

Roberto Ortega Eboli
Rodrigo Soares Martão

COLETOR SOLAR PARABÓLICO

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção de
Graduação no curso de
Engenharia Mecânica

São Paulo
2003

Roberto Ortega Eboli
Rodrigo Soares Martão

COLETOR SOLAR PARABÓLICO

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção de
Graduação no curso de
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Eitaro Yamane



São Paulo
2003

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio dado durante o meu curso. A minha namorada Vanessa que sempre me auxilio e aos amigos que fiz dentro da universidade e que de alguma forma auxiliaram em meu aprendizado.

Roberto Ortega Eboli

Agradeço à minha família, especialmente meus pais, Valdecir e Maria Izilda, por todo o apoio e esforço para ingressar e durante o meu curso de graduação. Ao meu primo Fábio, pelo auxílio na construção do protótipo, e a todos que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

Rodrigo Soares Martão

Sumário

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1. Introdução	4
2. Fundamentação Teórica	5
2.1 Energia Solar.....	5
2.2 O Sol.....	7
2.3 Radiação Solar.....	9
2.3.1 Radiação direta e difusa.....	13
2.4 Medidas da duração da luz solar.....	13
2.5 Coletores concentradores.....	14
2.6 Sistema de circulação da água.....	16
2.6.1 Sistema de termossifão ou circulação natural	16
2.6.2 Sistema em nível	18
2.6.3 Sistema de circulação forçada ou bombeado.....	19
2.6.4 Sistema de aquecimento complementar.....	19
2.7 Inclinação do coletor.....	20
2.8 Sistema de Tracking.....	22
2.9 Eficiência do coletor.....	23
2.10 Instrumentos para Medição de Radiação Solar	27

2.11	Princípio de funcionamento	28
2.12	Escolha do material	30
2.12.1	Superfícies Seletivas	30
2.12.2	Mecanismo de seletividade.....	31
3	Construção	33
3.1	Definição do coletor.....	33
3.2	Montagem do Protótipo	34
3.2.1	Conjunto móvel – Espelho	34
3.2.2	Estrutura de Sustentação.....	36
3.2.3	Sistema Absorvedor	36
3.2.4	Acessórios.....	37
4	Resultados	39
4.1	Metodologia.....	39
4.2	Formulação Empregada	41
4.3	Análise Hidrostática	42
4.4	Análise Energética.....	43
5	Discussão	48
5.1	Discussão sobre a montagem e construção.....	48
5.1.1	Espelho.....	48
5.1.2	Estrutura Metálica.....	50
5.1.3	Tubo Absorvedor	51
5.1.4	Isolamento Convectivo	52
5.2	Discussão sobre o sistema de tracking	52

5.3	Discussão sobre o sistema de controle e vazão	52
5.4	Discussão sobre a montagem do todo	53
5.5	Discussão sobre os resultados obtidos	54
5.6	Discussão sobre o custo do projeto	55
6	Conclusões	57
7	Referências	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Absortividade para alguns tipos de superfície.....	12
Tabela 2 – Efeitos da inclinação da superfície do coletor.....	21
Tabela 3 – Medições.....	44
Tabela 4 – Teste 1.....	44
Tabela 5 – Teste 2	46
Tabela 6 – Estimativas.....	46
Tabela 7 – Custos do projeto.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do sol.....	7
Figura 2 - Efeitos das condições atmosféricas sobre a radiação solar.....	10
Figura 3 – Heliógrafo Capbell-Stokes.....	14
Figura 4 - Água alimentando o tubo.....	16
Figura 5 - Desenho esquemático do coletor.....	16
Figura 6 - Água aquecida deixando o tubo.....	17
Figura 7 - Inclinação do coletor.....	20
Figura 8 - Maximização da coleta de radiação.....	21
Figura 9 – Ilustração da trajetória diária do coletor.....	22
Figura 10 - Tipos de sistema de controle para o sistema de tracking.....	23
Figura 11 - Modelagem do tubo.....	25
Figura 12 – Piroheliômetro.....	27
Figura 13 – Piranômetro.....	28
Figura 14 - Piranômetro para radiação indireta.....	28
Figura 15 - Superfície seletiva.....	30
Figura 16 - Ilustração do coletor.....	33
Figura 17 – Modelo do conjunto móvel.....	35
Figura 18 - Modelo do sistema absorvedor.....	37
Figura 19 - Modelo do protótipo montado.....	38
Figura 20 – Bomba.....	39

Figura 21 – Gráfico no dia do teste.....	43
Figura 22 – Estrutura de madeira.....	49
Figura 23 - Superfície laminada.....	50
Figura 24 - Estrutura de sustentação.....	51
Figura 25 – Protótipo montado.....	53

Resumo

Este trabalho tem como objetivo projetar e construir um coletor solar parabólico.

Uma parábola de 1,1 m de largura por 1,65 m de comprimento (área plana projetada) foi construída e no foco desta parábola foi fixado um tubo de cobre que é por onde passa o fluido que deve ser aquecido. A energia solar incidente na área normal a parábola, relativamente maior, reflete em uma área muito menor. Desta forma a temperatura do tubo aumenta, junto com a temperatura do fluido.

A variação de temperatura encontrada não suficiente, no entanto a vazão utilizada foi muito grande. Imprecisões na construção da superfície parabólica do coletor fizeram com que não tivéssemos um foco bem definido o que acabou acarretando em perdas.

Abstract

This work has as object of study to design and to construct a parabolic solar collector.

A parabola with 1.1 meters of width for 1.65 meters of length (projected flat area) was built and in its focus was fixed a copper pipe, where a fluid pass through to be heated. The solar energy incident upon the parabola, that has a relative bigger area, is reflected on a smaller surface (of the pipe). Thus, the pipe's temperature grows together with the fluid temperature.

The change of temperature found was not enough, therefore the fluid's flow was very high. Imprecision on the parabola surface made an imprecision focus area, generating losses.

1. Introdução

Neste trabalho trataremos sobre o projeto e construção de um coletor solar parabólico de baixo custo, cuja finalidade é captar a energia solar direta incidente numa área relativamente grande e concentrá-la numa área muito menor, de modo que a temperatura desta última aumente substancialmente.

A primeira parte do trabalho abordará toda a fundamentação teórica relevante para o desenvolvimento do projeto do coletor. Constará desta parte, uma breve descrição sobre a importância da energia solar em nossa sociedade assim como sobre o sol e a radiação solar.

Na segunda parte detalharemos os passos da montagem do coletor, desde a escolha dos materiais, montagem do protótipo e ensaios realizados com o mesmo.

2. Fundamentação Teórica

2.1 *Energia Solar*

Vivemos rotineiramente em contato com a fonte mais expressiva de energia de nosso planeta, e quase nunca consideramos sua importância como solução para nossos problemas de suprimento energético, sem poluir nem ameaçar nosso meio sócio-ambiental. A energia solar é a fonte alternativa ideal, especialmente por algumas características básicas: é abundante, permanente, renovável a cada dia, não polui nem prejudica o ecossistema e é gratuita.

Em meados da década de 1970, a escassez de petróleo e gás natural estimulou nos EUA esforços para obter, com a energia solar, uma fonte produtora de força realmente funcional. Em 1974, o Congresso norte-americano aprovou a lei sobre pesquisa e desenvolvimento da energia solar. A lei autorizava um programa nacional de pesquisa da energia solar, a fim de desenvolver sistemas mais efetivos para captar, concentrar e armazenar a energia do Sol. Esses sistemas deveriam assegurar o uso econômico da energia solar na calefação e refrigeração das habitações e edifícios de escritórios e facilitar aos engenheiros a construção de usinas destinadas a converter a energia solar em eletricidade para uso industrial.

No Brasil, embora a geração de energia solar ainda seja pequena, estima-se que a produção gere anualmente cerca de 20 milhões de megawatts-hora de eletricidade, o suficiente para abastecer 15 mil residências de dois cômodos.

Ainda é pouco, visto que o nosso país é um dos mais ricos no mundo em incidência de raios solares. Alguns municípios do Nordeste, como Petrolina (PE), Floriano (PI) e Bom Jesus da Lapa (BA), por exemplo, recebem intensidade de luz solar comparável à registrada em Dongola, no Sudão, o ponto do planeta onde o Sol incide com maior potência.

Mas consciência ecológica para o consumo de energias limpas e necessidade de abastecer locais remotos, distantes das redes de eletricidade convencionais, não são os únicos fatores de incentivo à energia solar. A descoberta de novas tecnologias, mais racionais e baratas, estão fazendo despencar o custo destes sistemas. A energia solar está se tornando cada vez mais competitiva em relação às hidrelétricas e a tendência é que esse custo de produção diminua ainda mais.

O melhor indício, no entanto, de que a energia solar veio para ficar, foi dado pela Shell, a maior companhia petrolífera do planeta. A empresa prevê que, até o ano de 2050, metade da energia usada no mundo virá de fontes renováveis, como luz solar, ventos, biomassa e água corrente. Entre essas alternativas ao petróleo, ao gás, ao carvão (fontes esgotáveis) e à energia nuclear, a energia solar está entre as mais promissoras. Os números indicam que esse mercado cresce 14% ao ano.

No estágio atual de desenvolvimento, cada metro quadrado de coletor solar instalado permite economizar 55kg de gás liquefeito de petróleo (GLP) por ano ou 66 litros de diesel por ano ou evitar a inundação de cerca de 56m² para a geração de energia elétrica ou ainda eliminar o consumo anual de 215kg de lenha.

2.2 O Sol

Uma grande parte das fontes naturais de energia com que contamos deriva da energia que recebemos do Sol. É este o responsável pelas energias eólica e hidráulica, para citar alguns exemplos.

O Sol, fonte de vida e origem dos outros modos de energia que o homem usou desde o começo da História, pode satisfazer todas nossas necessidades, se aprendermos a aproveitar de um modo racional a luz que continuamente derrama no planeta

Tem brilhado no céu a aproximadamente cinco mil milhões de anos, e calcula-se que ainda não chegou nem a metade de sua existência.

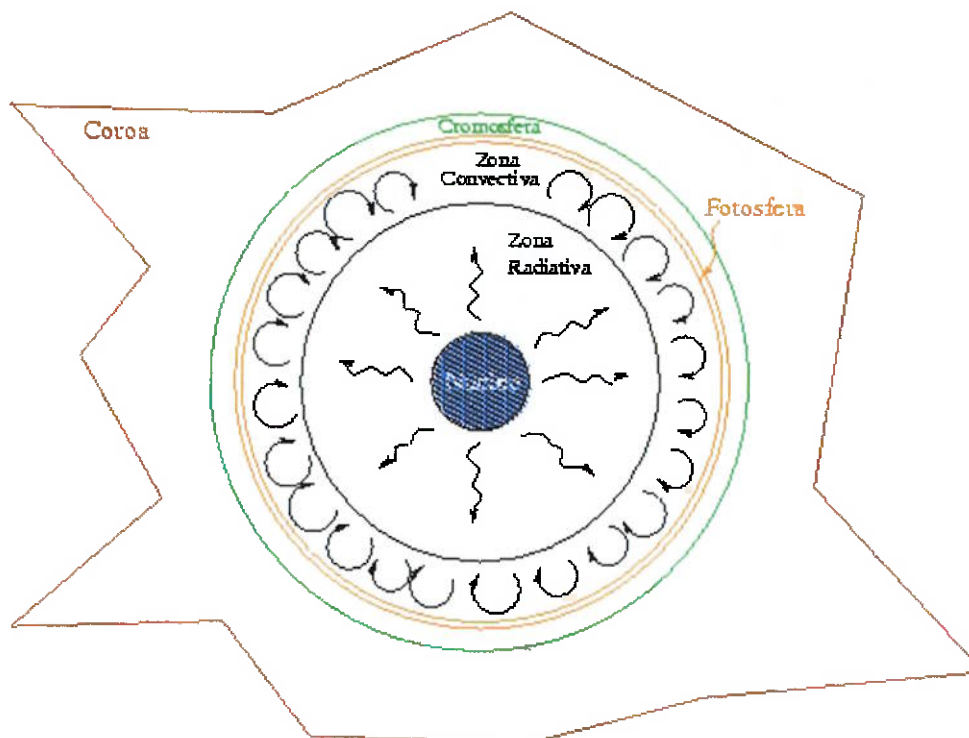


Fig. 1 - Estrutura do sol

O núcleo solar é uma esfera de raio dez vezes menor que o da própria estrela, mas com uma densidade extremamente alta. É nesta região em que a energia é produzida por reações termonucleares.

Acima do núcleo está a zona radioativa onde a energia flui por radiação. Logo acima dessa zona radiativa se localiza a zona convectiva se estendendo por cerca de 15% do raio solar. A camada visível do Sol é a fotosfera, com cerca de 330 km de espessura e temperatura de 5800K.

A cromosfera é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. Ela tem cor avermelhada e é visível durante os eclipses solares, logo antes e após a totalidade. Estende-se por 10 mil quilômetros acima da fotosfera. A cromosfera ou "esfera de cor" é uma camada de gás (principalmente hidrogênio e hélio) que envolve o Sol.

A superfície visível do Sol tem uma temperatura média de 6000 K enquanto a cromosfera atinge temperaturas superiores a 10 000 K. A explicação mais aceita para explicar essa temperatura elevada acima da fotosfera é que parte da energia que deixa a fotosfera é acústica. Isto é, sai da fotosfera como um ruído. Ao atingir a cromosfera essa energia sonora é dissipada em forma de calor. Mas, como os gases nessa região são rarefeitos, essa dissipação é suficiente para elevar a temperatura aos valores observados. Acima da cromosfera está a coroa, também visível durante os eclipses totais. A coroa se estende por cerca de dois raios solares.

Principais características do sol:

Massa = $1,989 \times 10^{30}$ kg

Raio = 696 000 km

Densidade média = 1409 kg m^{-3}

Densidade central = $160\,000 \text{ kg m}^{-3}$

Distância = 1 UA = $1,499 \times 10^8$ km

Luminosidade = $3,83 \times 10^{33}$ ergs/s

Temperatura efetiva = 5785 K

Temperatura central = $1,0 \times 10^7$ K

2.3 Radiação Solar

A Radiação solar é uma forma de radiação térmica com uma distribuição particular de comprimentos de onda. Sua intensidade é fortemente dependente das condições atmosféricas, época do ano e o ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície da terra. No limite externo da atmosfera a irradiação solar total, quando a terra está na sua distância média do sol é 1395 W/m^2 . Este número é chamado de constante solar e está sujeito a alterações em função de resultados experimentais mais precisos.

Nem toda a energia expressa pela constante solar atinge a superfície da terra devido à forte absorção pelo dióxido de carbono e vapor de água na atmosfera. A radiação solar incidente sobre a superfície da terra depende também do conteúdo de poeira e outros poluentes na atmosfera. A máxima energia solar que atinge a superfície da terra ocorre quando os raios incidem perpendicularmente sobre a superfície, pois é apresentado um campo de visão maior ao fluxo solar incidente e os raios solares atravessam uma distância menor através da atmosfera havendo menos absorção do que ocorreria para um ângulo de incidência diferente do normal. A fig. 2 indica os efeitos da absorção atmosférica em uma localização ao nível do mar em dias claros para uma atmosfera com índices moderados de poeira e vapor de água.

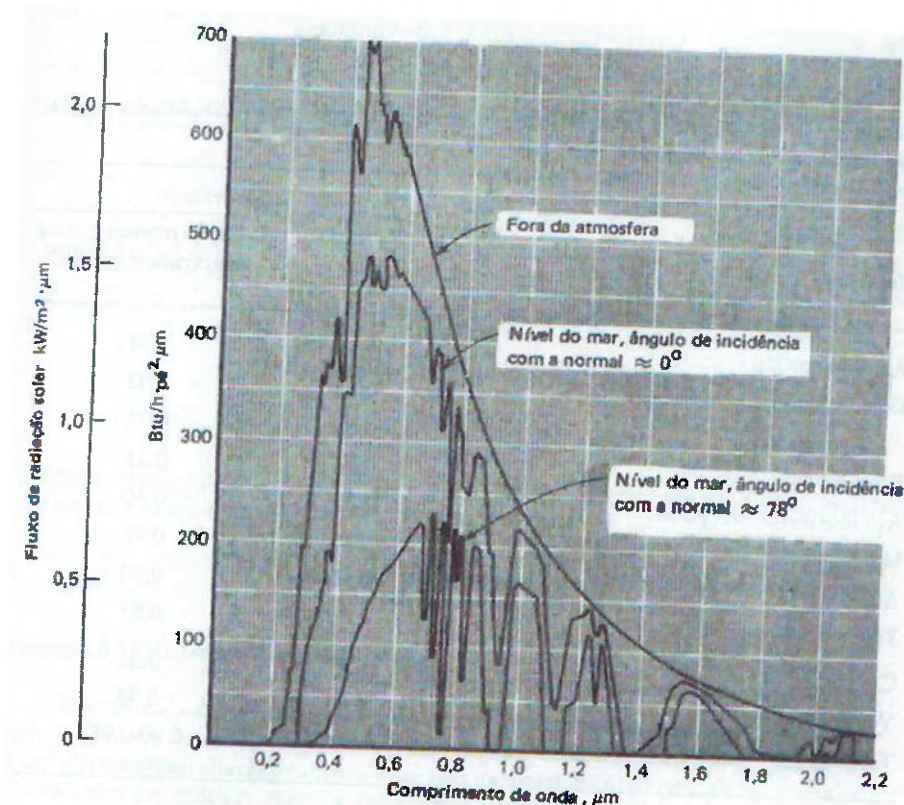


Fig. 2 - Efeitos das condições atmosféricas sobre a radiação solar

Na fig. 2 pode-se notar que a radiação solar que chega até a superfície da terra não se comporta como a radiação de um corpo cinzento ideal, enquanto fora da atmosfera a distribuição da energia tem um comportamento mais próximo do ideal. Para a determinação da temperatura equivalente de corpo negro para a radiação solar devemos utilizar a lei do deslocamento de Wien com o comprimento de onda onde ocorre o máximo fluxo de radiação solar no espectro (cerca de 0,5 μm , de acordo com a fig. 2). Esta estimativa fornece:

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2897,6 \mu\text{m.K} \quad (\text{lei de deslocamento de Wien}) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$T = 2897,6 / 0,5 = 5795 \text{ K}$$

A temperatura solar equivalente para a radiação térmica é, portanto, aproximadamente 5800K.

Se todos os materiais exibissem um comportamento de corpo cinzento, a análise da radiação solar não seria um problema particularmente incomum; entretanto, como a radiação solar está concentrada em uma faixa de pequenos comprimentos de onda, ao contrário da maioria das radiações térmicas provenientes da terra, um determinado material pode apresentar absortividade e transmissividade inteiramente diferentes para os dois tipos de radiação. O exemplo clássico deste comportamento é uma estufa. Um vidro comum transmite muito bem para comprimentos de onda menores que 2 μm ; transmite, portanto, a maior parte da energia solar incidente. O vidro, entretanto, é essencialmente opaco para a radiação com comprimento de onda maior que 3 ou 4 μm . Praticamente toda a radiação emitida pelos objetos no interior da estufa (à

temperatura relativamente baixa) apresenta comprimentos de onda para os quais o vidro é opaco. Portanto, o vidro permite a passagem de mais energia solar do que a proveniente das superfícies internas da estufa, produzindo desta forma o conhecido efeito de aquecimento. A radiação solar absorvida pelos objetos na estufa é dissipada para o ambiente por convecção nas superfícies externas da estufa.

Um comportamento semelhante é observado para absortividade e refletividade a radiação solar ao contrário da radiação em baixas temperaturas de metais opacos e superfícies pintadas. Em muitos casos, a absortividade total para a radiação solar pode ser diferente da absortividade para radiação de corpo negro a uma temperatura moderada como 25°C.

A tabela 1 apresenta uma comparação resumida das absortividades para algumas superfícies típicas para radiação solar e radiação em baixas temperaturas. Pode-se notar a ocorrência de diferenças significativas

<i>Superfície</i>	<i>Absortividade</i>	
	<i>Radiação solar</i>	<i>Radiação térmica a baixa temperatura ~25°C</i>
Alumínio polido	0,15	0,04
Cobre polido	0,18	0,03
oxidado	0,65	0,75
Ferro fundido	0,94	0,21
Aço inoxidável 301, polido	0,37	0,60
Mármore branco	0,46	0,95
Asfalto	0,90	0,90
Tijolo vermelho	0,75	0,93
Cascalho	0,29	0,85
Verniz preto fosco	0,96	0,95
Tintas brancas, vários tipos de pigmentos	0,12-0,16	0,90-0,95

Tabela 1 – Absortividade para alguns tipos de superfície

O intuito desta discussão sobre a radiação solar foi demonstrar as propriedades que devem ser consideradas para a definição dos materiais a serem utilizados na construção do coletor.

2.3.1 Radiação direta e difusa

Quando os raios do sol atingem a atmosfera, a luz se espalha em maior ou menor grau dependendo das condições climáticas. A luz que chega a terra desta forma é conhecida como radiação difusa. Do chão, esta luz parece que vem de todo o céu. Sem esta, o céu pareceria preto.

O que nós normalmente chamamos de brilho do sol, que é a porção de luz que vem direto do sol, é conhecida como radiação direta. Na prática, esta inclui uma certa soma de radiação solar difusa, a qual parece vir do céu da região em volta do sol. Em um dia sem nuvens, a radiação direta pode chegar a uma densidade de 1 Kw/m^2 .

O coletor parabólico aquece a água refletindo a radiação direta que chega do sol, desta forma para o estudo e construção do mesmo, este tipo de radiação é a de maior relevância.

2.4 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 (heliógrafo) usa uma esfera de vidro de aproximadamente 10cm de diâmetro como uma lente que produz uma imagem do Sol na superfície oposta da esfera. Uma tira de papel tratada padronizada é montada 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.



Fig. 3 - Heliógrafo Capbell-Stokes

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 da radiação crítica detectada pelas duas células é uma medida da duração da luz do Sol.

2.5 Coletores concentradores

São assim denominados os coletores que possuem uma superfície de reflexão que irá aquecer um outro dispositivo, dito absorvedor. Há, assim, uma concentração de raios em uma superfície menor, aumentando-se a temperatura de aquecimento do fluido e reduzindo-se as perdas.

O absorvedor poderá ser um tubo no qual escoar um fluido (comumente água) ou algum recipiente, transformando-se neste caso em um sistema de aquecimento de materiais ou mesmo alimentos.

As configurações dos coletores concentradores são bastante diversificadas, tendo-se desde reflexão direta em direção ao absorvedor até a reflexão indireta.

O coletor em estudo pode ser definido desta maneira como sendo do tipo cilíndrico e parabólico, com reflexão direta em direção ao absorvedor.

Conforme citado anteriormente, tem-se radiação difusa e direta proveniente do Sol. Nota-se que a energia difusa, no caso do coletor focalizante, é perdida pois não ocorre a perfeita reflexão ao absorvedor.

Desta forma é necessário – para um aumento de eficiência do coletor concentrador – que se utilize um sistema de orientação, em geral em torno do eixo do foco da superfície (cilíndricos parabólicos). Este sistema poderá ser manual (dificuldade de reposicionamento periódico) ou automático (custos maiores).

Grandes coletores concentradores tem sido utilizados na pesquisa de fundição de ligas metálicas e outros processos industriais.

2.6 Sistema de circulação da água

2.6.1 Sistema de termossifão ou circulação natural

Aqui a circulação se processa em razão da diferença de peso (densidade) entre a água fria e água quente.

A água fria "empurra" a água quente, realizando a circulação. Mas para que isso ocorra de forma eficiente, é necessária uma certa disposição dos coletores solares e do reservatório térmico (boiler).

Exemplificação do sistema de termossifão:

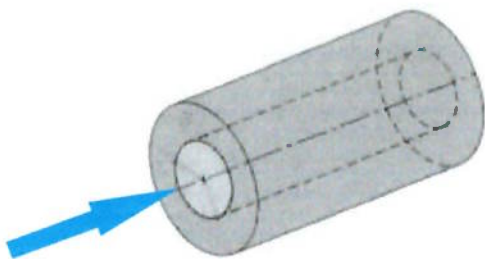


Fig. 4 - Água alimentando o tubo

1. A água alimenta o tubo pela parte inferior, à temperatura ambiente

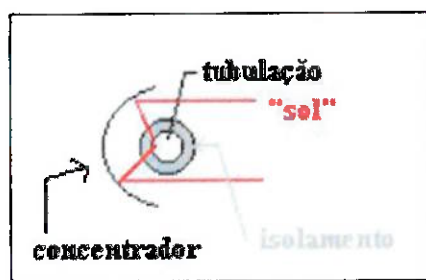


Fig. 5 - Desenho esquemático do coletor

2. A radiação é refletida pelo concentrador na superfície do tubo absorvedor, que aquece a água por convecção

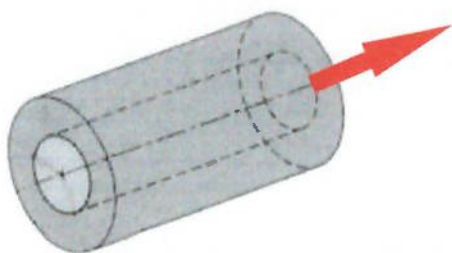


Fig. 6 - Água aquecida deixando o tubo

3. Aquecida, a água diminui sua densidade, saindo pela parte superior ao mesmo tempo que “puxa” mais água para aquecer através do fenômeno de termosifão

Ainda assim é um sistema simples, de pouca manutenção e extremamente confiável. Sua aplicação é recomendada para instalações residências e pequenas instalações comerciais e indústrias com capacidade máxima em torno de 1.000 litros.

Para que o sistema termosifão obtenha um funcionamento perfeito os componentes do aquecedor solar e a caixa de água fria deverão considerar algumas condições:

1. O reservatório térmico deverá ficar abaixo da caixa de água fria.
2. O desnível entre a caixa de água fria e o reservatório térmico poderá variar de zero até o limite de pressão admissível no reservatório térmico (usualmente de 2 a 5 metros).
3. A distância máxima entre os componentes (reservatório térmico e coletores solares) não deverá ultrapassar 5 metros. Entretanto, muitas vezes os telhados não oferecem condições para que a instalação obedeça as orientações acima.

Uma solução bastante empregada tem apontado para o uso de uma torre externa capaz de acomodar a caixa de água fria e o reservatório térmico. Essa solução tem sido largamente utilizada porque os proprietários não escondem o desejo de ver aumentada a pressão de trabalho da rede de água, evitando-se a instalação de um pressurizador para obter maior pressão na rede de água. Muitos projetos, entretanto, não podem receber uma torre. Por conta disso, há outras alternativas para viabilizar a instalação, conforme descrevemos nos tópicos seguintes.

2.6.2 Sistema em nível

A primeira dessas alternativas é chamada "sistema em nível". Aqui, o reservatório térmico poderá ter seu topo nivelado com o nível da bóia da caixa de água fria, facilitando a instalação do aquecedor solar em telhados baixos. O desnível entre os coletores solares e o fundo do reservatório térmico continua sendo de 30 centímetros. Da mesma forma, a distância máxima entre o reservatório térmico e os coletores solares não devesse ultrapassar os 5 metros. Esse sistema, contudo, não é recomendado para residências em regiões que sofrem constantes falhas no abastecimento de água fria no período diurno salvo em situações em que seja instalado um maior volume de água fria, a título de reserva.

2.6.3 Sistema de circulação forçada ou bombeado

Aqui a circulação se dá pelo uso de uma moto bomba, colocada entre o reservatório térmico e os coletores solares. É um sistema indicado para médias e grandes instalações, apesar de algumas vezes ser aplicado em instalações residenciais. A vantagem deste sistema é a flexibilidade na localização dos coletores solares em relação ao reservatório térmico, pois a moto bomba garante a circulação de água. Este sistema possui um melhor rendimento em relação aos outros, pois a circulação de água é muito mais rápida por ser feita através de uma moto bomba. Os coletores solares poderão ser instalados em um nível superior ao do reservatório térmico, algo impossível nas instalações por termossifão.

A moto bomba é acionada por um controlador eletrônico digital garantindo que ela opere somente quando o sistema estiver efetivamente produzindo água quente.

2.6.4 Sistema de aquecimento complementar

Normalmente, o sistema de aquecimento complementar é composto de uma resistência elétrica blindada e de um termostato. Sua operação é automática, mas, nos casos de sistemas residenciais é recomendado que o sistema auxiliar seja também controlado através dos disjuntores, acionando o complemento de aquecimento apenas quando houver necessidade, ou ainda por meio de um timer, que faz uma operação automática mais precisa frente às necessidades do usuário e gerando economia de energia.

2.7 Inclinação do coletor

Para coletarmos a maior quantidade possível de radiação, a superfície do coletor deve estar inclinada na direção do sol. O quanto a superfície será inclinada é dependente da latitude e da época do ano em que a coleta solar for requerida.

Se a superfície for inclinada no mesmo ângulo da latitude do local de coleta, ela estará perpendicular aos raios do sol ao meio dia em Março e Setembro (Fig.7). Para maximizar a quantidade de sol recebida no verão (época do ano em que há maior radiação), a superfície do coletor deverá ser inclinada um pouco mais na horizontal.

Já para maximizar a coleta no inverno, a superfície deverá ser inclinada mais para a vertical. (Fig. 8)

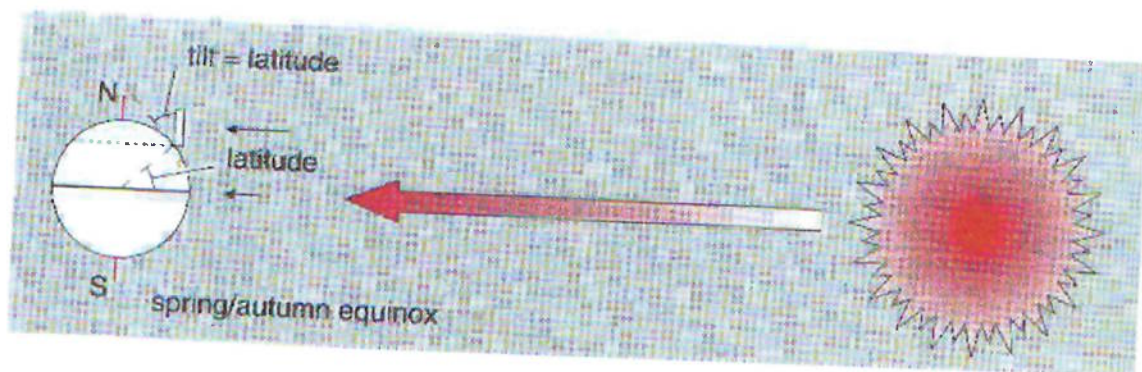


Fig. 7 - Inclinação do coletor

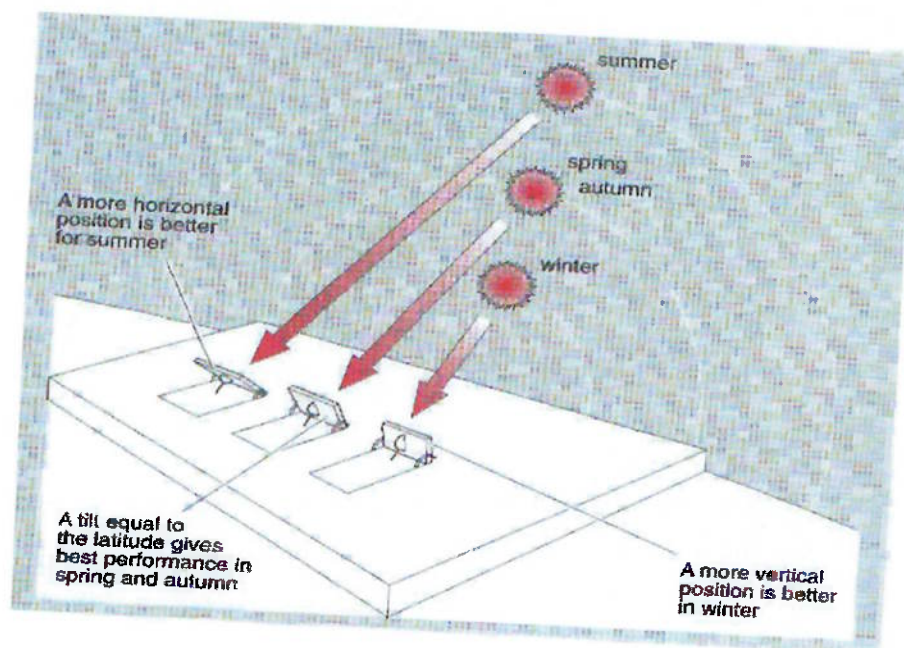


Fig. 8 - Maximização da coleta de radiação

Felizmente, os efeitos da inclinação e da orientação não são particularmente críticos. A Tabela 2 nos dá a energia total incidente na variação da inclinação da superfície.

Inclinação (°)	Total de radiação anual (kwh/m ²)	Total da radiação em junho (kwh/m ²)	Total de radiação em dezembro (kwh/m ²)
0 – Horizontal	944	153	16
30	1068	153	25
45	1053	143	29
60	990	126	30
90 – Vertical	745	82	29

Tabela 2 – Efeitos da inclinação da superfície do coletor

(Fonte: Achard e Gicquel 1986)

De posse destes dados e sabendo que a latitude na cidade de São Paulo é de 24° , determinamos o ângulo de construção do coletor entre 20° e 30° .

2.8 Sistema de Tracking

O coletor solar parabólico deve durante o dia acompanhar o movimento do sol para que sempre receba o maior grau de incidência de radiação, conforme ilustrado abaixo.

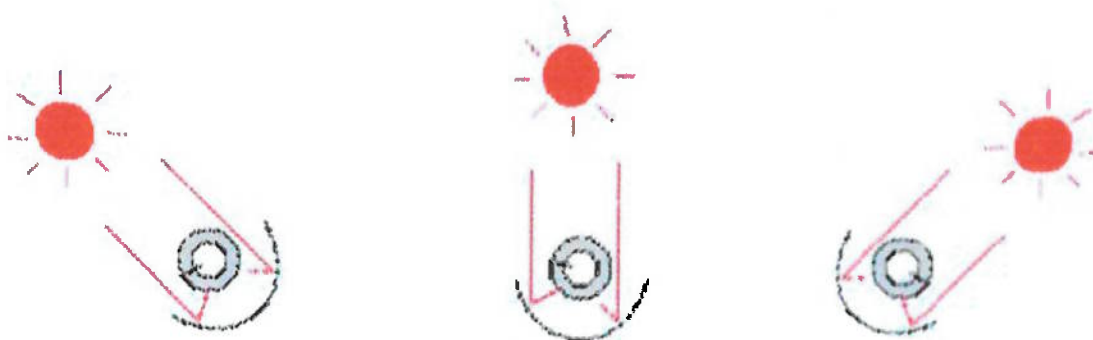


Fig. 9 – Ilustração da trajetória diária do coletor

Para o ensaio do coletor foi utilizado o sistema manual, no entanto pode ser feito um sistema de tracking de forma controlada. Estes sistemas acabam por elevar o custo do coletor e podem ter sistemas de controle aberto ou fechado, conforme os esquemas a seguir:

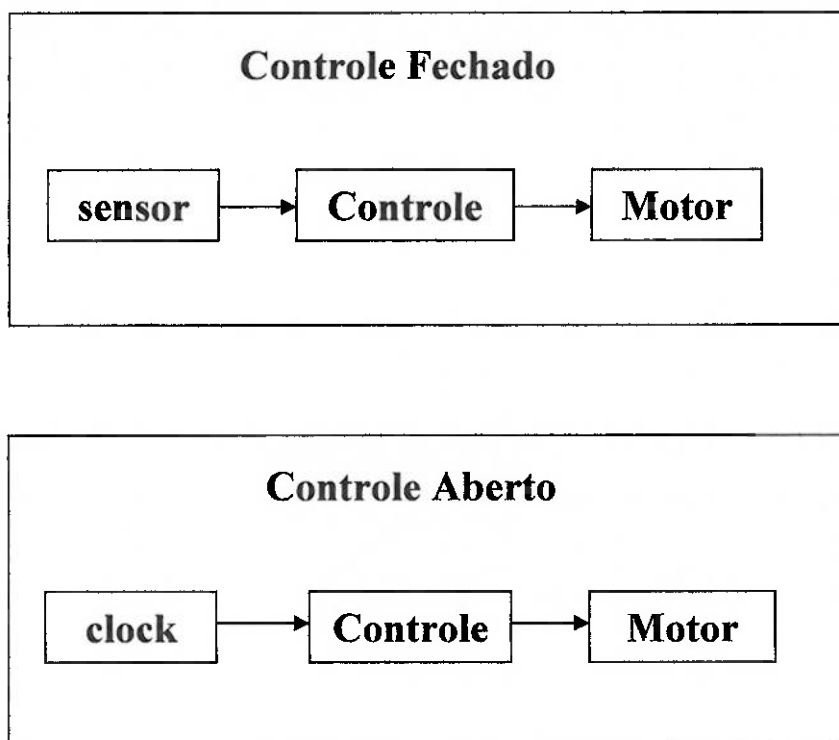


Fig. 10 - Tipos de sistema de controle para o sistema de tracking

2.9 Eficiência do coletor

Considerando um dia ensolarado sem nuvens, podemos atingir um intensidade solar de cerca de 1kW/m^2 . Como nosso coletor utiliza um concentrador, a potência aproveitada é proporcional à projeção da área da parábola num plano normal, ou seja:

$$A = b.c = 0,60 \times 1,50 = 0,90 \text{ m}^2$$

$$q = A \times I = 0,90 \times 1000 = 900 \text{ W}$$

Porém, a princípio não gostaríamos que a temperatura na saída do coletor atingisse uma temperatura superior a 100°C , para evitar a ebulição da água.

Utilizando isso como uma condição e utilizando uma temperatura média da água no interior do tubo.

$$T_f = \frac{T_e + T_s}{2} = \frac{20 + 100}{2} = 60^\circ C \quad \rightarrow \quad C_p = 4184 \frac{J}{kg.K} \quad \rho = 984 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 475 \cdot 10^{-6} \frac{N.s}{m^2} \quad k_{\text{água}} = 653 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m.K}$$

Assim, podemos encontrar a vazão necessária e o coeficiente máximo de troca de calor convectivo para esta configuração.

$$q = \dot{m} \times C_p (T_s - T_e)$$

$$\dot{m} = \frac{q}{C_p (\Delta T)} = \frac{900}{4184 (80)} = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{ kg / s}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V$$

$$Q = V \cdot A = \frac{\dot{m}}{\rho} = 2,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Para um tubo de 3/4 de polegada, $A = 285 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Logo:

$$V = Q/A = 2,73 \cdot 10^{-4} / 285 \cdot 10^{-4} = 9,58 \cdot 10^{-3}$$

$$Re_D = \rho V D / \mu = 984 \cdot 9,58 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01905 / 475 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Logo} \quad Re_D = 378 < 2300 \quad (\text{Laminar!!!})$$

Como nosso escoamento é laminar, e considerando completamente desenvolvido e com fluxo térmico superficial uniforme:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h} \cdot D}{k} = 4,36$$

$$\overline{h}_{\max} = \frac{4,36 \cdot 0,653}{0,019505} = 149,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Porém, nosso coletor não está livre de perdas. A principal delas é a perda convectiva do tubo absorvedor para a atmosfera. Por isso utilizamos um tubo isolante e transparente, de forma a reduzir a perda convectiva sem reduzir a incidência da radiação solar sobre o tubo absorvedor.

Considerando um vento de 10m/s, num ambiente com a temperatura em 20°C e considerando também a parede do tubo absorvedor toda a 60°C (temperatura média do fluido em seu interior), teremos:

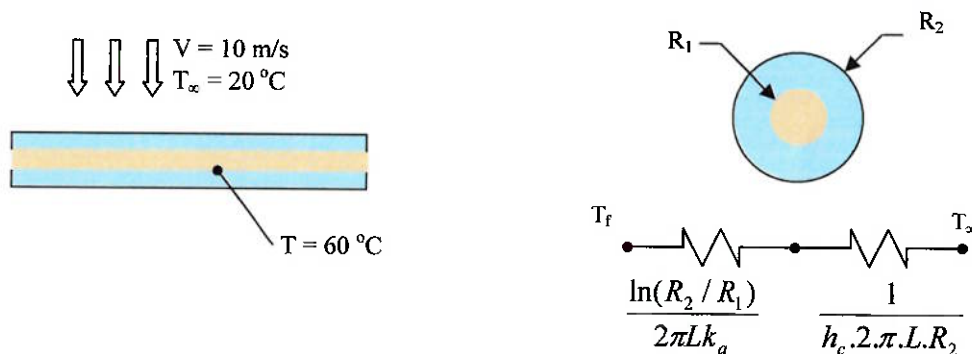


Fig. 11 - Modelagem do tubo

A partir das considerações anteriores e sabendo que:

$$T_f = 60^{\circ}C \quad D_1 = 2 \cdot R_1 = 0,01905m \quad D_2 = 2 \cdot R_2 = 0,0245m \quad L = 1,50m \quad k_a = 0,04 W / m.K$$

$$\nu(20^{\circ}C) = 15,89 \cdot 10^{-6} \frac{N.s}{m^2} \quad Pr(20^{\circ}C) = 0,71 \quad Pr(60^{\circ}C) = 0,70 \quad k_{ar}(20^{\circ}C) = 0,026 \frac{W}{m.K}$$

Podemos calcular agora as perdas convectivas.

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,0245}{15,89 \cdot 10^{-6}} = 15418$$

A partir das correlações de Zhukauskas para a troca convectiva de calor:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Nu}_D &= C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_{sup}} \right)^{0,25} = \frac{\bar{h} \cdot D}{k_{ar}} \\ C &= 0,26 \quad m = 0,6 \quad n = 0,36 \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} \bar{Nu}_D &= 0,26(15418)^{0,6} (0,71)^{0,36} \left(\frac{0,71}{0,70} \right)^{0,25} \\ \bar{Nu}_D &= 75,125 \end{aligned}$$

$$\bar{h}_c = \frac{\bar{Nu}_D \cdot k}{D_2} = \frac{75,125 \cdot 0,026}{0,0245} = 79,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_{tot} = \frac{\ln \left(\frac{0,0245}{0,01905} \right)}{2 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 0,04} + \frac{1}{79,7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 0,01225} = 0,667 + 0,1087 = 0,7757 \frac{W}{K}$$

$$q_{conv} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{60 - 20}{0,7757} = 51,6 W$$

Portanto, a eficiência máxima que devemos esperar não pode ser superior

a:

$$\varepsilon = \frac{q_{ideal} - q_{perdas}}{q_{ideal}} = 1 - \frac{51,6}{900} = 94\%$$

2.10 Instrumentos para Medição de Radiação Solar

Existem dois tipos de instrumentos que podem ser utilizados para a medição da radiação solar. São eles:

- O piroheliômetro, que é um instrumento que usa um detector colimado para a medição da radiação. Através dele é feita a medição da radiação direta, utilizando-se de uma pequena porção do céu atingida pelo Sol de incidência normal.



Fig. 12 - Piroheliômetro

- O piranômetro, que é um instrumento que diferentemente do piroheliômetro que mede somente a radiação direta, também mede a radiação difusa. Geralmente utiliza-se este instrumento para medir-se a radiação em superfícies horizontais. Um artifício interessante neste instrumento é que caso a radiação direta seja bloqueada, o instrumento mede a radiação difusa na sombra.

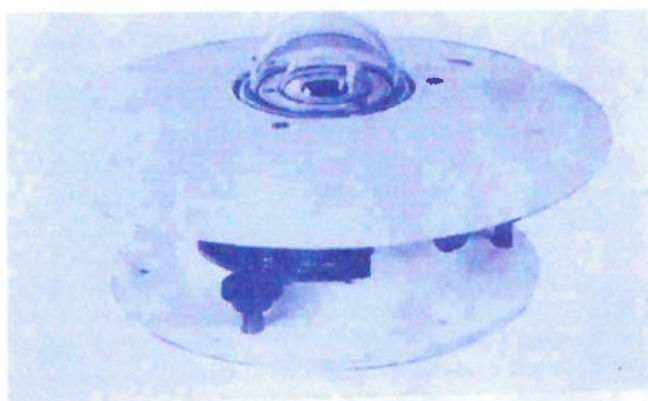


Fig. 13 - Piranômetro

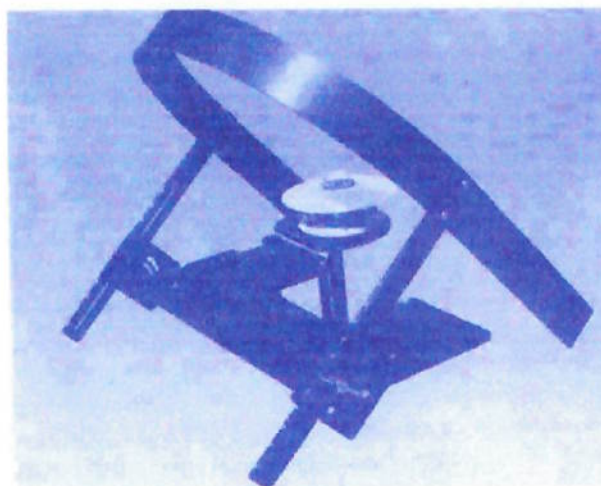


Fig. 14 - Piranômetro para radiação indireta

2.11 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do sistema de aquecimento solar é bastante simples. Ele é composto por dois elementos básicos: o coletor solar, que aquece a água, e o reservatório térmico (algumas vezes chamado de "boiler"), que armazena a água aquecida.

A água circula entre o reservatório térmico e os coletores solares através de tubos de Cobre. Os coletores de Cobre com superfície enegrecida captam o calor do sol e o transferem para a água que circula no interior da serpentina dos coletores solares. Aquecida, a água retorna ao reservatório térmico (boiler) e ali fica armazenada até que seja consumida.

É fundamental que a tubulação por onde circula a água seja em Cobre em função das severas condições de temperatura e necessidade de trocas térmicas rápidas. Mas isso não é tudo. É preciso lançar mão de uma caixa de água fria para alimentar o reservatório térmico, e ela pode ser exclusiva (recomendado) ou não.

Os sistemas possuem ainda uma forma auxiliar de aquecimento, que entra em ação quando a insolação não for suficiente para aquecer a água ou consumo de água quente for superior ao inicialmente projetado.

A circulação da água pelos coletores solares pode se dar de duas maneiras: naturalmente, pelo efeito termossifão, ou forçada, com o uso de uma moto bomba. O termossifão é a opção mais utilizada nos casos de instalações residenciais de pequeno porte. Já a circulação forçada por moto bomba pode ser utilizada em residências onde o telhado é muito baixo em relação a última laje, sendo mais empregada em piscinas e sistemas de médio e grande porte.

2.12 Escolha do material

2.12.1 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 6000K . Assim, a faixa de 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.

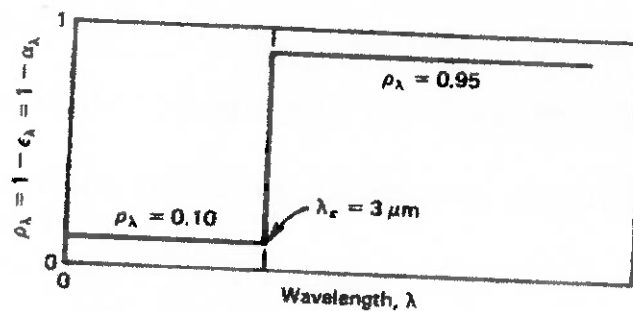


Fig. 15 - Superfície seletiva

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 cinzentas, 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 α_λ é muito alta. Em comprimentos de onda maiores do que λ_c , a refletividade é quase unitária, e assim $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, 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 $3\ \mu\text{m}$.

2.12.2 Mecanismo 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 longo comprimento de onda.

As coberturas podem ser homogêneas ou ter estrutura particular, suas propriedades são então, as 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 emissividade de 0,08 a 0,14.. 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 têm 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.

3 Construção

3.1 Definição do coletor

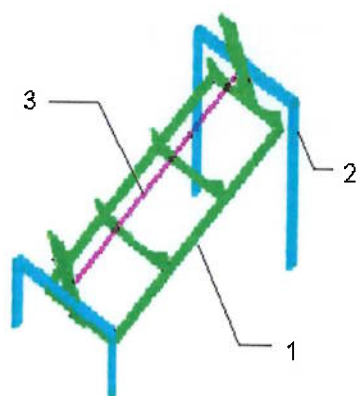


Fig. 16 - Ilustração do coletor

Após termos definido os principais materiais que comporiam a construção do coletor, definimos os padrões da parábola que seria construída.

A figura acima é o esquema representativo da estrutura do projeto no início de sua concepção. Podemos ver em (1) a parte móvel (rotativa), que nada mais é do que a estrutura do concentrador, fixa no foco da parábola, de maneira que o tubo absorvedor sempre estará no seu foco. Esta estrutura foi feita em madeira e

a base da parábola foi feita com uma chapa fina de fórmica coberta por papel alumínio.

A forma definida para a parábola segue a equação $y = x^2/80$, desta forma o foco fica localizado a 20 cm acima do ponto mais baixo da parábola.

Em (3) podemos ver o tubo absorvedor que foi anteriormente definido como sendo de cobre recoberto por tinta preta. Podemos ver que ele não sofre esforço nenhum na estrutura, sendo todos os esforços transferidos para a parte em azul, que foi pré definida como sendo de ferro. O tubo absorvedor é protegido da perda convectiva para o ambiente por um tubo de acrílico.

Na parte superior da estrutura em (1) há espaço para fixar um contrapeso de modo a facilitar o posicionamento do espelho.

O concentrador tem uma área projetada no plano de $0,90\text{m}^2$, sendo seu comprimento no sentido do tubo absorvedor de 1,50 m.

3.2 Montagem do Protótipo

Neste tópico passaremos a descrever o planejamento e estratégias utilizadas para desenvolver as partes componentes do todo e as seqüências de construção e montagem. O coletor foi dividido em quatro subconjuntos quanto à construção e montagem, que constam a seguir.

3.2.1 Conjunto móvel – Espelho

Foram construídos, a partir de uma placa de madeira compensada de 10 mm, todos os componentes da estrutura do conjunto móvel. Primeiro uma

estrutura de sustentação, na forma de “U” a partir de três peças recortadas de placa original, de forma a originar a viga com certa de oito centímetros de largura. Suas extremidades foram fechadas com placas também recortadas da chapa e furadas numa altura onde estaria o foco do espelho com uma espessura pouco maior que o maior diâmetro do suporte do conjunto absorvedor (1”). Também foram feitos pequenos ‘rasgos’ verticais junto ao furo para a passagem dos parafusos do suporte do conjunto absorvedor.

Foram então recortadas três peças iguais responsáveis pela forma parabólica do espelho e sua fixação à barra “U”. Seu desenho foi projetado em CAD, plotado em escala 1:1 e passado à placa de madeira para recorte. Após isto foram fixados à barra “U”.

A seguir, fixamos uma placa de PVC sobre as peças fixadas na viga “U” e por último fizemos a colagem do papel alumínio. Após uma inspeção visual com o auxílio de um apontador tipo laser, realizamos pequenos ajustes e fixamos todas as peças que ainda necessitavam definitivamente.

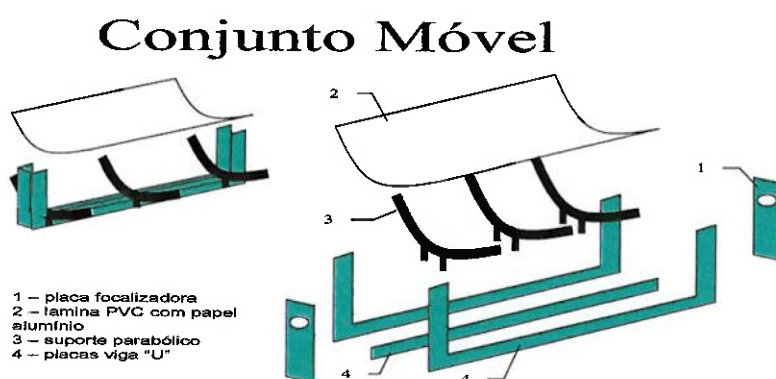


Fig. 17 – Modelo do conjunto móvel

3.2.2 Estrutura de Sustentação

Composto de uma única peça que dá a sustentação do coletor, sustentando o sistema absorvedor e o conjunto móvel. Foi montado utilizando barras de ferro do tipo caixão quadrada de seção 250 x 250 mm. As barras foram cortadas nos tamanhos projetados e soldados com solda do tipo MIG lixados e pintados na cor preta. Foram feitos quatro furos, dois em cada lado destinado a fixação do Sistema Absorvedor.

3.2.3 Sistema Absorvedor

É constituído pelo tubo de cobre ($\frac{3}{4}$ ") pintado de preto, seus dois suportes para fixação (tubo de PVC de 1" com dois parafusos dispostos perpendicularmente ao eixo do tubo) na estrutura de sustentação, conectores, registro do tipo gaveta, um "T" para fixação dos sensores que serão utilizados na tomada dos dados e o tubo isolante transparente.

O tubo de cobre e as conexões soldáveis foram soldados com maçarico a gás e estanho. O registro e conectores para a mangueira só serão rosqueados às roscas dos conectores anteriormente soldados (roçados de um lado e soldáveis de outro) utilizando uma fita do tipo Teflon para vedação, após juntarmos os subconjuntos. Como o maior diâmetro dos conectores era maior do que o do tubo que constituía os suportes, primeiro o tubo foi pintado, depois foram colocados um suporte, o tubo transparente e o outro suporte, posicionados e colados nas posições adequadas e depois soldadas as conexões e refazendo a pintura na ponta dos tubos para efeito estético e contra a corrosão. Entretanto, durante o

posicionamento dos suportes e do tubo transparente, a tinta do tubo de cobre foi arrancada parcialmente, obrigando-nos a cortar o tubo e refazer a pintura.

Sistema Absorvedor

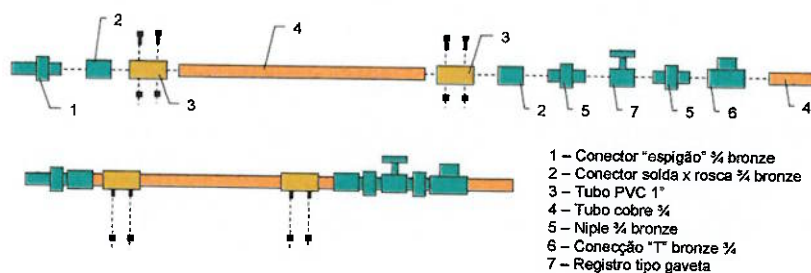


Fig. 18 - Modelo do sistema absorvedor

3.2.4 Acessórios

São os demais itens necessários à montagem e realização do protótipo como bomba, mangueira, suportes, abraçadeiras, cabo elétrico, que apenas necessitam ser encaixados e rosqueados.

Após a montagem de cada um destes três sistemas, partimos para a montagem final do protótipo, que realizamos da forma a seguir.

Primeiramente, juntamos o sistema absorvedor ao conjunto móvel, introduzindo-o através dos furos feitos nas extremidades da viga “U” e posicionando os suportes do sistema absorvedor internamente concêntrico com os furos da viga.

A seguir, o conjunto obtido foi posicionado sobre a estrutura de sustentação e os parafusos do sistema absorvedor foram fixados a estrutura de sustentação. Com o protótipo praticamente completo, passamos então à montagem dos demais componentes do conjunto absorvedor (conectores, registro, etc.) que estavam faltando, juntamente com os demais acessórios.

COMPLETO

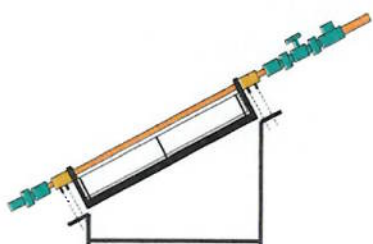


Fig. 19 - Modelo do protótipo montado

4 Resultados

4.1 Metodologia

O coletor foi posicionado com o tubo de cobre disposto no sentido Norte-Sul, com sua parte de menor altura voltada para o norte (face do espelho no sentido Norte e fundo do espelho voltado para o Sul).

Uma bomba foi instalada em um reservatório (uma caixa d'água de quinhentos litros) e bombeia a água do mesmo através de uma mangueira flexível de borracha de $\frac{3}{4}$ " para o coletor por meio de uma conexão onde foi engatada na parte inferior do tubo absorvedor do coletor.

A água percorre o tubo de cobre, onde é aquecida, e tem sua vazão controlada por estrangulamento através de um registro tipo gaveta. Após o registro, há uma conexão tipo "T" de maneira que uma de suas pontas recebe o fluxo de água e a outra (que se situa na mesma direção) é por onde a água sai. A terceira terminação foi utilizada para acoplar uma sonda para a medição da temperatura da água saindo do coletor.

Após esta conexão, há um trecho de tubo de cobre para acoplar mais um trecho de mangueira que retornará a água de volta para o reservatório.

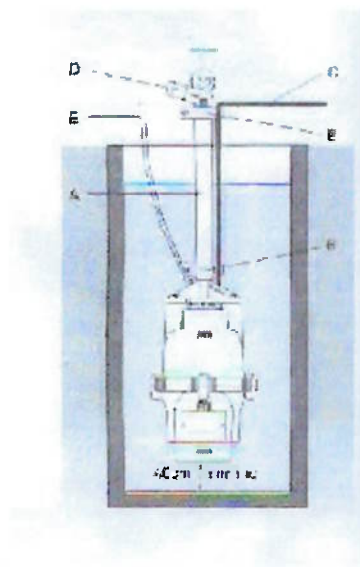


Fig. 20 – Bomba

Como a água aquecida será retornada diretamente para o reservatório, com o passar do tempo sua temperatura irá aumentar. Portanto, há a necessidade de se conhecer também a temperatura do fluido no reservatório a cada instante considerado nas medições.

O espelho será posicionado manualmente, de maneira que o foco do espelho esteja sobre o tubo de cobre, o que será garantido por inspeção visual.

Devido a nossa referência para o cálculo da eficiência se basear nos dados disponíveis no site de um projeto do Laboratório de Automação Agrícola da Escola Politécnica da USP (www.webbee.org.br) que disponibiliza a radiação solar medida em intervalos de dez minutos de maneira discretizada, realizaremos nossas medições de temperatura a cada dez minutos também. Como a parede do tubo de cobre não possui uma inércia térmica considerável iremos desprezá-la, realizando as medições simultaneamente aos instantes de medição disponíveis no site.

Finalmente, nos falta o valor da vazão mássica. Mediremos a massa inicial de um recipiente. Encheremos o recipiente com o fluxo de retorno do coletor cronometrando o tempo gasto. A seguir, mediremos a massa final do recipiente e teremos os dados necessários para a determinação da vazão mássica de água no coletor.

4.2 Formulação Empregada

Para o cálculo da vazão:

$$\dot{m} = \frac{m_f - m_i}{\Delta t}$$

onde:

\dot{m} - vazão mássica [kg/s]

m_i - massa inicial do recipiente [kg]

m_f - massa final do recipiente [kg]

Δt - tempo de enchimento [s]

Para o cálculo da potência útil alcançada:

$$Q_c = \dot{m} C_p \cdot (T_f - T_r)$$

onde:

Q_c - potência útil [W]

\dot{m} - vazão mássica [kg/s]

C_p - da água [J/kg.K]

T_f - temperatura da água na saída do coletor [°C]

T_r - temperatura da água na caixa d'água [°C]

Para o cálculo da potência disponível

$$Q_d = A_c \cdot S$$

onde:

Q_d - potência disponível [W]

A_c - área do espelho do coletor projetada num plano normal [m²]

S - radiação solar [W/m²]

E para o cálculo da eficiência:

$$E = \frac{Q_c}{Q_d}$$

4.3 *Análise Hidrostática*

Os componentes hidráulicos do coletor não apresentaram problemas de vazamentos em juntas ou de rompimento do tubo nem da mangueira. Podemos notar que mesmo trabalhando com uma bomba além das necessidades deste projeto (em relação a pressão ou vazão) os elementos que devem suportar a pressão estão bem dimensionados.

A partir de uma análise primária, que consta no próximo item, veremos que a bomba utilizada, que atinge vazões de 1700 litros/hora e uma pressão máxima de aproximadamente 70 m.c.a., está super dimensionada, visto que a máxima vazão seria da ordem de 20 litros/hora a uma pressão de, aproximadamente, 540kPa (cerca de 9 m.c.a.)

4.4 Análise Energética

Apenas para uma compreensão do fenômeno da variação da radiação solar ao longo do dia a seguir temos um gráfico com os dados coletados para o dia do teste (25/11/2003) no site anteriormente citado.

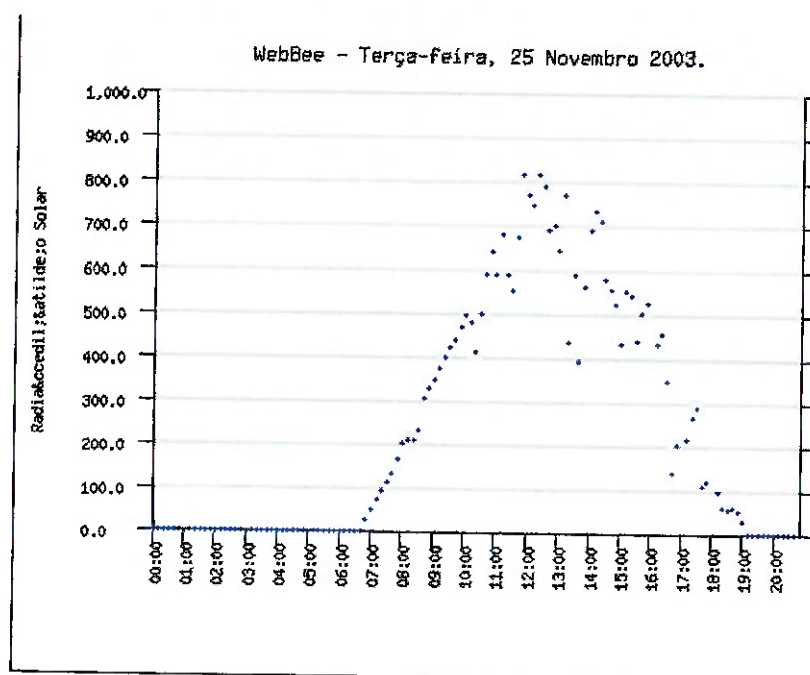


Fig. 21 – Gráfico no dia do teste

A seguir temos os dados e resultados obtidos no primeiro teste realizado. Este teste foi realizado num dia ensolarado, com poucas (mas presentes) nuvens. O registro foi totalmente aberto e foram coletados dados por aproximadamente duas horas no período do dia onde normalmente é esperada a maior intensidade de radiação solar.

Medição	Dia	Hora	Radiação [W/m ²]
66	25/11/03	11:20	590
67	25/11/03	11:30	553
68	25/11/03	11:40	671
69	25/11/03	11:50	815
70	25/11/03	12:00	770
71	25/11/03	12:10	745
72	25/11/03	12:20	816
73	25/11/03	12:30	788
74	25/11/03	12:40	689
75	25/11/03	12:50	698
76	25/11/03	13:00	643
77	25/11/03	13:10	768

Tabela 3 - Medições

Teste 1

Horário	Temperatura [°C]		Potencia Absorvida [W]	Potencia disponível [W]	Eficiencia [%]
	Reserva- tório	Saída do Coletor			
11:20	27,5	28,3	1549	797	1,94
11:30	28	28,4	774	851	0,91
11:40	28,5	29,4	1742	898	1,94
11:50	28,9	29,7	1549	866	1,79
12:00	29,5	30	968	748	1,29
12:10	29,9	30,6	1355	904	1,50
12:20	30,4	30,8	774	1069	0,72
12:30	30,8	31,3	968	1162	0,83
12:40	31,4	31,8	774	1067	0,73
12:50	31,6	32,2	1162	1229	0,95
13:00	32	32,9	1742	1071	1,63

tara [g]:	45
massa [g]:	1433,1
tempo [s]:	3
Cp [J/kg.K]	4184

vz_massa	0,4627 kg/s
dens(29C)	997 kg/m ³
vz_vol	0,000464 m ³ /s
A_col/norm	1,815 m ²

Tabela 4 – Teste 1

Como podemos ver, a efetividade supera o calculado anteriormente e em alguns caso supera até mesmo os valores possíveis. Tais erros são devidos a possíveis imprecisões entre o instante em que foi medida a radiação solar e o instante da medição das temperaturas no reservatório e na saída do coletor. Devido a presença de nuvens, a radiação solar sobre o coletor não é contínua podendo haver súbitas quedas do fluxo solar sobre o coletor. Visto que a interferência de uma nuvem encobrindo a radiação direta pode levar alguns poucos segundos, uma diferença entre os instantes de medição realizados por nós e o instante em que a radiação solar foi medida então é suficiente para justificar tais valores inesperados.

Devido ao isolamento convectivo utilizado ser substituído por um tubo montado com folhas de transparências, embora fosse menos espessa que o isolamento anterior, era visivelmente mais opaca, comprometendo a eficiência do coletor.

Após uma hora de teste aproximadamente uma das folhas do isolamento não suportou a insolação e se “descolou” do tubo, comprometendo o isolamento convectivo. Acreditamos então que em virtude dos valores levantados, o nosso protótipo alcançou uma eficiência de 72%. Uma elevação maior da temperatura não foi notada devido à vazão muito elevada.

Teste 2

Horário	Temperatura [oC]		Potencia Absorvida [W]	Potencia disponível [W]	Eficiencia [%]
	Reserva-tório	Saída do Coletor			
	---	---	---	---	
13:10	32,5	34,9	572,42141	1393,92	0,410656

tara [g]:	45
massa [g]:	1185,1
tempo [s]:	20
Cp [j/kg.K]	4184

vz_massa	0,057005 kg/s
dens(29C)	997 kg/m3
vz_vol	5,72E-05 m3/s
A_col/norm	1,815 m2

Tabela 5 – Teste 2

Apenas para uma conferência realizamos mais uma medida, entretanto com uma vazão menor, que logo se traduziu num aumento da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor. Notamos também uma queda de eficiência do coletor, que explicamos ter acontecido em virtude deste segundo teste ter sido realizado sem o isolamento convectivo, que foi retirado. Podemos notar claramente que mesmo o isolamento estando comprometido e menos translúcido que o desejado, ainda assim desempenha uma importante função no coletor, visto que com o aumento da temperatura da superfície do tubo coletor, aumentam também as perdas convectivas.

Estimativas

Temperatura [oC]		Potencia Absorvida [W]	Potencia disponível [W]	Eficiencia [%]	Vazão [kg/s]	Vazão [l/h]
Reserva-tório	Saída do Coletor					
20	110	771,375	907,5	0,85	0,002048	7,40
20	110	226,875	907,5	0,25	0,000602	2,18

Tabela 6 - Estimativas

A partir dos testes feitos podemos realizar duas estimativas, primeiro para reafirmar a importância do isolamento convectivo no projeto do coletor e em segundo lugar para dar uma estimativa da vazão que podemos atingir nas condições iniciais desejadas.

Podemos notar que com uma incidência de 500 W/m^2 (nenhum valor exagerado) e a partir de duas eficiências estimadas uma para um isolamento relativamente melhor e outro sem isolamento e com grandes perdas convectivas (aumento da velocidade dos ventos, queda da temperatura ambiente, etc.). Vemos que a vazão pode ser em torno de três vezes maior num sistema melhor construído.

5 Discussão

5.1 *Discussão sobre a montagem e construção*

Neste tópico, desenvolveremos alguns dos aspectos levados em consideração durante a fabricação de nosso protótipo. Os sub-itens descritos a seguir versam sobre os problemas encontrados nos processos e materiais por nós utilizados e, em alguns, sugerimos possíveis soluções que podem ser empregadas para sanar estes e, até mesmo servirem de base a uma proposta para um futuro projeto de estudo ou projetos comerciais.

5.1.1 Espelho

Principal item sob o aspecto de fabricação, o espelho foi a peça do nosso protótipo que mais precisão em sua construção exigiu. Como optamos por construir uma estrutura não inteiriça em madeira, que desse sustentação e assegurasse a forma parabólica de uma placa fina de PVC flexível recoberta por papel alumínio, nosso maior problema foi o foco. Como as três peças que garantiriam a forma parabólica foram encaixadas sobre a peça que dava a sustentação, estas três peças necessitavam estar finamente alinhadas e deveriam ser idênticas de tal forma a que em cada seção transversal do espelho o foco incidisse sobre o cano de cobre. Outro problema foi a aplicação do papel alumínio sobre a placa de PVC. Como é feito de uma frágil folha e devido ao procedimento

de colagem utilizado, a superfície não ficou plenamente lisa, apresentando leves ondulações que dificultaram a obtenção de um foco pontual.

A inspeção da acuracidade do foco do espelho foi feita por inspeção através de um apontador tipo laser incidindo normalmente ao espelho e foi considerada satisfatória. Ficam aqui algumas sugestões para projetos futuros. A utilização de um espelho propriamente dito, de formato parabólico, que garantiria um melhor foco, maior estabilidade estrutural (facilitando a limpeza da superfície refletora) e uma maior durabilidade, porém a um preço superior. Ou a utilização de uma placa de aço galvanizado polido, que apresentaria as mesmas vantagens da sugestão anterior com o adicional de ser menor custo. Porém apresenta as desvantagens de necessitar de uma estrutura que garanta sua forma parabólica e, de tempo em tempo, a necessidade de polir novamente a superfície a fim de eliminar possíveis pontos de oxidação. Para o caso de um modelo comercial sugerimos que a peça estrutural seja feita em material plástico adequado (principalmente em termos térmicos) que poderia ser fabricado por injeção.



Fig. 22 – Estrutura de madeira



Fig. 23 - Superfície laminada

5.1.2 Estrutura Metálica

Sua montagem não apresentou problemas significativos, apenas o alinhamento das partes onde seria encaixado o tubo absorvedor e a garantia do ângulo de inclinação do espelho. Caso tivéssemos utilizado um sistema de tracking automático, nossa estrutura deveria ser repensada de modo a acoplar mais o motor, controle e demais peças responsáveis pelo posicionamento do espelho. Deveríamos ter pensado melhor também antes de sua construção um suporte ou apoio que facilitasse o posicionamento do espelho de forma mais acurada e prática.



Fig. 24 - Estrutura de sustentação

5.1.3 Tubo Absorvedor

A principal dificuldade foi na utilização dos conectores necessários à aplicação de registros e encaixes de mangueiras de forma a garantir a estanqueidade. A tinta negra aplicada diretamente sobre o tubo de cobre lixado também não apresenta uma aderência excelente, sendo muito suscetível a riscos por qualquer objeto mais duro.

5.1.4 Isolamento Convectivo

Tivemos grandes problemas na colocação do tubo isolante devido às características construtivas do tubo absorvedor. Numa primeira fase utilizamos uma mangueira de plástico transparente que, por necessitar ser cortada para ser colocada não impediria a saída de ar, comprometendo o isolamento. Pretendemos para os testes substituí-la por um tubo feito de folhas de acetato, muito utilizadas em transparências.

5.2 *Discussão sobre o sistema de tracking*

Devido ao elevado custo de um sistema pronto de tracking e a falta de tempo para o desenvolvimento de um sistema próprio, decidimos, por se tratar de um protótipo de cunho experimental, utilizar um sistema de posicionamento manual operado por inspeção visual. Sabemos, entretanto, que para passarmos a um nível comercial este problema deve ser sanado através da utilização de um sistema automático. Devemos lembrar também que tais sistemas devem estar protegidos de intempéries como chuvas, ou animais.

5.3 *Discussão sobre o sistema de controle e vazão*

Nosso sistema de controle de vazão por ser considerado pelo conjunto formado pela bomba (liga-desliga) e pelo registro de gaveta manual montado a

juzante do coletor. Fica a sugestão de se implementar, no caso de modelos comerciais, um controle de vazão de baixo custo visando otimizar a absorção do fluxo térmico, que não é constante.

5.4 *Discussão sobre a montagem do todo*

Acreditamos que o prévio planejamento das partes que comporiam o todo e das seqüências de montagem necessárias foram fundamentais para o sucesso e ausência de problemas nesta fase. Destacamos também a importância da precisão nas medidas das partes construídas de maneira a não criar incompatibilidades dimensionais durante a montagem.



Fig. 25 – Protótipo montado

5.5 *Discussão sobre os resultados obtidos*

Apesar do número muito reduzido de testes realizados pudemos chegar a importantes constatações.

Primeiramente, as condições hidráulicas do coletor foram satisfatórias, visto que não houve vazamentos nas soldas das conexões, nas conexões rosçadas e nem na conexão da sonda de temperatura. A mangueira de borracha também suportou adequadamente as pressões a que foi submetida. Entretanto uma nova bomba deve ser escolhida, de maneira que atenda melhor às necessidades do projeto evitando o consumo excessivo de energia elétrica e comprometendo a eficiência energética global do coletor.

Como para um sistema comercial o coletor deverá contar com algum sistema de tracking, o consumo de energia (elétrica, solar, etc.) desde subsistema, e sua eficiência, também deverá ser computado na eficiência energética global do coletor.

Constatamos também a importância do sistema de isolamento convectivo do tubo absorvedor, podendo este comprometer enormemente a eficiência do coletor. Lembramos que o melhor método de construí-lo, depois do sistema à vácuo, temos um sistema de menor custo, onde o tubo isolante deve ser estanque de maneira a evitar a entrada ou saída do ar em contato com o tubo absorvedor.

Devido à alta sensibilidade à presença de nuvens ou outros elementos que prejudiquem a radiação, não recomendamos este tipo de coletor para regiões muito sujeitas a formações nebulosas ou com elevadas concentrações de poluentes na atmosfera, que causam a difusão da radiação direta. No caso de

instalar em locais com grande concentração de partículas no ar (proveniente de poluição, poeira, etc.) recomendamos maior frequência da limpeza da superfície refletora do que de costume para não afetar seu rendimento.

Finalmente, nossa maior recomendação para futuras tentativas à partir deste trabalho é o cuidado quanto aos procedimentos utilizados no teste. Se a medição da radiação solar direta puder ser medida pela mesma equipe, no mesmo local ao invés de um local próximo, e de maneira que as temperaturas sejam medidas ao mesmo tempo e entre intervalos menores de tempo ao longo de um período de experimentação maior, como um dia inteiro, a acuracidade dos resultados será muito mais confiável.

5.6 Discussão sobre os custos do projeto

Apresentamos neste item uma tabela com todo o material que foi comprado assim como o valor total gasto com o projeto. Foi feita uma transformação dos gastos totais para dólar de forma que futuras desvalorizações não venham a dificultar a análise do relatório.

Material	Valor
Espigão para mangueira $\frac{3}{4}$	6,11
Conector Fêmea Bronze $\frac{3}{4}$	5,66
Niple Bronze $\frac{3}{4}$	3,97
Conector Macho $\frac{3}{4}$ bronze	7,74
Capa rosca 2 pol.	4,34
Flange roscada $1\frac{1}{2}$	9,77
Tubos de ferro para construção da estrutura do espelho	24,00
Thinner para limpeza dos tubos de ferro	4,00
Chapa de compensado 10mm para construção do espelho	35,00

Tubo PVC 1" para suporte do tubo de cobre	4,10
Papel alumínio para revestimento do espelho	3,33
Montagem do suporte de ferro, pintura e pintura do cano de cobre em preto	54,00
Laminado plástico para montagem do espelho parabólico	22,90
Tubo de cobre e bomba submersa	140,04
Mang. Cristal 1"x 2mm	5,20
Mang. Trancada Luxo ¾" PT180 color	67,50
TE 711 3/4 RR Bronze	8,14
Bucha Red N 6 22x15mm cobre	1,93
CT.02 Abraçadeiras mangueira L ¾x1	4,00
Registro gaveta FIG 48 MI 1502B	14,00
Eletrodo 1/8 Embalagem c/ 500 gramas	6,00
Total das despesas	445,73

Tabela 7 – Custos do projeto

O valor total do projeto foi de R\$ 445,73. A cotação do dólar comercial no dia 07 de dezembro de 2003 era de U\$ 2,934, logo o custo do projeto foi de aproximadamente U\$ 1307,77.

6 Conclusões

Os coletores solares têm, e irão ter, importância cada vez maior em nossa sociedade. Algumas formas de energia não são renováveis e os coletores solares se apresentam como uma alternativa viável para a nossa demanda, seja de uso domiciliar ou de uso industrial.

Queremos que este trabalho não se encerre por aqui, mas que seja aporte para o desenvolvimento de novos trabalhos, pois ainda há muitos temas para serem desenvolvidos.

Sugerimos que novos trabalhos abordem a viabilidade de fabricação em larga escala de coletores solares, não só parabólicos, mas planos também. Novos trabalhos poderiam, também, abordar a viabilidade de comercialização dos coletores.

Acreditamos que são de fundamental importância novos trabalhos nesta área para que consigamos expandir o uso desta forma de energia o país.

7 Referências

- [1] Incropera, F.P.; DeWitt, D.P., Fundamentos de Transferência de Calor de Massa, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1998.
- [2] Holman, J.P., Transferência de Calor, McGraw Hill, São Paulo 1997.
- [3] Boyle, G., Renewable Energy – Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [4] Robinson, N., Solar Radiation, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1970.
- [5] Reddy, T.A., The Design and Sizing of Native Solar Thermal System, Oxford Science Publications, Oxford, 1987.
- [6] Bezera, A.M., Aplicações Térmicas da Energia Solar, UFPB/Editora Universitária, João Pessoa, 1998.
- [7] Universidade de São Paulo, Diretrizes para apresentação de Dissertação e Teses – Serviço de Bibliotecas da EPUSP. 2.ed. – São Paulo, 2001. 39p.