fina película que escorre, e no plás-

tico, há a formação de gotas. No fundo do tanque foi colocado um isolamento térmico para reduzir as perdas.

Como se percebe, o princípio de funcionamento do destilador solar é muito simples, no entanto, o custo por litro de água é elevado pois a produção por m^2 de tanque é muito pequena (em torno de $10L/m^2$ dia em condições favoráveis). Portanto, a aplicação do destilador solar é recomendável nos seguintes casos: em regiões de difícil acesso, em locais onde não exista energia elétrica e o combustível é muito caro e nos casos em que os custos sociais justificarem o uso da energia solar.

1.2.4 - Forno Solar

Num forno solar obtem-se altas temperaturas através da concentração da radiação solar sobre uma pequena região. A concentração pode ser feita com espelhos e/ou lentes.

Num sistema de captação central, ou torre solar, normalmente a energia solar é concentrada sobre um fluido de trabalho que servirá a algum processo térmico e no forno solar existe um espaço vazio onde será introduzido o material que terá um processamento a alta temperatura. A temperatura máxima que pode ser atingida, na prática, é da ordem de 4000 K.

O forno solar, assim como o elétrico tem a vantagem de não produzir poluição, ao contrário dos fornos alimentados a lenha ou combustíveis fósseis.

1.2.5 - Refrigeração e condicionamento de ar

Teoricamente, qualquer ciclo convencional de refrigeração pode funcionar com o aproveitamento da energia solar, bastando substituir a fonte de energia pela energia solar.

A utilização da energia solar nos parece bastante adequada ao condicionamento de ar e refrigeração, uma vez que, justamente nos horários, de maior insolação a demanda aumenta, o que é muito interessante em países tropicais.

Nos sistemas de refrigeração por compressão seria necessário transformar previamente a energia solar em mecânica ou elétrica para o acionamento do compressor. Nos sistemas de refrigeração por absorção, é possível aproveitar diretamente os efeitos térmicos da radiação, principalmente nos refrigeradores de pequeno porte, em cujos circuitos a mistura absorvente-refrigerante pode circular em virtude do efeito termossifão dos coletores solares.

2 - O SOL E A RADIAÇÃO SOLAR

2.1 - O Sol

O Sol, basicamente, é uma esfera de gases quentes que pode ser imaginado como um imenso reator onde ocorrem reações de fusão de inúmeros gases. O diâmetro aproximado do sol é de $1,39 \times 10^9$ m e está a cerca de $1,5 \times 10^{11}$ m de distância da Terra.

Na figura 2.1 podemos ver um esquema da estrutura do sol. Estima-se que 90% da energia do sol é gerada na região nuclear, correspondente a um raio de aproximadamente $1,6 \times 10^{10}$ m e que contém 40% da massa solar. A temperatura interna varia e estima-se que esteja entre 8×10^6 a 40×10^6 K. A uma distância do centro, correspondente a 70% do raio, a temperatura cai a 130.000K, juntamente com a densidade que passa de 10^5 Kg/m³ no centro a 70-Kg/m³ nessa região.

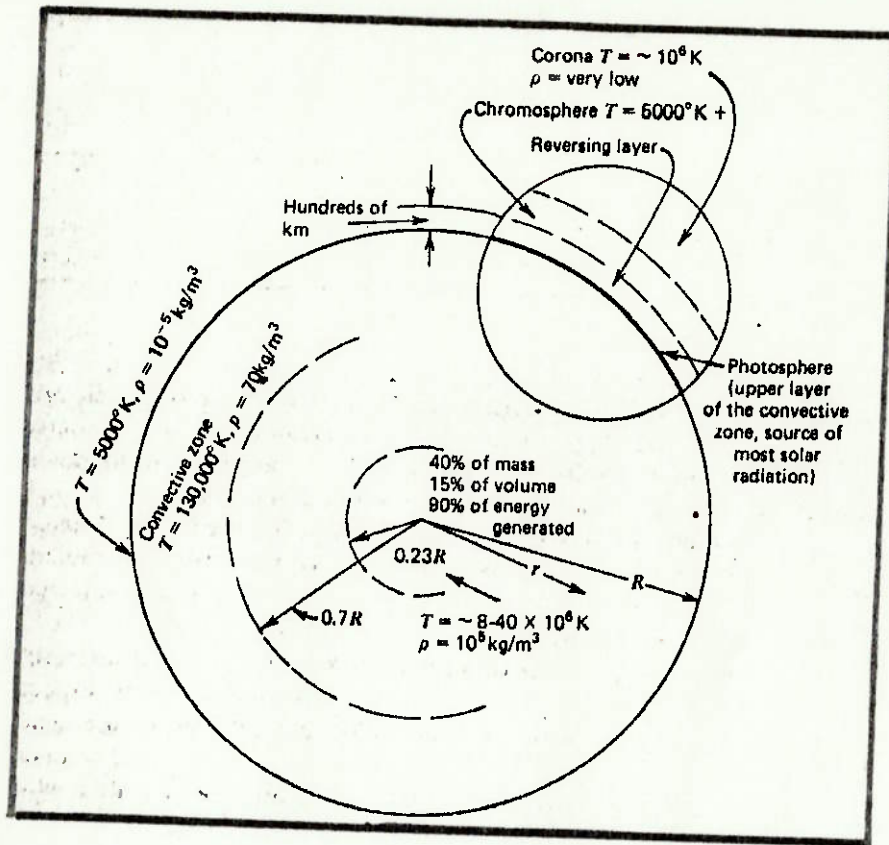


Fig. 2.1 - Esquema da estrutura do sol.

Como vemos na fig. 2.1, essa região próxima a superfície é denominada "zona convectiva", uma vez que nela os processos de convecção começam a tornar-se importantes.

A camada superficial que é a maior fonte de radiação, é denominada "fotosfera" e possui temperatura de cerca de 5000 K. Os gases que compõem a fotosfera são fortemente ionizados e capazes de receber e emitir radiação num espectro contínuo.

Seguem-se ainda outras camadas e a mais externa é a chamada "corona" que apresenta baixa densidade e alta

temperatura (cerca de 10^6 K).

Em função das características particulares de cada camada, o sol emite e absorve radiação em vários comprimentos de onda, no entanto, em algumas aplicações ou cálculos mais simples, o sol pode ser considerado como um corpo negro à temperatura de 5762K.

2.2 - A Constante Solar e Aspectos da Radiação Solar

2.2.1 - A constante Solar

A constante solar é definida como a energia do sol, por unidade de tempo, recebida por uma superfície com área unitária colocada no limite externo da atmosfera, com a Terra na sua distância média do sol.

Atualmente, o valor aceito como constante solar é de 1353 W/m^2 , medido com a utilização de balões e jatos em alta altitude ou até mesmo espaçonaves com erro estimado em $\pm 1,5\%$.

2.2.2 - Geometria Solar

A posição do sol depende, basicamente, de dois movimentos simultâneos pois a terra percorre sua órbita elíptica, completando-a em cada 365,25 dias, e, ao mesmo tempo, gira em torno de seu eixo celestial como um giroscópio. Esse eixo é inclinado de 23,5 graus em relação ao

eixo solar.

Para um observador posicionado na Terra, o ângulo do zênite varia com a latitude do local, a hora do dia e a declinação do sol (ver fig. 2.2).

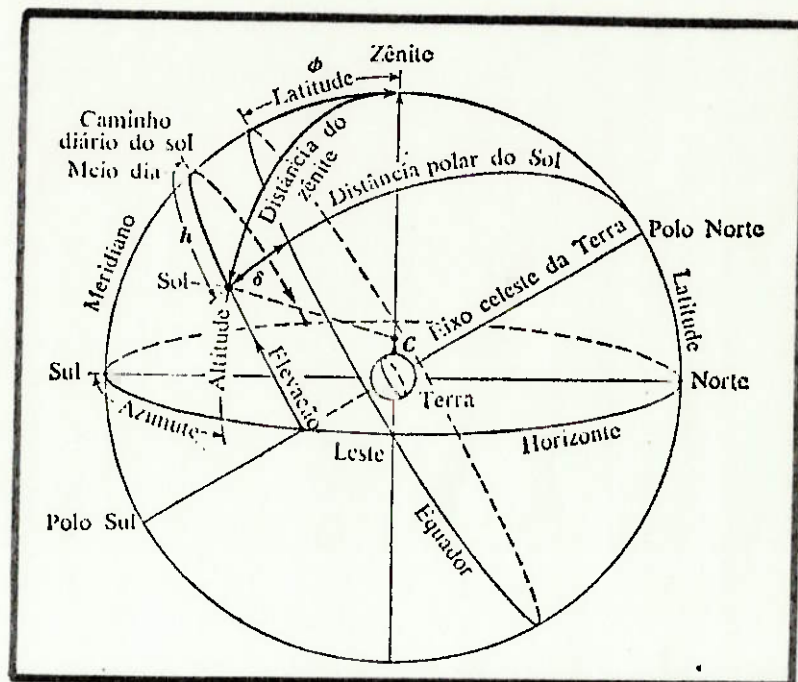


Fig. 2.2 - Esfera celeste e as coordenadas do sol em relação ao observador na Terra.

A latitude é a distância de um ponto na Terra medida a partir do Equador. A hora do dia é expressa em termos do ângulo horário "h", que indica a relação aparente da esfera celeste em torno do eixo terrestre, ou seja, é o ângulo através do qual a Terra deve girar para levar o meridiano de um

local particular diretamente abaixo do sol. A declinação solar δ é a distância angular dos raios solares ao plano do Equador. A declinação solar pode ser calculada por:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + n}{366}\right) \quad (2.2.1)$$

onde n é o número do dia no ano ($n = 1$ para 1º de janeiro). O ângulo é positivo para o hemisfério norte.

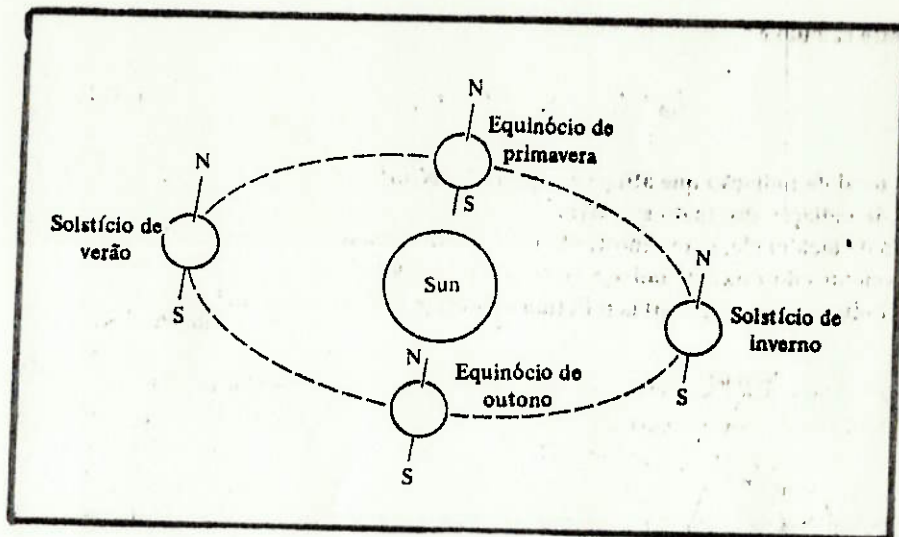


Fig. 2.3 - Revoluções da Terra em torno do Sol.

Devido à oscilação do eixo terrestre em relação ao plano de sua órbita elíptica ao redor do sol, temos as estações do ano. Na fig. 2.3 vemos a posição da Terra no início e fim de cada estação.

2.2.3 - A Radiação Solar

Um conjunto de fatores faz com que a energia que atinge a superfície terrestre não seja igual a constante solar (1353 W/m^2). Estima-se que aproximadamente 30% da energia é refletida pelas camadas superiores da atmosfera. Some-se a isso a parcela que é absorvida por componentes químicos da atmosfera e a parte que é dispersada por nuvens e poeira. Podemos dizer, então, que a Terra recebe energia irradiada do sol sob, basicamente, duas formas: a radiação direta, que atinge a superfície sem ter sofrido dispersão. Essa distinção torna-se importante, na medida em que, por exemplo, os coletores concentradores captam eficientemente apenas a radiação direta, o que não ocorre com os coletores planos.

Em dias muito claros, estima-se que a radiação difusa corresponde a 10 ou 15% da energia total incidente. Em dias encobertos, a maior parte ou a totalidade da radiação será difusa.

A insolação horizontal média mensal sofre alterações durante o ano, em função das variações angulares da superfície terrestre com relação ao sol, além das alterações sazonais do clima que influem sobre as camadas de nuvens. A média diária, no decorrer do mês sofre alte-

rações devido a fenômenos atmosféricos. poluentes e poeiras no ar. O valor médio da insolação horizontal horária, por sua vez, varia durante o dia, principalmente devido a rotação da terra.

Na fig. 2.4 temos um gráfico que representa a variação da energia solar a nível extra-terrestre, durante o ano.

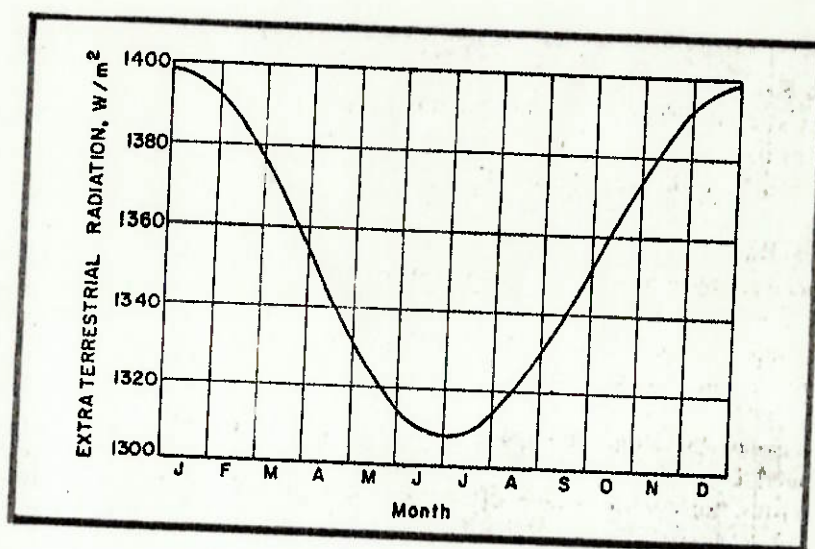


Fig. 2.4 - Variação da radiação solar, durante o ano.

2.2.4 - Radiação em Superfície inclinada

No caso de superfície inclinada e em função de uma posição particular do sol conforme a figura 2.5, temos o ângulo de incidência:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos v + \\ & + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \\ & \cos v \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin v \sin \omega \quad (2.2.2) \end{aligned}$$

onde: φ = latitude do local ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$; sul negativo)

δ = declinação angular

β = inclinação da superfície em relação a horizontal

v = azimute da superfície

ω = ângulo horário

θ = ângulo de incidência que é o ângulo entre a radiação direta e o normal da superfície.

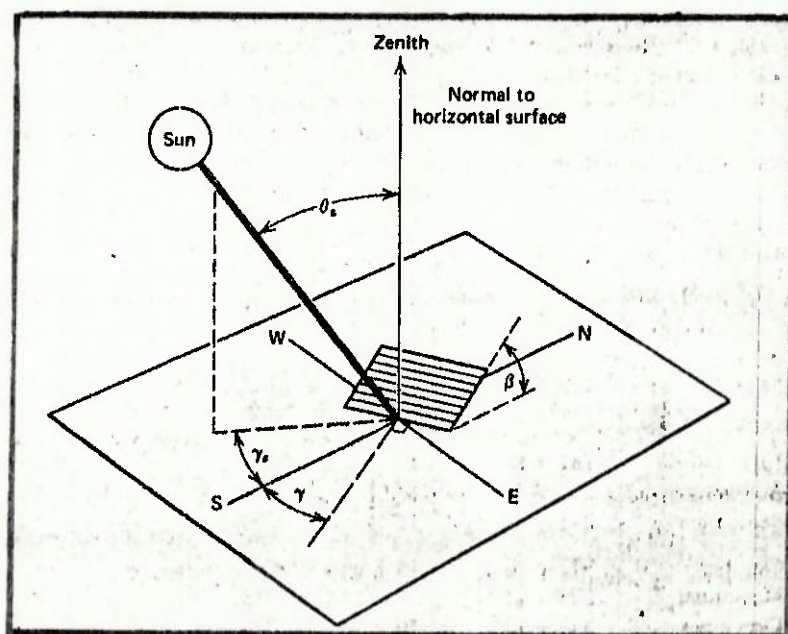


Fig. 2.5 - Ângulos para uma superfície inclinada.

A equação 2.2.2 é geral e, para cada caso particular são possíveis simplificações. Por exemplo, para superfícies horizontais, $\beta = 0^\circ$ e o ângulo de incidência é o próprio ângulo de zênite do sol θ_z .

Temos então:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (2.2.3)$$

Para as aplicações gerais dos processos solares, é necessário conhecer a radiação em superfícies inclinadas. A maioria dos dados disponíveis são de radiação total horária ou diária sobre superfícies horizontais. Entretanto, como podemos ver na figura 2.6, os dados estão correlacionados através do ângulo de incidência.

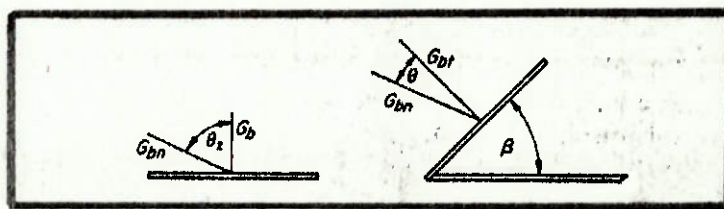


Fig. 2.6 - Radiação direta em superfície horizontal e inclinada.

Podemos ainda relacionar a radiação direta em superfície inclinada (G_{bi}) com a radiação direta em superfície horizontal (G_b), produzindo o fator geométrico R_b .

$$R_b = \frac{G_{bi}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.2.4)$$

Para o hemisfério sul, o ângulo azimutal (ψ) ótimo para coletores planos é de 180° e, portanto:

$$R_b = \frac{\cos(\theta + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\theta + \beta) \sin \delta}{\cos \theta \cos \delta \cos \omega + \sin \theta \sin \delta} \quad (2.2.5)$$

Na tabela 2.1 temos valores de insolação que é a radiação integrada em determinado intervalo de tempo e, no caso, os dados referem-se à insolação diária média em cada mês para São Paulo (Mirante de Santana).

Tabela 2.1 - Insolação média diária em cada mês para superfície horizontal, inclinação de 23º e de 30º.

MES	I_h (KJ/m ² dia)	I ($\beta = 23^\circ$) (KJ/m ² dia)	I ($\beta = 30^\circ$) (KJ/m ² dia)
JAN	24.302	17.305	16.132
FEV	24.721	16.970	15.922
MAR	15.922	16.592	15.713
ABR	17.179	15.042	14.372
MAI	15.922	12.821	12.989
JUN	9.218	11.648	11.816
JUL	8.799	12.277	12.486
AGO	8.799	13.031	13.324
SET	15.084	15.210	14.833
OUT	14.665	16.006	15.545
NOV	14.246	17.053	16.173
DEZ	25.559	17.849	16.928

2.2.5 - Medição de Radiação Solar

No que se refere a medição da radiação solar, temos, basicamente, dois tipos de instrumentos: o piroheliômetro, que mede a radiação direta e o piranômetro, para medição de radiação total hemisférica, geralmente sobre uma superfície horizontal.

O piroheliômetro é de utilização mais complicada, uma vez que deve ficar permanentemente direcionado ao sol, pois possui um tubo colimador que restringe o campo de visão. Já o piranômetro é de fãcil utilização, sendo que a maioria dos dados referentes a energia solar, em todo o mundo, provêm desse tipo de instrumento. Mediante o uso de acessórios adequados, o piranômetro também pode ser usado para determinar apenas a radiação difusa.

3 - COLETORES SOLARES

3.1 - Tipos de Coletores

Um coletor solar nada mais é do que um tipo especial de trocador de calor, no qual ocorre a captação de energia na forma de radiação de uma fonte à longa distância e a transferência dessa energia a um fluido de trabalho. Nos trocadores de calor usuais, ocorre a transferência de calor de um fluido a outro em altas taxas, sendo pouco significativa a parcela devida a radiação.

A energia captada num coletor solar pode ser utilizada no aquecimento de água, para fins domésticos ou industriais, bem como no aquecimento de ar para a secagem de qualquer material (frutas, grãos, etc.).

Em termos gerais, existem dois tipos de coletores: o coletor plano e o coletor concentrador.

Em ambos temos uma superfície ou corpo responsável pela absorção da energia, podendo ou não possuir uma ou mais coberturas de vidro.

Como se sabe, o vidro é transparente à luz visível, mas é opaco à radiação infravermelha. Essa característica favorece um aumento da temperatura no interior do coletor, dotado de cobertura de vidro (ou outro material com essa propriedade), em função do fenômeno denominado popularmente como "efeito estufa".

3.2 - Coletores Planos

O coletor plano é assim designado pois trata-se, basicamente, de uma chapa metálica na qual são soldados tubos que conduzem o fluido a ser aquecido. Via de regra o conjunto é constituído de uma caixa com isolamento na face inferior, abaixo dos tubos, como indicado na figura 3.1, além de possuir cobertura com uma ou mais placas de vidro.

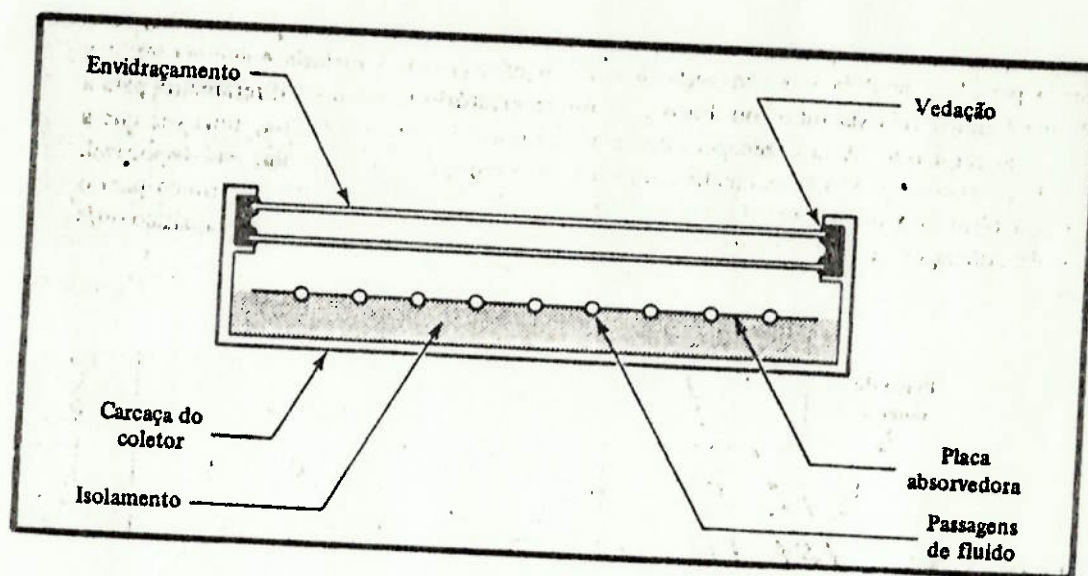


Fig. 3.1 - Secção transversal de um coletor solar plano.

A placa metálica normalmente é confeccionada em cobre devido a alta condutividade térmica requerida e pode ser pintada com tinta preta fosca ou com característica seletiva.

A superfície negra absorvente transfere a energia ao

fluido e as coberturas transparentes reduzem as perdas por radiação e convecção. A camada isolante no fundo da caixa reduz as perdas por condução.

Normalmente esses coletores planos são montados numa posição estacionária com uma orientação otimizada que depende da região e da época do ano.

Os coletores planos são projetados para aplicações e temperaturas moderadas pois são atingidas temperaturas de no máximo 100 °C acima da temperatura ambiente. Uma vantagem desses coletores está no fato de não necessitarem um contínuo rastreamento do sol pois podem captar energia solar na forma direta e difusa. Além disso, os custos de manutenção são bastante baixos em razão de sua simplicidade construtiva.

Quando se necessita de temperaturas maiores, os coletores concentradores são mais adequados.

3.3 - Coletores Concentradores

Nestes coletores, maiores temperaturas são obtidas, uma vez que ocorre uma concentração dos raios, numa superfície absorvedora de menores dimensões. Esta concentração dos raios pode ser obtida por reflexão ou refração e o corpo absorvedor pode ser um tubo através do qual circula o fluido a ser aquecido. Na figura 3.2 temos algumas configurações de coletores concentradores.

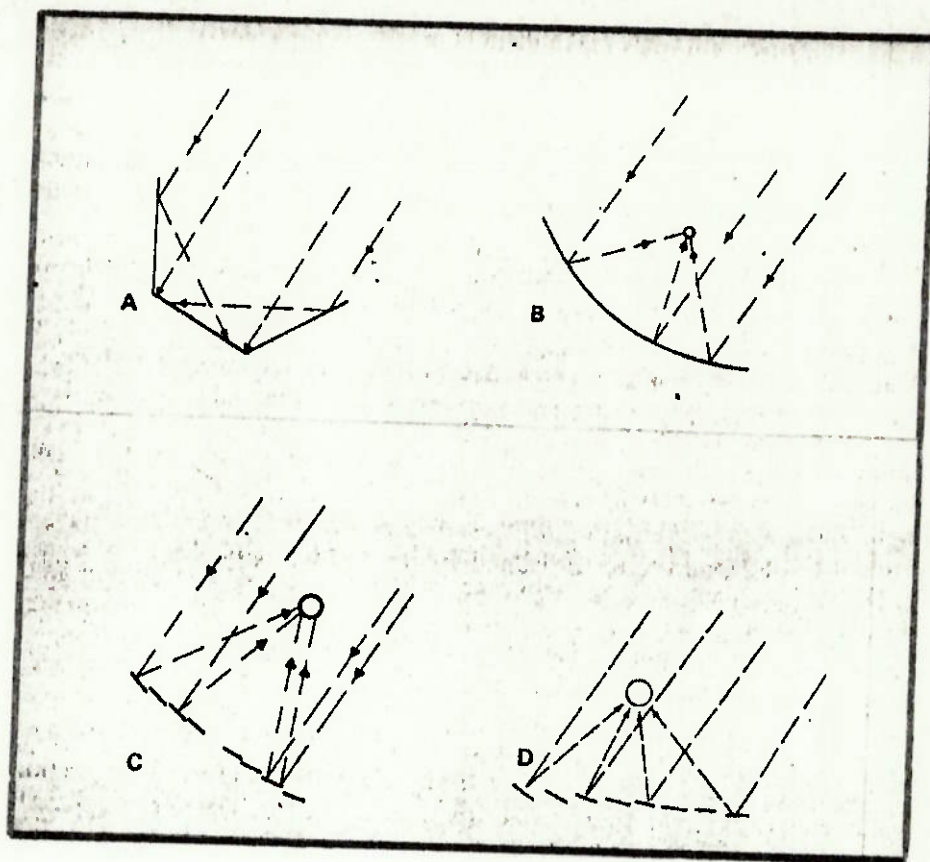


Fig. 3.2 - Algumas configurações utilizadas na concentração da radiação.

Os coletores concentradores apresentam a grande desvantagem de não absorver a radiação difusa e de necessitare de contínua reorientação.

Na figura a seguir (fig. 3.3), nota-se a não focalização dos raios difusores no coletor concentrador, onde os raios refletidos não atingem o corpo absorvedor. Percebe-se também que, no caso do coletor plano, os raios difusos atingem da mesma forma a placa absorvedora.

Diante disso, os coletores concentradores têm aplicação limitada, onde se requer altas temperaturas, pois a construção é mais complexa e necessitam de mecanismos de rastreamento do sol, o que, obviamente, os tornam inviáveis nas aplicações usuais frente aos coletores planos.

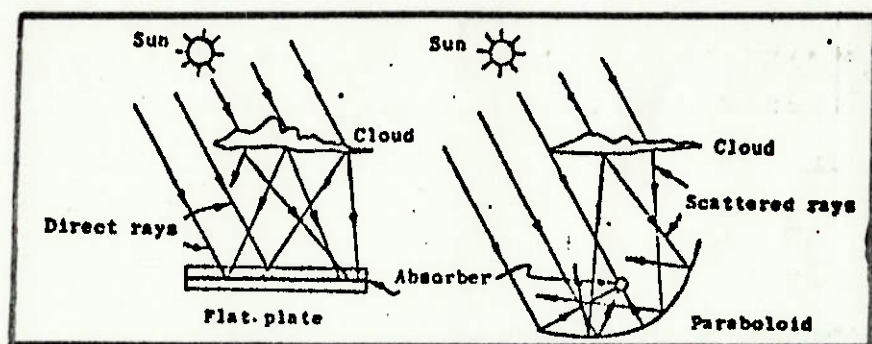


Fig. 3.3 - Aproveitamento da radiação difusa nos coletores planos e concentradores.

Em função do exposto, em nosso trabalho daremos um enfoque mais aprofundado aos coletores planos.

4 - TEORIA DOS COLETORES PLANOS

4.1 - Equação do Balanço de Energia

O que ocorre num coletor plano, pode ser estudado com a aplicação do balanço energético. Podemos relacionar a energia útil fornecida pelo coletor com os parâmetros meteorológicos e os aspectos construtivos (dimensão, materiais) do coletor.

Denominaremos por Q_u a energia útil fornecida e por S a radiação absorvida pelo coletor. Note-se que essa radiação absorvida é a diferença entre a radiação incidente na placa e as perdas por reflexão. As perdas podem ser relacionadas a um coeficiente de transmissão de calor, U_l , que depende do tipo de material isolante e da espessura, além das coberturas utilizadas.

Dessa forma, temos:

$$Q_u = A_c \cdot S = A_c \cdot U_l (T_{p,m} - T_a)$$

ou:

$$Q_u = A_c \{ S - U_l (T_{p,m} - T_a) \} \quad (4.1.1)$$

onde: Q_u = energia útil na saída do coletor

A_c = área do coletor

S = radiação absorvida

U_l = coeficiente de transferência de calor

$T_{p,m}$ = temperatura média da placa

T_a = temperatura ambiente

Basicamente temos que a energia útil na saída do coletor é a diferença entre a radiação solar absorvida e as perdas ocorridas.

O problema da equação (4.1.1) é a determinação da temperatura média da placa absorvedora $T_{p,m}$, que depende das condições do fluido de entrada, de aspectos construtivos do coletor e da radiação solar incidente. Certamente seria muito mais prático se essa equação fosse expressa diretamente como função da temperatura do fluido de entrada. Nas seções seguintes definiremos uma equação nesses termos, a partir da apresentação de um fator de eficiência do coletor que é o fator de remoção de calor.

4.2 - Coeficiente Global de Transferência de Calor

Em condições normais, a placa absorvedora do coletor encontra-se a uma temperatura maior que a do ambiente. Por essa razão, ocorrem perdas de calor por radiação e convecção através das coberturas e, também, por condução através do isolante da base e pelas laterais.

O coeficiente global de transferência de calor U_i é, portanto, a soma dos coeficientes de perdas referentes às coberturas, à base e às laterais.

$$U_i = U_c + U_b + U_l \quad (4.2.1)$$

sendo:

U_c = coeficiente de perda pelas coberturas

U_b = coeficiente de perda pela base

U_l = coeficiente de perda pelas laterais

O coeficiente de perda pelas coberturas é uma fração da temperatura da placa absorvedora, do número de coberturas transparentes e do material usado (vidro ou material sintético), da emissividade da placa absorvedora, da temperatura ambiente e da velocidade do vento. Uma análise mais aprofundada, desse coeficiente, foge dos propósitos desse trabalho. A referência (1) traz diversos gráficos relacionando as diversas variáveis com o coeficiente de perda pelas coberturas, bem como um método de determinação por processo iterativo, além de uma equação empírica.

O coeficiente de perda pela base, pode ser determinado facilmente uma vez que é possível considerar a resistência ao fluxo de calor, toda concentrada no isolamento.

Assim:

$$U_b = \frac{K}{x} \quad (4.2.2)$$

Sendo:

K = condutividade térmica do material isolante

x = espessura do isolante

Com relação às bordas, pode-se relacionar as perdas, com a área do coletor.

Pode-se escrever:

$$U\bar{T} = \frac{(UA)_{lat}}{A_c} \quad (4.2.3)$$

$(UA)_{lat}$ = produto área - coeficiente de perdas das laterais.

A_c = área do coletor

Na equação (4.2.3), o produto área - coeficiente de perdas é determinado, conhecendo-se a condutividade térmica e a espessura do isolante das bordas, além do perímetro e da espessura do coletor.

O coeficiente global de transferência de calor pode, ainda ser determinado através de testes com coletores.

4.3 - Fator de Remoção de calor

Já dissemos que a equação (4.1.1), resultante do balanço de energia no coletor, para efeito de manipulação apresenta uma dificuldade, pelo fato de requerer a temperatura média da placa coletora.

É definido, então, o fator de remoção de calor Fr que relaciona a energia útil real que se obtém do coletor com a energia útil obtida se toda superfície absorvedora estivesse na temperatura do fluido na entrada, ou seja:

$$Fr = \frac{\dot{m} C_p (T_{fis} - T_{fir})}{Ac \{S - U_L (T_{fir} - T_a)\}} \quad (4.3.1)$$

onde:

- \dot{m} = vazão em massa no coletor
- C_p = calor específico do fluido
- Ac = área do coletor
- S = radiação absorvida
- U_L = coeficiente global de transferência de calor
- T_{fis} = temperatura de saída do fluido
- T_{fie} = temperatura de entrada do fluido
- T_a = temperatura ambiente

É intuitivo que a máxima energia que se poderia obter de um coletor solar, seria com toda a superfície absorvedora à temperatura do fluido de entrada. Entretanto, como a temperatura média na superfície é maior que a de entrada, as perdas ao ambiente são maiores, fazendo com que a energia obtida seja minorada.

Portanto, o efeito do fator de remoção de calor Fr é reduzir a máxima energia útil que seria obtida com toda a placa na temperatura do fluido de entrada, até a energia útil real:

$$Q_u = Ac Fr \{S - U_L (T_e - T_a)\} \quad (4.3.2)$$

Na equação (4.3.1), vemos que Fr é diretamente proporcional à vazão em massa de fluido. Isto é razoável, uma vez que um incremento na vazão determinará uma redução na temperatura média da placa absorvedora, o que produz um acréscimo na eficiência do coletor, pois as perdas ao ambiente se reduzem.

4.4 - O Produto Transmissividade-Absortividade

Na equação do balanço de energia (4.1.1), ainda resta um termo que necessita ser melhor especificado. Trata-se da radiação absorvida pela placa absorvedora (S).

Quando a radiação atinge a cobertura do sistema, apenas a parcela referente à transmissividade atinge diretamente a placa absorvedora. A parcela refletida $(1-\alpha)\tau$ atinge novamente a cobertura, retornando a placa absorvedora a parcela $(1-\alpha)\tau\rho_d$. A quantidade α é a absortividade angular da placa absorvedora e τ e ρ_d a transmissividade e a refletividade à radiação difusa da cobertura, respectivamente.

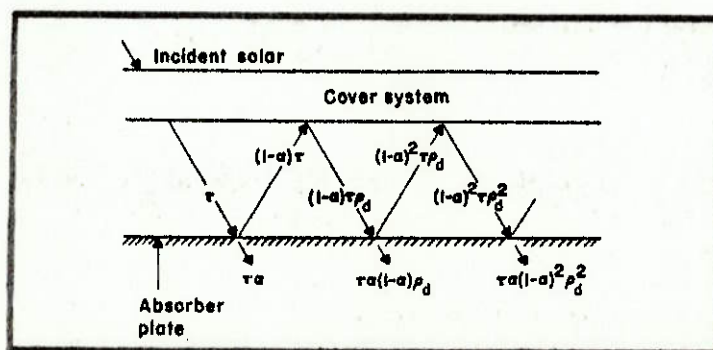


Fig. 4.1 - Absorção da radiação solar pela placa absorvedora.

As reflexões e absorções ocorrem sucessivamente como esquematizado na figura 4.1.

Somando-se as parcelas absorvidas pela placa, temos:

$$(\zeta\alpha) = \frac{\zeta \alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad (4.4.1)$$

A energia absorvida \bar{e} , portanto, uma parcela da radiação incidente G_T , correspondente ao produto $(\zeta\alpha)$. Note-se que a transmissividade e a absortividade dependem do material e do ângulo de incidência da radiação e podem ser calculadas como médias ponderadas das parcelas direta e difusa, da radiação solar.

Nesse ponto convém ainda observar que há a necessidade de se considerar a absorção de energia solar pelo material da cobertura. Define-se o produto transmissividade-absortividade efetivo que pode ser aproximado, segundo a referência (1) por:

$$(\zeta\alpha)_e = 1,02 \zeta\alpha \quad (4.4.2)$$

Para efeito de simplificação, o índice e será suprimido nas próximas equações.

Podemos então reescrever a equação (4.3.2):

$$Q_u = A_c Fr\{G_T.(\zeta\alpha) - U_L(T_e - T_a)\} \quad (4.4.3)$$

onde G_T é a energia solar por unidade de tempo sobre o coletor, por unidade de área.

Na prática, os produtos $Fr(\tau\alpha)$ e $Fr U_i$ podem ser obtidos através de testes padronizados de coletores.

4.5 - Testes de Rendimento de Coletores

Os coletores podem ser testados segundo procedimentos muito bem especificados em norma, em condições representativas de utilização real.

Basicamente o teste consiste em se expor o coletor à radiação solar e medir as temperaturas de entrada e saída de fluido. A energia útil (Q_u) é dada por:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_s - T_e) \quad (4.4.4)$$

Sendo \dot{m} o fluxo de água pelo coletor e C_p o calor específico da água.

A eficiência instantânea do coletor corresponde à relação entre a energia útil obtida e a energia total irradiada sobre o coletor.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} \quad (4.4.5)$$

Temos, então:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_c G_T} \quad (4.4.6)$$

Agora, escrevendo em função da equação (4.4.3) temos:

$$\eta = \frac{A_c Fr \{ G_T (\zeta \alpha) - U_l (T_e - T_a) \}}{A_c G_T}$$

$$\eta = \frac{Fr(\zeta \alpha) - Fr U_l (T_e - T_a)}{G_T} \quad (4.4.7)$$

Portanto, dada uma condição de vazão de fluido, medindo-se as temperaturas e a radiação incidente obtem-se um valor de rendimento instantâneo. Os valores de rendimento são plotados num gráfico cujos pontos correspondem a $\frac{(T_e - T_a)}{G_T}$ na abscissa, como vemos na figura 4.2.

G_T

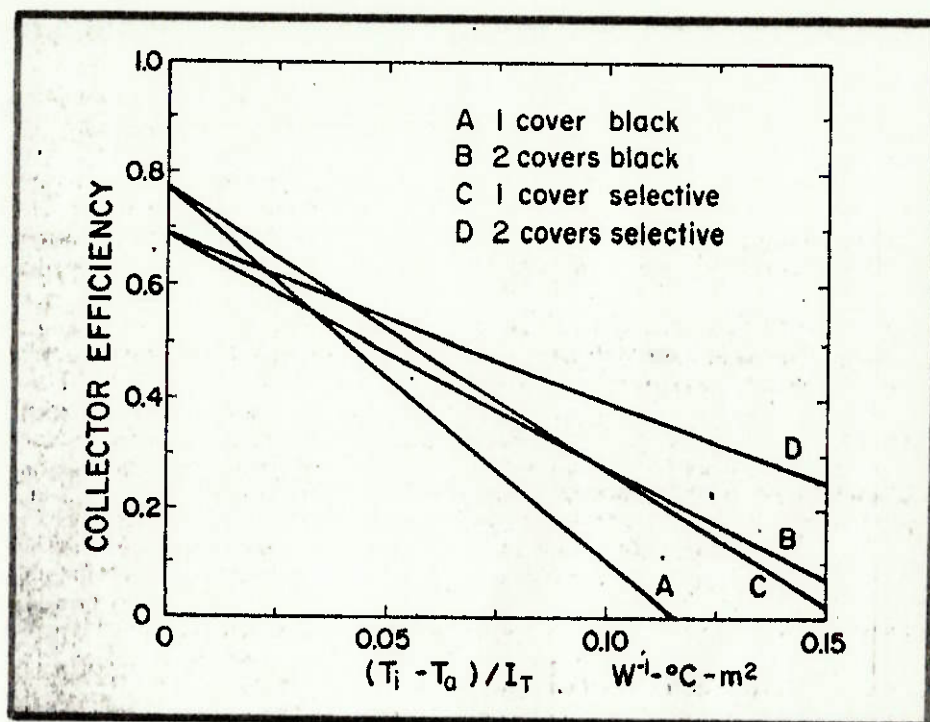


Fig. 4.2 - Resultados de Testes em 4 Coletores diferentes

Como vemos, os resultados se constituem em retas com inclinação igual a $-FrU_L$ e intersecção da reta com o eixo vertical sobre o valor de $Fr(\zeta\alpha)$.

Estes parâmetros, como veremos nas seções seguintes, serão muito úteis na avaliação de sistemas de aquecimento pelo método F_{Chart} .

Nos ensaios, normalmente obtém-se pontos com um certo espalhamento em relação à reta, fruto da variação de U_L (coeficiente global de transferência de calor) com as condições de vento. Além disso, podem ocorrer variações nas proporções relativas das radiações direta, difusa e reflexão da terra. A temperatura ambiente e a inclinação do coletor são, também, fatores de influência.

4.6 - Efeito da Orientação do Coletor

Como se percebe, através de ensaios não são obtidos os valores individuais de Fr , ζ e α . Isto, entretanto, não se constitui em problema pois, normalmente, utiliza-se o produto dos três parâmetros. Este produto, obtido de ensaios, corresponde a valores de transmissividade e absortividade para radiação normal ao coletor, o qual denotaremos por $Fr(\zeta\alpha)_n$.

Na fig. 4.3 podemos ter uma idéia de como varia o produto com o ângulo de incidência, através do parâmetro K que é a relação entre o produto transmissividade-absortividade para um certo ângulo de incidência e para a incidência normal.

$$K = \frac{(\zeta\alpha)}{(\zeta\alpha)_n}$$

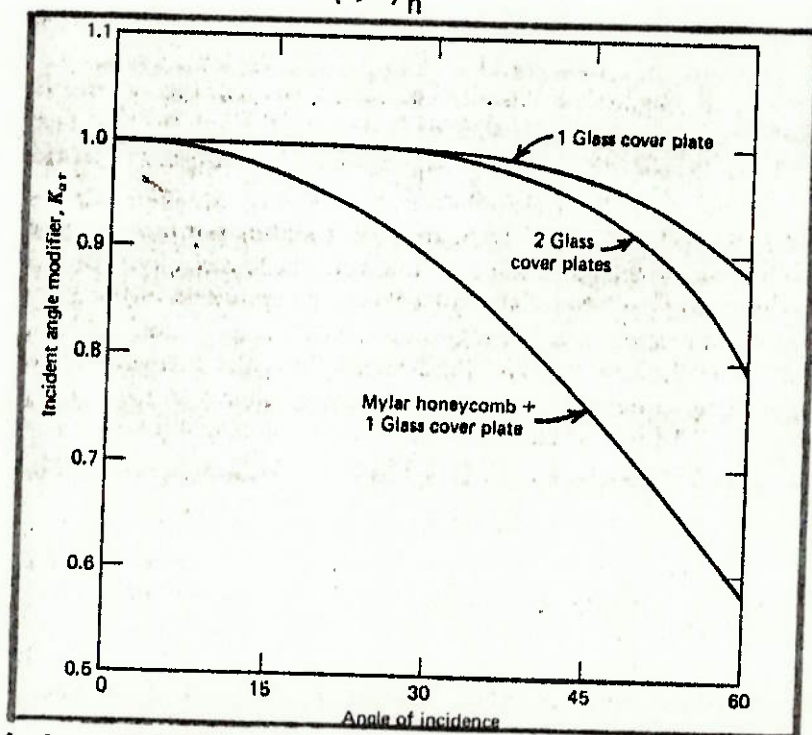


Fig. 4.3 - Modificador do ângulo de incidência K em função do ângulo de incidência para três coletores diferentes.

Na prática, quando o coletor é inclinado do valor da latitude e mais ou menos 15 graus, usa-se como valor de K , 0,96 para coletores de cobertura simples e 0,94 para os coletores com duas coberturas.

Com relação à inclinação ótima para o coletor, conforme podemos ver na figura 4.4, orientando-se o coletor com um ângulo correspondente à latitude mais ou menos 15 graus obtem-se os maiores valores da fração da carga térmica suprida pela energia solar.

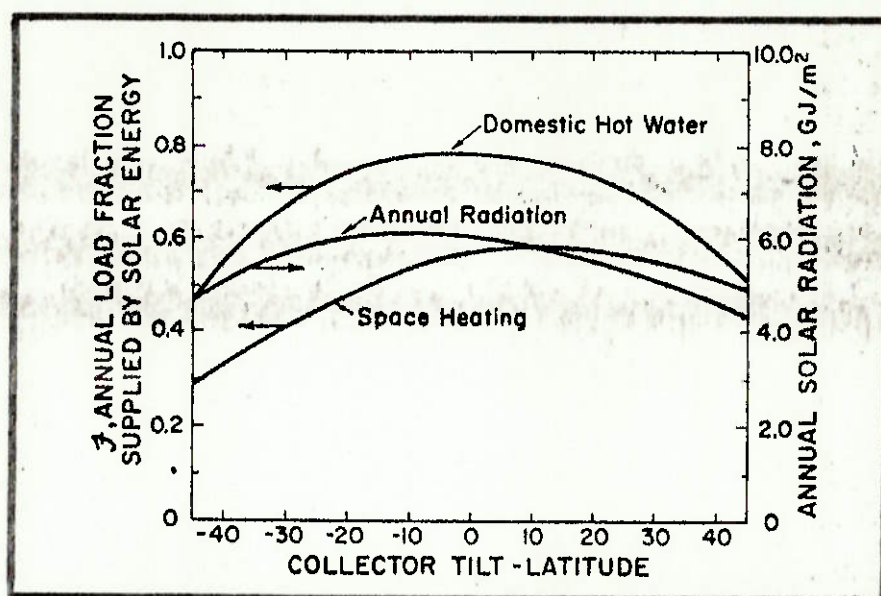


Fig. 4.4 - Efeito da orientação do coletor.

5 - SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Nos países tropicais como o Brasil, são raros os sistemas solares visando o aquecimento de ambientes. Na Europa e em outras regiões com inverno rigoroso, entretanto, são comuns instalações como a representada na figura 5.1.

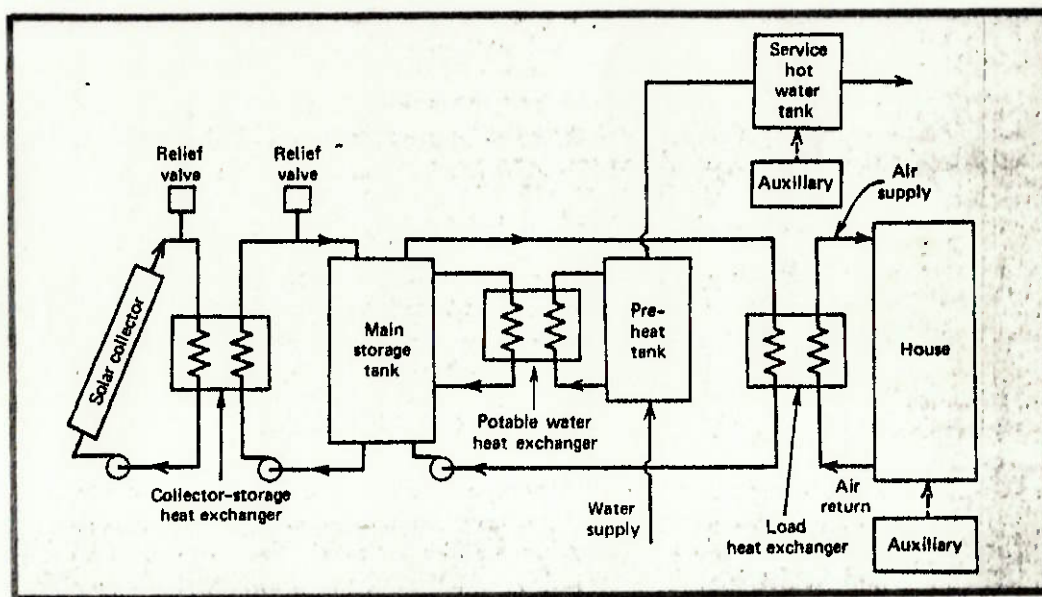


Fig. 5.1 - Diagrama esquemático de uma instalação de aquecimento solar.

A energia captada pelo coletor é armazenada num reservatório de água principal e então, a partir de dois sistemas independentes, temos água aquecida através de um trocador de calor água-água e ar aquecido para o ambiente por meio de um trocador de calor água-ar. Note-se que, nesse sistema, como o fluido de trabalho do coletor tem um circuito fechado, não se misturando à água do reservatório, pode-se utilizar uma solução anticongelante no co

letor, o que é uma providência importante em regiões sujeitas a baixas temperaturas. Uma opção ao problema do congelamento seria a drenagem do coletor nos horários críticos.

5.1 - Configurações Usuais

Normalmente, a demanda de água aquecida não coincide exatamente com a disponibilidade de energia do coletor, a qual é função do horário e de variáveis meteorológicas. Essa questão, aliada a pequena vazão de água aquecida, que um coletor é capaz de fornecer, justificam a necessidade da utilização de um reservatório isolado para o acúmulo de energia.

Na figura 5.2a podemos ver o tipo mais simples de aquecimento de água com coletor solar e reservatório, no qual a circulação de água ocorre por convecção natural. No capítulo 1 denominamos esse efeito de termossifônico. Naturalmente o reservatório deve ser colocado em nível mais elevado, relativamente à saída do coletor.

A figura 5.2b mostra um sistema com circulação forçada de água no coletor e, nesse caso, necessita-se de uma válvula de retenção para que não haja circulação em sentido contrário, evitando-se, por exemplo, perdas de calor do reservatório à noite através do coletor.

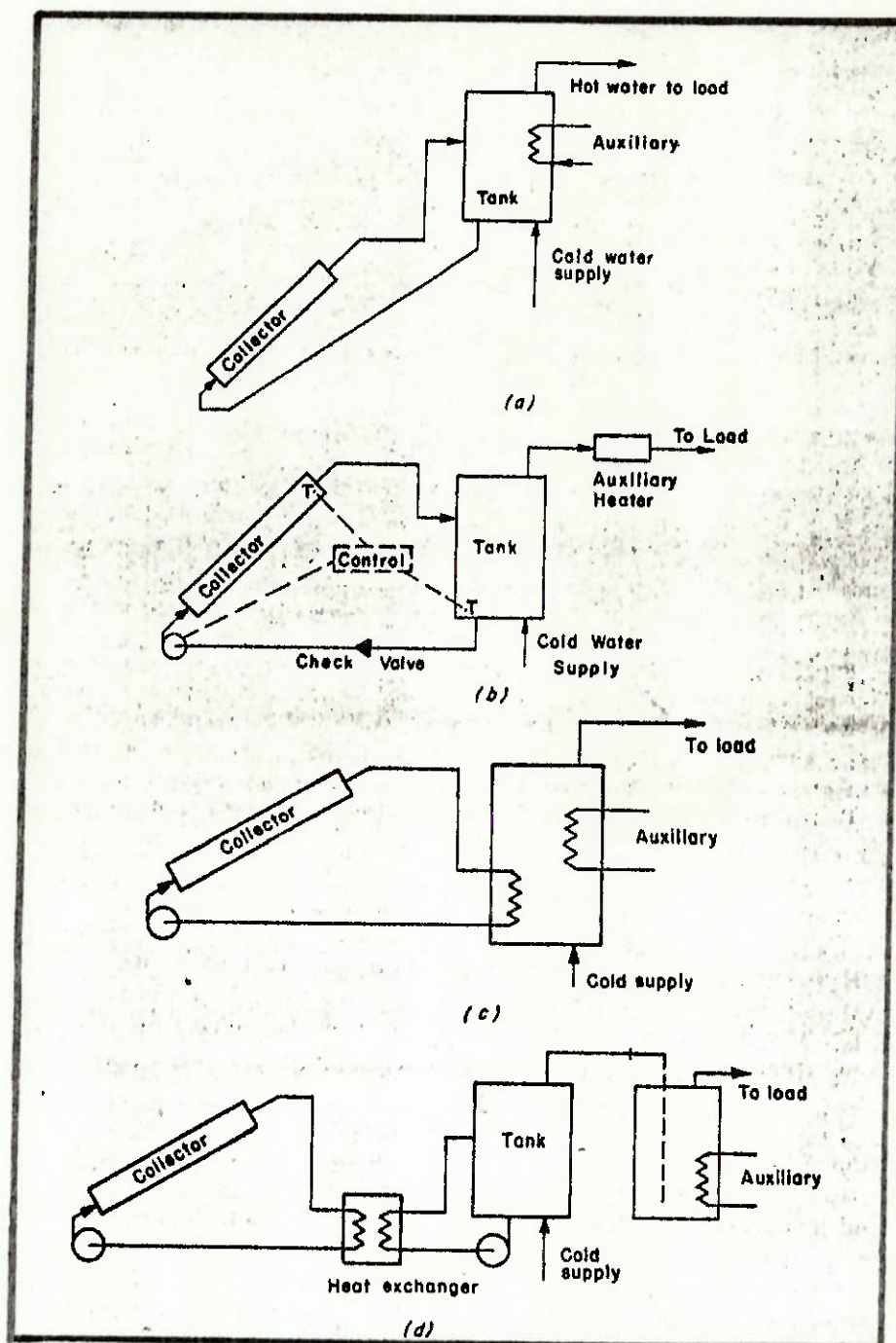


Fig. 5.2 - Configurações usuais de sistemas solares de aquecimento de água. (a) Sistemas termossifônico. (b) Com circulação forçada. (c) Circuito fechado com solução anti-congelante. (d) Circuito fechado com solução anti-congelante e trocador de calor externo.

Nas figuras 5.2c e 5.2d temos sistemas com o fluido do coletor funcionando em circuito fechado, o que possibilita o uso de soluções anti-congelantes e não se corre o risco de rompimento dos tubos do coletor em regiões muito frias.

5.2 - Análise do Sistema Coletor Solar - Reservatório Térmico

Para efeito de equacionamento teórico, vamos analisar a configuração mais simples, fazendo o acoplamento dos resultados já obtidos no estudo do coletor plano no capítulo 4 a um reservatório térmico. Tomamos, ainda, como hipótese a inexistência de estratificação de temperaturas no interior do reservatório, o que simplifica bastante o equacionamento.

Inicialmente vamos reescrever as equações referentes ao coletor plano, com os índices adaptados à figura 5.3.

$$Q_u = A_c F_r \{ G_T (\zeta \alpha) - U_L (T_{ec} - T_{a1}) \} \quad (4.4.3)$$

$$n = \frac{F_r (\zeta \alpha) - F_r U_L (T_{ec} - T_{a1})}{G_T} \quad (4.4.7)$$

$$\text{e } n = \frac{Q_u}{A_c G_T} \quad (4.4.5)$$

$$\text{ou, } Q_u = n A_c G_T$$

onde, de acordo com a figura 5.3:

T_{ec} = temperatura da água na entrada do coletor

T_{a1} = temperatura externa

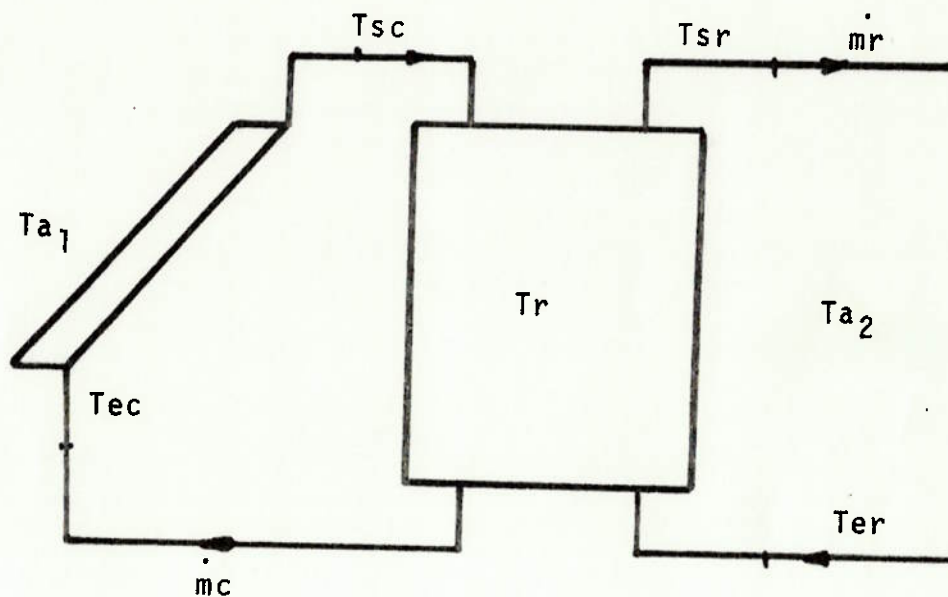


Fig. 5.3 - Sistema coletor solar - reservatório

Para o reservatório, aplicando-se o balanço de energia podemos escrever:

$$\dot{M}_r C_p \frac{d T_r}{dt} = Q_u - L - U_r A_r (T_r - T_{a2}) \quad (5.2.1)$$

Onde o termo à esquerda da equação corresponde à variação da energia interna do reservatório; Q_u , como já sabemos, é a energia útil na saída do coletor; L diz respeito à carga térmica absorvida do reservatório; e a expressão $U_r A_r (T_r - T_{a2})$ representa as perdas de energia do resevatório à vizinhança.

Como se vê na figura 5.3:

T_{sc} = temperatura na saída do coletor

T_r = temperatura média no reservatório

T_{sr} = temperatura na saída do reservatório

T_{er} = temperatura na entrada do reservatório

T_{a2} = temperatura no local onde está o reservatório

\dot{m}_c = vazão no coletor

\dot{m}_r = consumo de água

Da equação (5.2.1), com relação a carga térmica L podemos escrever:

$$L = \dot{m}_r C_p (T_{sr} - T_{er}) \quad (5.2.2)$$

Agora reescrevemos a equação (5.2.1), substituindo também a expressão da energia útil:

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{1}{M_r C_p} \left[Fr(\zeta\alpha) A_c G_T - Fr U_L (T_{ec} - T_{a1}) - \right.$$

$$\left. \dot{m}_r C_p (T_{sr} - T_{er}) - U_r A_r (T_r - T_{a2}) \right] \quad (5.2.3)$$

Esta equação, quando integrada em intervalos de tempo convenientes (por exemplo em intervalos de 1 hora), e com a disponibilidade de dados de radiação para o intervalo escolhido, permite a simulação matemática da variação da temperatura média da água do reservatório.

No capítulo seguinte, entretanto, apresentaremos um processo de avaliação de sistemas solares, baseado em valores médios de intervalos de tempo maiores.

6 - O MÉTODO F-CHART

O método F-Chart foi desenvolvido especificamente para o dimensionamento de sistemas para aquecimento de ambientes e água para fins domésticos, nos quais o consumo durante o dia tem, aproximadamente, a característica da distribuição indicada na figura 6.1.

Através desse método pode-se estimar a fração da carga térmica total que o conjunto de coletores pode suprir, em função da área total dos coletores, do volume do reservatório e, obviamente, das condições de radiação.

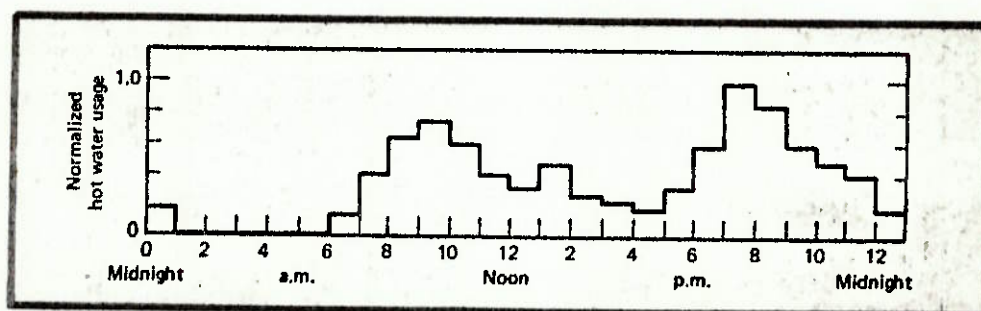


Fig. 6.1 - Distribuição do consumo de água durante o dia.

6.1 - F: A Fração da Carga Térmica Suprida pela Energia Solar

Um balanço energético sobre um sistema de aquecimento solar nos fornece:

$$Q_u - L + E = \Delta U \quad (6.1.1)$$

onde:

Q_u = energia útil fornecida pelo coletor durante um mês

L = carga térmica total mensal

E = energia auxiliar requerida por mês

ΔU = perda de energia na unidade de armazenamento por mês

Usualmente despreza-se a perda mensal de energia no reservatório e, nesse ponto, define-se o parâmetro f .

$$f = \frac{L - E}{L} = \frac{Q_u}{L} \quad (6.1.2)$$

ou seja, f é a fração da carga térmica total no período de um mês que pode ser obtida por meio da captação de energia solar.

Para auxiliar na determinação da razão f , foram determinadas empiricamente dois grupos adimensionais.

$$x = A F r' U_L (T_{ref} - T_a) \Delta t / L \quad (6.1.3)$$

$$y = A Fr' (\bar{\zeta\alpha}) H_T N/L \quad (6.1.4)$$

onde:

A = área do coletor solar

Fr' = fator de eficiência do coletor-trocador de calor

UL = coeficiente global de perda de calor do coletor

Δt = número total de segundos do mês considerado

T_{ref} = temperatura de referência (100°C)

T_a = temperatura ambiente média no mês considerado (°C)

L = Carga térmica total no mês

H_T = valor médio da radiação diária incidente - no coletor no mês

N = número de dias do mês

$\bar{\zeta\alpha}$ = média do produto transmissividade-absortividade do mês

Fisicamente, o valor de x está relacionado à razão entre as perdas no coletor, baseadas na temperatura de referência, e a carga térmica total no período de um mês. Com respeito ao adimensional Y, há uma ligação com a razão entre a energia total absorvida pelo coletor e, igualmente, a carga térmica total do mês considerado.

Para efeito de cálculo, há uma forma mais conveniente

de se escrever as equações (6.1.3) e (6.1.4).

$$x = FrU_L \cdot (Fr'/Fr) \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t \cdot A/L \quad (6.1.5)$$

$$y = Fr(\zeta\alpha)_n \cdot (Fr'/Fr) \cdot \{(\overline{\zeta\alpha})/(\zeta\alpha)_n\} \cdot H_T \cdot A/L \quad (6.1.6)$$

Nestas equações, a razão (Fr'/Fr) varia entre zero e um e se refere à perda na energia útil, proveniente do coletor quando se usa um trocador de calor entre o coletor e o tanque, como se vê na figura 5.1. Diz respeito, portanto, à eficiência do trocador de calor.

Por sua vez, o índice $(\overline{\zeta\alpha})/(\zeta\alpha)_n$, como já vimos na seção 4.6, refere-se às variações no valor do produto transmissividade-absortividade com a inclinação.

6.1.1 - Sistemas com água como fluido de trabalho

Nesses sistemas o coletor aquece água e o calor é armazenado num reservatório de água, podendo servir para o aquecimento de ar para ambientes ou água para consumo, nos moldes da figura 5.1.

A fração f , entre a carga térmica total e a quantidade suprida pelo sistema de aquecimento solar, é relacionada com as variáveis x e y definidas, de acordo com a equação (6.1.7).

$$f = 1,029y - 0,065x - 0,245y^2 + 0,0018x^2 + 0,0215y^3 \quad (6.1.7)$$

para $0 < y < 3$ e $0 < x < 18$

Essa relação pode também ser vista na figura 6.2.

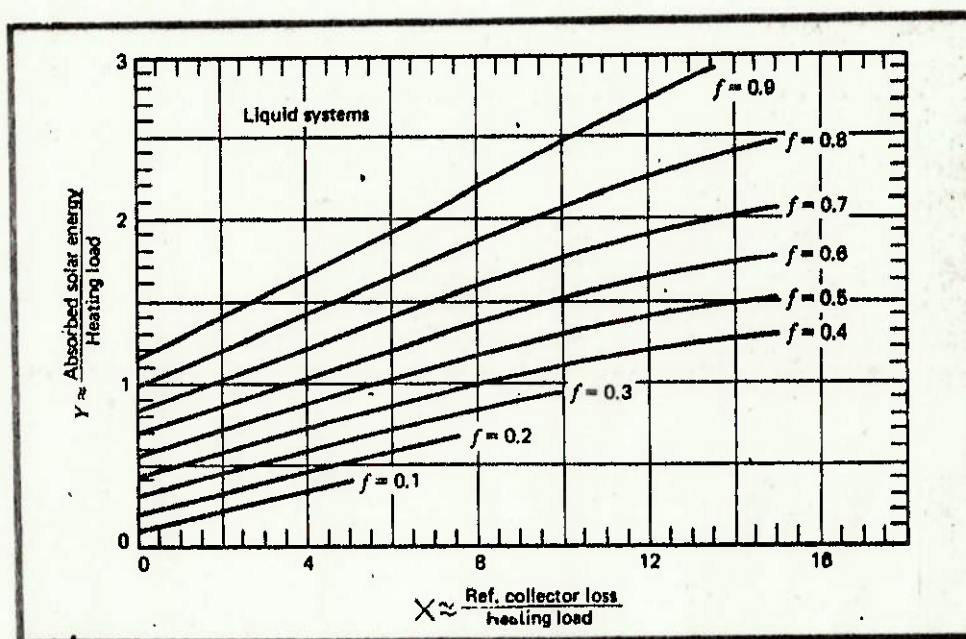


Fig. 6.2 - Fator f como função de x e y .

6.2 - Influência da Capacidade do Reservatório Térmico.

O método F-Chart foi elaborado para reservatórios com capacidade de 75 litros de água para cada metro quadrado de área do coletor. Variações em relação a esse padrão podem ser consideradas por meio de um fator de correção (X_c/X), para a variável X .

$$(X_c/X) = (V/75)^{-0,25} \quad (6.2.1)$$

Sendo a expressão válida para o volume real V entre 37,5 e 300 l/m².

A variação desse fator de correção pode ser melhor observada na figura 6.3.

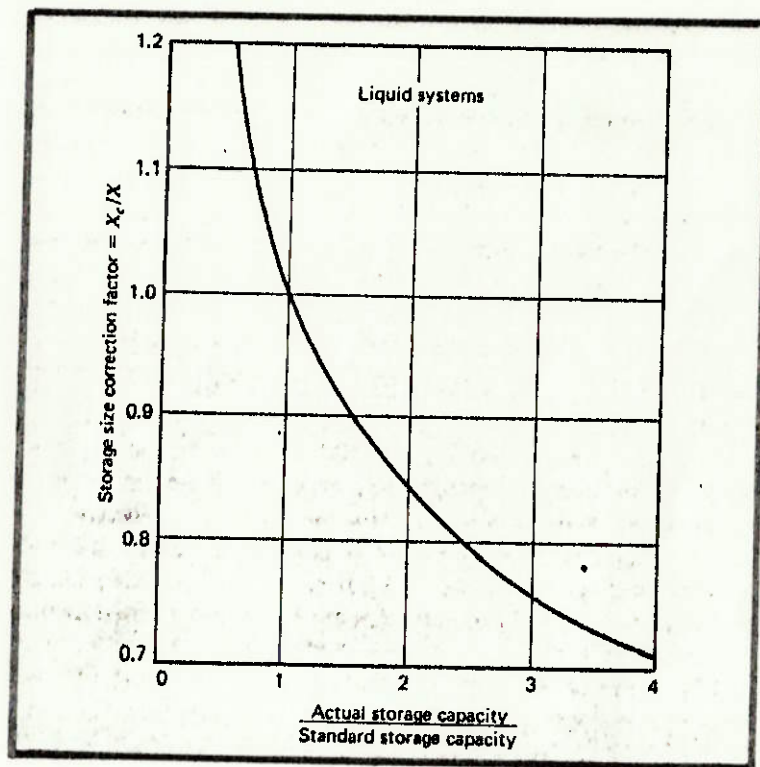


Fig. 6.3 - O fator de correção do tamanho do reservatório

6.3 - Sistemas para Aquecimento Exclusivo de Água

O método F-Chart foi desenvolvido, prevendo-se aquecimento de água e também de ar. Mediante a definição de um novo fator de correção, o método pode ser adaptado para a análise de sistemas, destinados ao aquecimento exclusivo de água.

Para esse caso, segundo as referências (1) e (2), temos:

$$(X_c/X) = \frac{11,6 + 1,18 T_s + 3,86 T_r - 2,32 T_a}{(100 - T_a)} \quad (6.3.1)$$

onde: T_s = temperatura da água de suprimento

T_r = temperatura da água requerida

T_a = temperatura ambiente média do mês considerado

Levando-se em consideração os fatores de correção definidos, vamos reescrever a equação (6.1.5):

$$X_c = Fr U l \cdot (Fr'/Fr) \cdot (100 - T_a) \cdot \Delta t \cdot (A/L) \cdot (V/75)^{-0,25}$$

$$\cdot \frac{11,6 + 1,18 T_s + 3,86 T_r - 2,32 T_a}{(100 - T_a)} \quad (6.3.2)$$

Nessa equação temos, então, incluídos os fatores de correção para variações no volume em relação ao padrão, utilização de trocador de calor na entrada e a adaptação para os casos de aquecimento de água, exclusivamente, cujos sistemas são os de maior interesse nesse trabalho. Nas referências (1) e (2) encontramos tratamentos semelhantes para os sistemas com ar como fluido de trabalho.

No caso da variável Y , na eventualidade de ser usado trocador de calor entre reservatório térmico e ponto de consumo, deve-se considerar a eficiência desse trocador. O fator Y

é alterado pois está relacionado com a carga térmica e esta sofre aumento devido às perdas no trocador.

7 - APLICAÇÃO DO MÉTODO F-CHART

O método F-Chart permite uma estimativa rápida do desempenho de sistemas de aquecimento solar. É produto da correlação dos resultados de centenas de simulações de desempenho de sistemas de pequeno porte.

Visando uma aplicação numérica, escolhemos uma instalação real, cujo porte o enquadraria numa classificação multifamiliar, e não apenas doméstica, para a qual o método F-Chart foi originalmente concebido.

Como estaremos utilizando em nossa aplicação os mesmos dados referentes à carga térmica e insolação que serviram ao projeto original, poderemos comparar os resultados e, mais que isso, verificar a validade dos resultados fornecidos pelo F-Chart, para uma instalação de porte maior. O desempenho satisfatório apresentado pela instalação em seus vários anos de funcionamento, permite-nos utilizar seus parâmetros dimensionais (área de coletor e volume de reservatório) como valores padrão para a verificação dos resultados do F-Chart para sistemas de maior porte.

7.1 - A Instalação

Como exemplo de aplicação foi adotado um projeto já executado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, em 1978. Constitui-se de uma instalação de cunho multifamiliar, especificamente para a Unidade de Triagem 6 da FEBEM, situada à Rua Jupuruchita nº 300, no bairro da Moóca, em São Paulo.

A UT-6 abriga 165 menores do sexo feminino, na faixa etária de 7 a 13 anos e a água aquecida serve, fundamentalmente, para a higiene pessoal, cozinha e serviços de lavanderia.

Pela sua característica multifamiliar, a distribuição da carga térmica apresenta, certamente, semelhanças com distribuição para a qual o método F-Chart foi desenvolvido (vide fig. 6.1).

O relatório "Projeto Energia Solar Para Fins Multifamiliares": Creches, do IPT, traz detalhes da instalação, avaliação da carga térmica e processo de escolha da área de coletores.

A área necessária foi estimada, adotando-se um rendimento térmico para os coletores de 45% e valores médios de insolação e carga térmica. No anexo II apresentamos a Tabela com os valores de carga térmica, insolação média e os resultados para cada mês.

Foi adotada uma área total de 150m^2 e um reservatório

de 6050 l, esperando-se obter 95% da carga térmica total. Nesse caso, a relação volume/área resulta em 40,3 l/m².

7.2 - Avaliação da Carga Térmica

A carga térmica para o sistema é constituída, basicamente, de água quente utilizada na higiene pessoal, lavanderia e cozinha. A energia necessária ao aquecimento da água está associada à vazão utilizada no processo, à temperatura média de utilização e de fornecimento de água.

Estes fatores se relacionam segundo a função:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_u - T_s) \quad (7.2.1)$$

onde: \dot{Q} = potência necessária ao aquecimento (J/dia)

\dot{m} = vazão de água (kg/dia)

C_p = Calor específico da água (4.190 J/Kg°C)

T_u = temperatura de utilização (°C)

T_s = temperatura da água de suprimento (°C)

Normalmente pode-se considerar a água de fornecimento à temperatura ambiente e, com relação à temperatura de utilização, especificamente para a água usada na higiene pessoal, constatou-se que uma temperatura em torno de 54°C na saída dos chuveiros era adequada, obtendo-se conforto térmico no banho. Considerando-se as perdas térmicas na tubulação, adotou-se uma temperatura de 60°C para a água no reservatório.

Note-se que nesse projeto foram adotados esses mesmos valores de temperatura na lavanderia e na cozinha.

O outro parâmetro que determina a carga térmica de um sistema é o volume de água consumido na unidade de tempo, ou seja, a vazão. O consumo de água da Unidade de Triagem foi determinado, experimentalmente, por processos usuais. No caso da lavanderia, foi levantado o número médio de lavagens diárias (6,5 lavagens/dia) e, de posse do volume utilizado em cada operação, chegou-se a um valor médio (\dot{m}_1):

$$\dot{m}_1 = 3.700 \text{ Kg/dia}$$

Para os chuveiros, a vazão foi avaliada coletando-se a água em bureta graduada e medindo-se o tempo em cronômetro. Obteve-se para todo o conjunto de chuveiro um consumo \dot{m}_2 de:

$$\dot{m}_2 = 1.380 \text{ Kg/dia}$$

O consumo na cozinha foi medido por meio de hidrômetro, instalado em local adequado e o valor médio das leituras diárias, efetuadas durante uma semana foi de:

$$\dot{m}_3 = 970 \text{ Kg/dia}$$

Portanto, o consumo médio total \dot{m} foi de:

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$\dot{m} = 6.050 \text{ Kg/dia}$$

Conhecido o calor específico de água:

$$C_p = 4.190 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

e, $T_u = 60^\circ\text{C}$

Temos, aplicando a equação (7.2.1),

$$\dot{Q} = 6.050 \cdot 4.190 \cdot (60 - T_s)$$

$$\dot{Q} = 25,350 \cdot 10^6 (60 - T_s)$$

Sendo \dot{Q} dado em J/dia, para $T_s = T_a$, a temperatura ambiente em $^\circ\text{C}$.

Utilizando-se das temperaturas médias em cada mês, levantadas pelo Instituto Astronômico e Geofísico da USP, temos, na tabela 7.1 os valores das cargas térmicas médias mensais (L) em MJ/mês. As temperaturas médias fazem parte da tabela de dados meteorológicos, reproduzida no anexo I.

Com a somatória das cargas térmicas mensais, temos a carga térmica anual que é de 383.310 MJ/ano.

Tab. 7.1 - Valores de Carga Térmica Mensal em Função da Temperatura Média.

MES	Ta(°C)	\dot{Q} (MJ/dia)	L (MJ/mês)
JAN	21,4	979	30.350
FEV	21,8	968	27.120
MAR	21,1	986	30.570
ABR	18,7	1.047	31.410
MAI	17,0	1.090	33.750
JUN	16,0	1.115	33.450
JUL	15,5	1.128	34.970
AGO	16,5	1.103	34.190
SET	17,0	1.090	32.700
OUT	18,2	1.060	32.860
NOV	19,2	1.034	31.020
DEZ	20,7	996	30.880
TOTAL			383.310 MJ/ano

7.3 - Cálculo da Fração F

De posse das cargas térmicas mensais e das respectivas insolações, falta apenas definir os parâmetros dos coletores e reservatório térmico utilizados.

Com relação ao reservatório, foram desprezadas as perdas por condução. Uma estimativa contida no relatório do IPT revela que essas perdas seriam da ordem de 20 Kcal/hm^2 ou $18,4 \text{ MJ/ano}$ para uma área de troca de calor de aproximadamente 25m^2 . Esse valor é desprezível frente aos quase 400.000 MJ/ano , da carga térmica total.

Os coletores utilizados têm função rendimento:

$$\eta = 0,63 - \frac{6,96 (T_e - T_a)}{G_T}$$

Portanto, os parâmetros $Fr(\zeta\alpha)$ e FrU_L podem ser facilmente determinados de acordo com o procedimento visto na seção 4.5:

$$Fr(\zeta\alpha) = 0,63$$

$$FrU_L = 6,96 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Na instalação, os coletores operam com a mesma vazão de ensaio, ou seja, $1 \text{ l/m}^2\text{min}$ e em nossos cálculos não foram considerados as alterações que ocorrem nos parâmetros, quando são feitas associações.

Como em nossa instalação não há trocador de calor entre os coletores e o reservatório, o fator Fr'/Fr foi considerado unitário. Para a relação $(\overline{\zeta\alpha})/(\zeta\alpha)_n$, em concordância com o critério exposto na secção 6.1, foi adotado o valor 0,96.

Resumindo:

$$FrU_L = 6,96 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$Fr(\zeta\alpha) = 0,63$$

$$Fr'/Fr = 1,0$$

$$(\overline{\zeta\alpha})/(\zeta\alpha)_n = 0,96$$

O cálculo foi feito em duas etapas, sendo inicialmente determinados os valores de X/A e Y/A , para quatro capacidades de reservatório. Foram utilizadas as equações (6.1.5) e (6.1.6) e esses resultados intermediários estão no anexo IV. Nessa tabela estão relacionados, para cada mês, a temperatura média, insolação média, carga térmica e as relações X/A e Y/A para reservatório de 50, 75, 100 e os 40,3 l/m² da instalação original.

Posteriormente, utilizando-se da equação (6.1.7) calculamos a energia suprida pelo sistema de aquecimento solar em cada mês e para diversas áreas de coletores.

No anexo IV, apresentamos as tabelas de f e $f \times L$ para os volumes considerados. Somando-se os valores das colunas $f \times L$ obtem-se a energia anual que o sistema solar pode fornecer. Relacionando estas somatórias -

com a carga térmica total, obtemos o fator f .

A tabela 7.2 resume os resultados obtidos. Temos os valores de f em função da área de coletores utilizada e da capacidade volumétrica do reservatório térmico.

No anexo V incluímos os programas em BASIC, utilizados nos cálculos.

Tab. 7.2 - Valores de f em Função da Capacidade do Reservatório por m^2 de coletor e Área Total de Coletores

$A_c (m^2)$	Capacidade do Reservatório (l/m^2)			
	40,3	50	75	100
100	0,31	0,33	0,36	0,38
120	0,37	0,38	0,41	0,43
150	0,44	0,46	0,48	0,50
170	0,49	0,50	0,53	0,55
200	0,56	0,57	0,59	0,61

7.4 - Conclusão

Quando se dimensiona um sistema de aquecimento com energia solar, geralmente não se espera que toda a carga térmica seja suprida pela energia solar. Um sistema de aquecimento solar visando atender sempre toda a demanda ($f=1,0$), estaria, certamente, superdimensionado para cer

tas épocas do ano. Por questões econômicas, usualmente adotam-se instalações de menores dimensões e são incluídos equipamentos auxiliares que utilizam energia de fontes convencionais, para suprirem o restante da carga térmica nas épocas ou horários de insolação insuficiente.

Como vimos, a parcela da carga térmica que uma dada instalação solar é capaz de suprir é denotada por f (no método F-Chart). A tabela 7.2 mostra os valores de f para as diversas combinações de área de coletores e volume de reservatório térmico obtidos da aplicação do método F-Chart para a instalação proposta.

Observa-se, claramente, que o fator f cresce com a capacidade por m^2 de coletor do reservatório e com a área total de coletores. E esses resultados não trazem surpresas pois é de se esperar um aumento na carga térmica a ser suprida, quando se aumenta a capacidade de armazenamento por m^2 de coletor do sistema, ou seja, o reservatório térmico pode acumular maior quantidade de energia nas horas de maior insolação e menor demanda.

Da mesma forma, é intuitiva a idéia de que um aumento na área total de coletores desencadeia um aumento no fator f , simplesmente porque aumenta a energia coletada, em termos totais. Note-se que a área de coletores e o volume do reservatório estão intimamente ligados. Um sistema com grande área de coletores e reservatório de baixa capacidade apresentaria fator f , em média, bai

xo e, numa condição extrema, a disponibilidade de energia teria variação sincronizada com os níveis de insolação.

O método F-Chart forneceu, para a nossa aplicação numérica em instalação multifamiliar, valores de f baixos, numa faixa entre 0,31 e 0,61. E, especificamente para a área e o volume da instalação real (150m^2 e $40,3 \text{ l/m}^2$)-obtivemos $f = 0,44$, que consideramos muito baixo quando se constata que, na realidade a carga térmica suprida é muito próxima dos 95% previstos no projeto original.

A conclusão é que, para instalações destinadas exclusivamente ao aquecimento de água e carga térmica maior - que os valores usuais para aplicações familiares, mesmo com distribuição de consumo característica de aplicação doméstica, o método F-Chart tende a superdimensionar a instalação.

8 - BIBLIOGRAFIA

- Ref.1 : DUFFIE, John A., BECKMAN, Willian A.,
Solar Energy of Thermal Processes,
John Wiley & Sons, New York, 1980
- Ref.2 : BECKMAN, Willian A., KLEIN, Sanford A.,
DUFFIE, John A.,
Solar Heating Design. By the F-Chart Method,
John Wiley & Sons, New York, 1977
- Ref.3 : COMETTA, Emílio,
Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos,
Ed. Hemus Ltda., 1982
- Ref.4 : LUIZ, Adir M.,
Como Aproveitar a Energia Solar,
Edgard Blucher Ltda., 1985
- Ref.5 : STOECKER, Wilbert F., JONES, Jerold W.,
Refrigeração e Ar Condicionado,
McGraw-Hill, São Paulo, 1985
- Ref.6 : KREITH, Frank,
Princípios da Transmissão de Calor,
Edgard Blincher Ltda., 1969
- Ref.7 : Revista "São Paulo - Energia"
nº 23, Março, 1986
- Ref.8 : Revista "São Paulo - Energia"
nº 27, Julho, 1986

Ref.9 : Revista "Energia"

nº 41/42, Jan/Abril, 1986

Ref.10: Relatório "Projeto Energia Solar para Fins Multifamíliares: Creches", vols. I e II, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT , 1978.

9 - ANEXOS

- I - Elementos Meteorológicos - Instituto Astronômico e Geofísico.
- II - Tabela Resultados - Carga Térmica, Insolação e Área-IPT.
(Rel. do IPT - tab. 2.6)
- III - Temperatura Ambiente, Radiação e Carga Térmica
Valores de X/A e Y/A
- IV - a) Valores de f e $f \times L$ para $V = 40,3 \text{ l/m}^2$
b) Valores de f e $f \times L$ para $V = 50 \text{ l/m}^2$
c) Valores de f e $f \times L$ para $V = 75 \text{ l/m}^2$
d) Valores de f e $f \times L$ para $V = 100 \text{ l/m}^2$
- V - Programas em BASIC para o cálculo de
 X/A , Y/A , f e $f \times L$

A N E X O I

Elementos Meteorológicos
Instituto Astronômico e Geofísico



Universidade de São Paulo
Instituto Astronômico e Geofísico

EM-CT 07/86-04

Av. Miguel Stefano, 4200
Tel. 275-5392 275-3826
Caixa Postal 30 627
01000 São Paulo, SP

ELEMENTOS METEOROLÓGICOS REGISTRADOS NO PARQUE DO ESTADO, BAIRRO DA ÁGUA FUNDA - S.PAULO-SP, fornecidos ao IPT -Div. de Eng. Mecânica - Grup. de Eng. Térmica.

Mes	Temp.média	Temp.Máx.	Temp.Mín.	UR média	UR Máx.	UR Mín.
JAN	21,4	34,6	10,4	81	100	13
FEV	21,8	34,1	12,1	81	100	24
MAR	21,1	33,4	10,1	82	100	14
ABR	18,7	32,0	4,0	83	100	21
MAI	17,0	29,8	1,4	81	100	18
JUN	16,0	29,3	-0,2	79	100	16
JUL	15,5	29,0	-1,1	77	100	10
AGO	16,5	31,4	2,7	76	100	8
SET	17,0	33,5	3,8	80	100	8
OUT	18,2	35,0	6,3	81	100	10
NOV	19,2	34,0	7,4	81	100	9
DEZ	20,7	33,4	10,1	81	100	22

E.: dias típicos horários das temperaturas máximas e mínimas;
e de umidades máximas e mínimas:

Temperatura máxima : 13-14 hs

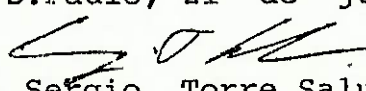
" mínima : 6-7- hs

Umidade Relativa máxima : 6-7 hs

" " mínima : 13-14 hs

Obs.: as temperaturas são em °C , UR: umidade relativa do ar em %.
Todos os valores acima referem-se ao período 1965/1980.

S.Paulo, 21 de julho de 1986


Eng. Sérgio Torre Salum

Respondendo pela Estação Meteorológica

A N E X O II

Tabela Resultados - Carga Térmica, Insolação
e Área - IPT. (Rel. do IPT - tab. 2.6)

TABELA 2.6RESULTADOS

MES	\dot{Q} (kcal/dia)	\bar{I}_p (Kcal/dia m ²)	$\bar{\eta}$	A (m ²)
J	230.505	3850	0,45	133,1
F	227.480	3800	0,45	133,0
M	235.345	3730	0,45	140,2
A	247.445	3430	0,45	160,3
M	261.360	3100	0,45	187,4
J	266.805	2820	0,45	210,3
J	267.410	2980	0,45	199,4
A	261.360	3180	0,45	182,6
S	260.150	3540	0,45	163,3
O	257.730	3710	0,45	154,4
N	246.840	3860	0,45	142,1
D	238.975	4040	0,45	131,5

A N E X O I I I

Temperatura Ambiente, Radiação e Carga Térmica

Valores de X/A e Y/A

MÊS	Nº de dias	Temp. ambient. (°C)	Radiação (H-J/m ² dia)	Carga Térmica (L-J/mês)	V=40,3 1/m ²				V= 50 1/m ²				V= 75 1/m ²				V=100 1/m ²			
					X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A	X/A	Y/A
JAN	31	21,4	16,132x10 ⁶	3,035x10 ¹⁰	0,083	0,010	0,078	0,010	0,071	0,010	0,071	0,010	0,066	0,010	0,066	0,010	0,066	0,010	0,066	0,010
FEV	28	21,8	15,922x10 ⁶	2,712x10 ¹⁰	0,084	0,010	0,080	0,010	0,072	0,010	0,072	0,010	0,067	0,010	0,067	0,010	0,067	0,010	0,067	0,010
MAR	31	21,1	15,713x10 ⁶	3,057x10 ¹⁰	0,082	0,010	0,078	0,010	0,070	0,010	0,070	0,010	0,065	0,010	0,065	0,010	0,065	0,010	0,065	0,010
ABR	30	18,7	14,372x10 ⁶	3,141x10 ¹⁰	0,075	0,008	0,071	0,008	0,064	0,008	0,064	0,008	0,059	0,008	0,059	0,008	0,059	0,008	0,059	0,008
MAI	31	17,0	12,989x10 ⁶	3,379x10 ¹⁰	0,070	0,007	0,066	0,007	0,060	0,007	0,060	0,007	0,056	0,007	0,056	0,007	0,056	0,007	0,056	0,007
JUN	30	16,0	11,816x10 ⁶	3,345x10 ¹⁰	0,067	0,006	0,064	0,006	0,058	0,006	0,058	0,006	0,054	0,006	0,054	0,006	0,054	0,006	0,054	0,006
JUL	31	15,5	12,486x10 ⁶	3,497x10 ¹⁰	0,066	0,007	0,063	0,007	0,057	0,007	0,057	0,007	0,053	0,007	0,053	0,007	0,053	0,007	0,053	0,007
AGO	31	16,5	13,324x10 ⁶	3,419x10 ¹⁰	0,069	0,007	0,065	0,007	0,059	0,007	0,059	0,007	0,055	0,007	0,055	0,007	0,055	0,007	0,055	0,007
SET	30	17,0	14,833x10 ⁶	3,270x10 ¹⁰	0,070	0,008	0,066	0,008	0,060	0,008	0,060	0,008	0,056	0,008	0,056	0,008	0,056	0,008	0,056	0,008
OUT	31	18,2	15,545x10 ⁶	3,286x10 ¹⁰	0,073	0,009	0,069	0,009	0,063	0,009	0,063	0,009	0,058	0,009	0,058	0,009	0,058	0,009	0,058	0,009
NOV	30	19,2	16,173x10 ⁶	3,102x10 ¹⁰	0,076	0,009	0,072	0,009	0,065	0,009	0,065	0,009	0,061	0,009	0,061	0,009	0,061	0,009	0,061	0,009
DEZ	31	20,7	16,928x10 ⁶	3,088x10 ¹⁰	0,081	0,010	0,076	0,010	0,069	0,010	0,069	0,010	0,064	0,010	0,064	0,010	0,064	0,010	0,064	0,010

Temperatura Ambiente, Radiação e Carga Térmica - Valores de X/A e Y/A

A N E X O IV

- a) Valores de f e $f \times L$ para $V = 40,3 \text{ l/m}^2$
- b) Valores de f e $f \times L$ para $V = 50 \text{ l/m}^2$
- c) Valores de f e $f \times L$ para $V = 75 \text{ l/m}^2$
- d) Valores de f e $f \times L$ para $V = 100 \text{ l/m}^2$

	A = 100 m ²		A = 120 m ²		A = 150 m ²		A = 170 m ²		A = 200 m ²	
MÊS	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L
JAN	0,390	1,184x10 ¹⁰	0,450	1,367x10 ¹⁰	0,535	1,622x10 ¹⁰	0,588	1,785x10 ¹⁰	0,667	2,024x10 ¹⁰
FEV	0,387	1,048	0,447	1,212	0,532	1,442	0,586	1,589	0,666	1,806
MAR	0,394	1,203	0,454	1,387	0,538	1,644	0,591	1,805	0,668	2,042
ABR	0,291	0,915	0,342	1,074	0,416	1,306	0,464	1,458	0,537	1,688
MAI	0,241	0,814	0,285	0,964	0,351	1,187	0,395	1,335	0,462	1,562
JUN	0,179	0,599	0,216	0,721	0,272	0,909	0,311	1,039	0,371	1,242
JUL	0,257	0,899	0,302	1,057	0,368	1,287	0,411	1,438	0,475	1,661
AGO	0,245	0,837	0,289	0,990	0,355	1,215	0,399	1,364	0,465	1,590
SET	0,311	1,016	0,362	1,184	0,435	1,423	0,482	1,575	0,550	1,799
OUT	0,365	1,199	0,421	1,385	0,500	1,642	0,548	1,802	0,618	2,032
NOV	0,353	1,096	0,410	1,270	0,488	1,515	0,539	1,670	0,612	1,897
DEZ	0,397	1,226	0,457	1,412	0,541	1,670	0,593	1,832	0,669	2,067
Total = 12,036		Total = 14,023		Total = 16,862		Total = 18,692		Total = 21,410		f = 0,56
f = 0,31		f = 0,37		f = 0,44		f = 0,49		f = 0,56		

f e f x L para V = 40,3 l/m²

f x L em J/dia

MÊS	A = 100 m ²		A = 120 m ²		A = 150 m ²		A = 170 m ²		A = 200 m ²	
	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L
JAN	0,408	1,238x10 ¹⁰	0,468	1,422x10 ¹⁰	0,551	1,671x10 ¹⁰	0,601	1,825x10 ¹⁰	0,674	2,046x10 ¹⁰
FEV	0,401	1,088	0,461	1,250	0,544	1,475	0,596	1,616	0,671	1,819
MAR	0,408	1,247	0,468	1,432	0,551	1,684	0,601	1,839	0,674	2,061
ABR	0,307	0,963	0,358	1,124	0,431	1,354	0,478	1,502	0,547	1,719
MAI	0,257	0,868	0,302	1,020	0,368	1,243	0,411	1,389	0,475	1,605
JUN	0,192	0,642	0,229	0,766	0,285	0,953	0,323	1,080	0,382	1,278
JUL	0,270	0,944	0,316	1,105	0,382	1,336	0,424	1,483	0,486	1,670
AGO	0,261	0,892	0,307	1,050	0,373	1,275	0,415	1,419	0,475	1,638
SET	0,327	1,069	0,379	1,239	0,52	1,478	0,488	1,628	0,563	1,841
OUT	0,381	1,252	0,438	1,439	0,516	1,696	0,563	1,850	0,630	2,070
NOV	0,369	1,145	0,425	1,318	0,503	1,560	0,552	1,712	0,621	1,926
DEZ	0,415	1,282	0,476	1,470	0,558	1,723	0,608	1,878	0,678	2,094
Total = 12,630 f = 0,33		Total = 14,635 f = 0,38		Total = 17,448 f = 0,46		Total = 19,221 f = 0,50		Total = 21,767 f = 0,57		

f x L em J/dia

f e f x L para V = 50 l/m²

	A = 100 m ²		A = 120 m ²		A = 150 m ²		A = 170 m ²		A = 200 m ²	
MÊS	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L
JAN	0,435	1,320x10 ¹⁰	0,496	1,505x10 ¹⁰	0,577	1,751x10 ¹⁰	0,625	1,897x10 ¹⁰	0,690	2,094x10 ¹⁰
FEV	0,431	1,169	0,492	1,334	0,573	1,554	0,621	1,684	0,687	1,863
MAR	0,439	1,342	0,500	1,529	0,581	1,776	0,628	1,920	0,693	2,119
ABR	0,335	1,052	0,388	1,219	0,461	1,448	0,506	1,589	0,570	1,790
MAI	0,282	0,953	0,330	1,115	0,396	1,338	0,438	1,480	0,499	1,686
JUN	0,217	0,726	0,257	0,860	0,314	1,050	0,352	1,177	0,407	1,361
JUL	0,296	1,035	0,344	1,203	0,411	1,437	0,453	1,584	0,512	1,790
AGO	0,287	0,981	0,334	1,142	0,401	1,371	0,443	1,515	0,503	1,720
SET	0,352	1,151	0,402	1,315	0,480	1,570	0,525	1,717	0,586	1,916
OUT	0,405	1,331	0,464	1,525	0,542	1,781	0,588	1,932	0,651	2,139
NOV	0,397	1,231	0,455	1,411	0,533	1,653	0,579	1,796	0,643	1,995
DEZ	0,443	1,368	0,504	1,556	0,585	1,806	0,632	1,952	0,696	2,149
Total = 13,659		Total = 15,714		Total = 18,535		Total = 20,243		Total = 22,622		
f = 0,36		f = 0,41		f = 0,48		f = 0,53		f = 0,59		

f e f x L para V = 75 l/m²

f x L em J/dia

A = 100 m ²			A = 120 m ²			A = 150 m ²			A = 170 m ²			A = 200 m ²		
MÊS	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f x L	f	f	f x L	f x L
JAN	0,455	1,381x10 ¹⁰	0,517	1,569x10 ¹⁰	0,598	1,815x10 ¹⁰	0,644	1,955x10 ¹⁰	0,706	2,143x10 ¹⁰				
FEV	0,451	1,223	0,513	1,391	0,593	1,608	0,640	1,736	0,702	1,904				
MAR	0,459	1,403	0,522	1,596	0,602	1,840	0,648	1,981	0,709	2,167				
ABR	0,357	1,121	0,411	1,291	0,485	1,523	0,530	1,665	0,591	1,856				
MAJ	0,300	1,014	0,349	0,179	0,416	1,406	0,458	1,548	0,517	1,747				
JUN	0,235	0,786	0,276	0,923	0,335	1,121	0,372	1,244	0,427	1,428				
JUL	0,314	1,098	0,364	1,273	0,432	1,511	0,474	1,658	0,533	1,864				
AGO	0,305	1,043	0,354	1,210	0,421	1,439	0,463	1,583	0,522	1,785				
SET	0,370	1,210	0,426	1,393	0,500	1,635	0,545	1,782	0,605	1,978				
OUT	0,427	1,403	0,487	1,600	0,566	1,860	0,612	2,011	0,672	2,208				
NOV	0,414	1,284	0,473	1,467	0,551	1,709	0,595	1,852	0,659	2,044				
DEZ	0,463	1,430	0,526	1,624	0,607	1,874	0,653	2,016	0,713	2,202				
Total = 14,396			Total = 16,516			Total = 19,341			Total = 21,031			Total = 23,326		
f = 0,38			f = 0,43			f = 0,50			f = 0,55			f = 0,61		

f x L em J/dia

f e f x L para V = 100 l/m²

A N E X O V

Programas em BASIC para o cálculo de
 X/A , Y/A , f e $f \times L$

Programa para Calculadora CASIO FX-702P

```

LIST #7
10 INP "NUM.DE DIA
  S",N,"T.RMB.",T
  ,"H=",H,"L=",L
15 M=T
30 X=U*R*8.64E4*M/
  L*(V/75)+-.25*(
  11.6+1.18*M+3.8
  6*M-2.32*T)
40 Y=A*R*K*H*M/L
43 WAIT 20
45 PRT "X/A E Y/A"
50 PRT #.###;X;CSR
  10;Y
55 STOP
60 GOTO 10

```

```

LIST #8
10 INP "X/A=",X,"Y
  /A=",Y,"CARGA T
  ERNICA",L
20 INP "AREA=",E
30 J=X*E
40 I=Y*E
50 IF I≤0 THEN 130
60 IF I≥3 THEN 130
70 IF J≤0 THEN 130
80 IF J≥18 THEN 13
  0
90 F=1.029*I+-.065*
  J-.245*I+2+.001
  8*J+2+.0215*I+3
100 IF F≥1 THEN 130
110 PRT #.###;F;CSR
  10;#.###;F*L
120 GOTO 20
130 PRT "IMPOSSIVEL
  "
140 GOTO 20

```

Armazenar nas memórias os seguintes parâmetros:

$$U = Fr U_L \quad (W/m^2 \varphi C)$$

$$A = Fr (\zeta \alpha)$$

$$K = Fr' / Fr$$

$$K = (\overline{\zeta \alpha}) / (\zeta \alpha)$$

$$W = T_u \quad (\text{temperatura da água no reservatório em } \varphi C)$$

$$V = \text{Volume do reservatório (l/m}^2 \text{ de coletor)}$$