

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto e Construção de um Concentrador Solar

Tiago Kempfer

São Paulo
2011

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto e Construção de um Concentrador Solar

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

Tiago Kempfer

Orientador:

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Kempfer, Tiago

**Projeto e Construção de um Concentrador Solar / T.Kempfer.
– São Paulo, 2011.
48p.**

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Aquecedor 2.Solar 3.Concentrador 4 Água 5 Parabólico 6
Energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um concentrador solar para aquecimento de fluido. A partir da análise dos concentradores atuais será proposto e construído um novo sistema.

Após um estudo de viabilidade técnica-econômica será definido o tipo de concentrador que será projetado. Dando continuidade ao estudo, será elaborado o projeto básico onde as várias análises (sensibilidade, compatibilidade e estabilidade) serão realizadas e o concentrador será dimensionado e os materiais de fabricação selecionados. A etapa final consiste de ensaios experimentais onde um protótipo será construído e testado para a verificação da eficiência.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a concentrating solar collector for fluid heating. From the analysis of current solar collectors a new system will be built.

A study of technical and economic viability will determine the type of solar collector that will be built. Continuing the study is the project of the collector, where the various analysis (sensitivity, compatibility and stability) will be assessed and the collector is going to be sized and the fabrication material picked. The final stage consists of the results of the experimental tests to verify the collector's efficiency

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo.....	1
1.2 - Descrição das etapas a serem desenvolvidas	1
1.3 – Motivação.....	2
1.4 – Considerações gerais.....	4
2. ESTUDO DE VIABILIDADE.....	5
2.1 Estabelecimento da necessidade	5
2.2 Necessidades declaradas X necessidades reais	5
2.3 Necessidades culturais	6
2.4 Necessidades implícitas	6
2.5 Necessidades percebidas	7
2.6 Síntese das necessidades	7
2.6.1 Energia solar no Brasil	8
3. LEVANTAMENTO DE ALTERNATIVAS.....	10
3.1 Configurações de concentradores	10
4. ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO	15
4.1 O Coletor:.....	15
4.1.1 O absorvedor:	16
4.1.2 Materiais:.....	19
4.1.3 Dimensões:	22
4.2 O Concentrador:	24
4.2.1 Materiais:.....	24

4.2.2 Dimensões:	25
4.3 A Estrutura:	28
4.3.2 Dimensões:	29
5. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	30
5.1 Estrutura:	30
5.2 Concentrador:	31
5.3 Absorvedor:	33
5.4 Montagem:	37
5.4.1 Isolamento térmico:	39
5.5 Custos:	41
6. DESEMPENHO TÉRMICO	42
6.1 Instrumentação:	42
6.2 Condições de ensaio:	43
6.3 Resultados:	44
7 CONCLUSÕES	46
8 BIBLIOGRAFIA	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estabelecimento das Necessidades	7
Tabela 2 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Seleccionados a aproximadamente 300 K (fonte: Incropera).....	22
Tabela 3 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Seleccionados a aproximadamente 300 K (fonte: Incropera).....	25
Tabela 4 - Distancia focal, altura máxima e ângulo de borda do concentrador	27
Tabela 5- Custos do protótipo	41
Tabela 6 - Resultados medidos	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta mundial de energia em tep (fonte: IEA).....	3
Figura 2 - Prioridade para o Brasil (Fonte: IBOPE/Aquecimento Global/2007).....	6
Figura 3 - Mapa de irradiação solar média anual para o território brasileiro (Fonte: Martins - 2005).....	8
Figura 4 - Perfil energético nacional (Fonte: Tolmasquim - 2007)	9
Figura 5 - Concentrador parabólico linear (Fonte: SolarPACES)	11
Figura 6 - Concentrador parabólico composto (Fonte: SolarPACES).....	12
Figura 7 - Concentrador parabolóide (Fonte: SolarPACES)	13
Figura 8 - Coletor com receptor central (Fonte: SolarPACES)	14
Figura 9 - Desenho esquemático de um absorvedor de chapa plana (Fonte: Duffie)	16
Figura 10 - Esquema de coletor plano (Fonte: Duffie)	17
Figura 11 - Dewar com absorvedor cilíndrico (Fonte: Duffie)	17
Figura 12 - Solução esquemática	18
Figura 13 - Distribuição espectral de radiação solar (Fonte: Incropera).....	20
Figura 14 - Dependência espectral das transmitâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados (Fonte: Incropera)	21
Figura 15 - Parábola	26
Figura 16 - Perfil parabólico do concentrador	27
Figura 17 - Posição da Terra com relação à direção dos raios solares.....	28
Figura 18 - Desenho de conjunto da estrutura	29
Figura 19 - Estrutura do coletor	30
Figura 20 - Gabaritos parabólicos	31
Figura 21 – Chapa de alumínio dobrada	32
Figura 22 - Tubos de cobre pintados de preto.....	33
Figura 28 - Tubos de vidro de diâmetro interno 28 mm	35
Figura 29 - Bucha de PTFE.....	36
Figura 30 - Ajuste do tubo de cobre e tubo de vidro.....	36

Figura 31 - Absorvedores.....	37
Figura 32 - Estrutura para o posicionamento do absorvedor no foco do concentrador ...	38
Figura 33 – Montagem da estrutura	38
Figura 34 - Isolamento térmico com lã de rocha.....	39
Figura 35 - Soldagem dos tubos de cobre	40
Figura 36 - Coletor terminado.....	40
Figura 37 - Termopar utilizado	42
Figura 38 - A esquerda sensor do termopar revestido com pasta térmica, a direita o conjunto coberto por espuma elastomérica	43
Figura 39 – Concentração fora do foco, antes do ajuste da inclinação do coletor	43
Figura 40 - Coletor solar em funcionamento	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivo

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um concentrador solar para aquecimento de fluidos. A partir da análise dos concentradores atuais será proposto e construído um novo sistema.

Após a definição do tipo de coletor este será dimensionado e os materiais de fabricação selecionados. Um protótipo será construído e testado para a verificação da eficiência.

1.2 - Descrição das etapas a serem desenvolvidas

- Levantamento no mercado:

Essa etapa consiste na pesquisa de empresas e patentes relacionadas com o tema.

- Levantamento bibliográfico:

Nessa etapa serão colhidas informações referentes ao funcionamento e modelagem de coletores solares, além de pesquisa sobre soluções que ainda não foram implementadas.

- Definição de sistema:

Utilizando as informações obtidas através do levantamento no mercado e bibliográfico serão determinados o tipo de coletor e suas especificações.

- Modelagem de sistema:

Nessa etapa um modelo matemático será proposto para o coletor.

- Protótipo (projeto):

Através do modelo matemático serão definidos os elementos estruturais do protótipo.

- Protótipo (construção):

Nessa etapa o protótipo será construído.

- Teste:

Após a construção serão realizados testes para verificar a eficiência e capacidade do coletor.

1.3 – Motivação

A maioria dos cientistas que estudam o clima convenceu a si mesmos e a muitos leigos, algum dos quais possuem poderes políticos, que o clima da terra está mudando; que a mudança, do ponto de vista da humanidade, é para pior; e que a causa é a atividade humana na forma de emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono. Porém, uma minoria permanece cética. (The Economist – 2009)

O aquecimento global provocado pelo efeito estufa consiste no aumento da temperatura média da terra provocado pelo deslocamento do equilíbrio da troca de calor por radiação do planeta. Gases como o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e hidrofluorcarbonos, emitidos predominantemente pelo setor de transportes, indústria e por queimadas de pastagens e florestas, absorvem parte da radiação infravermelha devolvida pela terra ao espaço e provocam o aumento da temperatura atmosférica e as conseqüentes mudanças climáticas.

O princípio de funcionamento de um concentrador solar inclui maximizar a radiação solar absorvida, nesse sentido a utilização de energia solar contribuiria para o aquecimento global, já que teria o mesmo efeito dos gases ao manter a energia da radiação solar na atmosfera.

Porém o que foi determinado pelos leigos com poderes políticos através do protocolo de Kyoto e ao longo de inúmeras negociações como em Copenhague em 2009 estabelece restrições somente para o efeito dos gases o que aumenta a viabilidade de uma solução para a demanda de energia baseada na utilização direta da radiação solar.

Contudo, o principal incentivo ao uso de concentradores solares é o enorme potencial energético de sua fonte. A terra recebe energia radiante do sol a um regime de $1,7 \times 10^5$ GW (Momoi – 2005) ao longo de um ano representa um total de $5,3 \times 10^{12}$ GJ, ou 130 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Isso significa que se apenas

10% dessa energia fosse utilizada seria possível dobrar a oferta mundial de energia, que, segundo a IEA (International Energy Agency) em 2007 foi de 12 bilhões de tep.

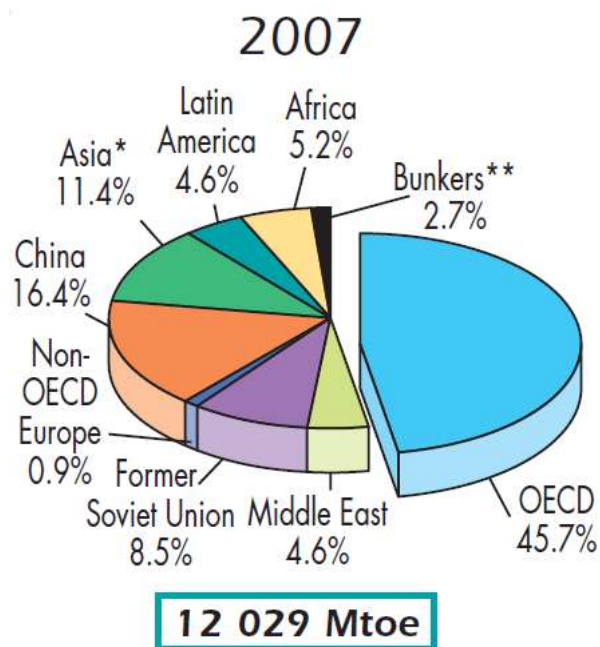


Figura 1 - Oferta mundial de energia em tep (fonte: IEA)

Porém para extrair todo esse potencial do sol seria necessário construir os coletores fora da atmosfera porque aproximadamente 30% da radiação incidente se reflete sem mudança na amplitude de onda; cerca de 47% é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, provoca um aumento de temperatura e em seguida irradia-se novamente para o espaço. Apenas os 23% restantes penetram no sistema terrestre e passam a ser força motriz de ventos, correntes, ondas, modela nosso clima e proporciona o ciclo da água. Em última instância, também será re-irradiado ao espaço (Momi – 2005).

Ou seja, o real potencial de utilização da energia solar seria menor que 47% do valor calculado anteriormente, o que ainda é uma quantidade maior que qualquer demanda imaginável para o próximo século.

1.4 – Considerações gerais

A sociedade moderna necessita de várias formas de energia, porém, apesar de engenhosos métodos de conversão de energia, sua fonte está centralizada desde a segunda revolução industrial nos combustíveis fósseis.

A voracidade com que os recursos vêm sendo consumidos levou a questões sobre a estabilidade do modelo energético atual e cabe aos engenheiros proporem soluções dentro de restrições impostas pela sociedade. As principais restrições estão relacionadas ao meio ambiente, a viabilidade econômica e ao consumo sustentável. Uma fonte renovável atende a primeira e a terceira restrição e é em função da segunda que este trabalho é proposto.

A energia solar é uma fonte renovável que pode ser convertida em potência mecânica e elétrica e ainda ser utilizada diretamente como fonte de um concentrador solar.

2. ESTUDO DE VIABILIDADE

2.1 Estabelecimento da necessidade

O início de qualquer projeto é sempre devido a uma necessidade (Kaminski). Nessa seção as necessidades que originaram esse projeto serão apresentadas e definidas técnica e quantitativamente.

2.2 Necessidades declaradas X necessidades reais

Ao observar a política ambiental do país é possível estabelecer algumas necessidades declaradas. De acordo com o programa sobre energia do Partido Verde:

“Os verdes defendem um modelo energético sustentável baseado prioritariamente em energias renováveis, tecnologias limpas, redução de desperdícios e numa política de preços e subsídios compatíveis.

Cabe:

- Estimular o investimento no uso e pesquisa da energia solar objetivando seu barateamento e aprimoramento. Isentar de taxa de importação insumos e produtos que contribuam com esse objetivo.”

Como um partido político o PV procura representar os valores de uma parcela da população, dessa forma suas propostas são uma boa medida de necessidades declaradas.

A imprensa também é uma boa medida de necessidades declaradas, e inúmeros artigos sobre aquecimento global e emissões de gases de efeito estufa são constantemente publicados, associado a isso o protocolo de Kyoto explicita a necessidade de fontes alternativas ao petróleo.

Com relação a questões ambientais ainda se destaca a necessidade de novas fontes de energia devido à crescente demanda energética, Barros (2007) estima que a demanda energética mundial cresça 2% ao ano.

Apesar de todas as questões macroscópicas talvez as necessidades mais críticas estejam relacionadas com o consumidor final, que para o produto proposto neste

trabalho pode ser o governo, uma empresa ou um consumidor doméstico. Para esses as questões críticas referem-se a custos, facilidade de implementação e eficiência na substituição de tecnologias pré-existentes.

2.3 Necessidades culturais

Segundo a WWF do Brasil as mudanças climáticas estão entre as maiores preocupações dos brasileiros hoje. Os cidadãos acreditam estar fazendo esforços pessoais para mudar seu estilo de vida em função dessas mudanças e, assim como a maior parte da população mundial, estão preparados para estas mudanças.

Resultados divulgados pelo IBOPE em 2007 deixam clara esta preocupação dos brasileiros com o aquecimento global:



Figura 2 - Prioridade para o Brasil (Fonte: IBOPE/Aquecimento Global/2007)

2.4 Necessidades implícitas

No caso de consumidores domésticos uma necessidade implícita satisfeita pelo concentrador solar é a independência de grandes projetos de distribuição de energia, como redes elétricas ou dutos de transporte de gás. O usuário não ficaria mais sujeito a terceiros para obter energia na forma de água quente ou eletricidade.

2.5 Necessidades percebidas

É possível agregar valor ao concentrador explorando o impacto inicial das vendas como um produto moderno, atraindo consumidores pelo aspecto estético ou por passar uma imagem de preocupação ambiental. Essa necessidade percebida pelo cliente pode ser atendida sem necessariamente alterar as configurações técnicas do produto, bastando algumas alterações estéticas ou uma campanha de marketing que valorize esses aspectos.

2.6 Síntese das necessidades

Tabela 1 - Estabelecimento das Necessidades

Necessidades declaradas x reais	- Modelo energético baseado em energia renovável - Tecnologia limpa - Protocolo de Kyoto - Atender a crescente demanda energética - Substituir tecnologias pré-existentes - Custo energético compatível com o praticado no mercado
Necessidades culturais	- Questões ambientais - Aquecimento global
Necessidades implícitas	- Independência de distribuição
Necessidades percebidas	- Estética moderna/tecnológica

2.6.1 Energia solar no Brasil

O Brasil é muito privilegiado para a utilização de energia solar, tanto pela sua extensa área quanto pela uniformidade da radiação recebida, já que a maior parte do território nacional encontra-se entre o equador e o trópico de capricórnio. A figura 3 mostra a radiação solar global que o Brasil recebe por dia.

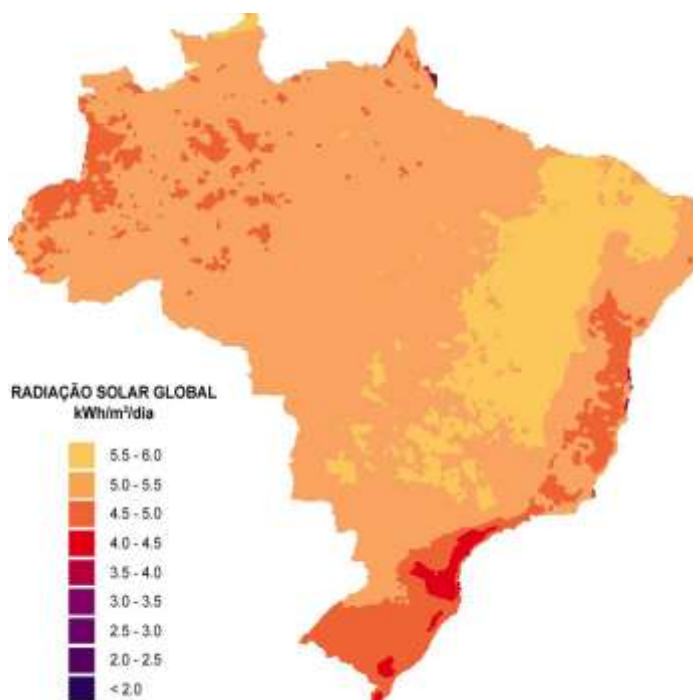


Figura 3 - Mapa de irradiação solar média anual para o território brasileiro (Fonte: Martins - 2005)

Do mapa fica visível a uniformidade da irradiação solar no Brasil, com as regiões sul e sudeste com a menor média, porém ainda bastante intensa, da ordem de 4 kWh/m²/dia, e em regiões do centro oeste e nordeste essa média chega a 6 kWh/m²/dia.

Considerando o consumo médio de uma residência em torno de 7kWh/dia um coletor com uma área projetada de 2 m² seria capaz de alimentar uma residência em qualquer região do país.

Apesar do grande potencial natural para a utilização da energia solar, o seu aproveitamento ainda é mínimo, de acordo com Tolmasquim – 2007 a utilização de energia solar era menor que 2% da energia produzida no Brasil.

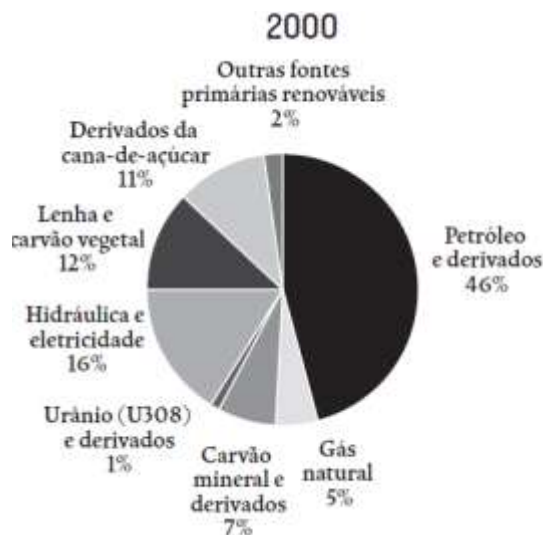


Figura 4 - Perfil energético nacional (Fonte: Tolmasquim - 2007)

Esses dados mostram o enorme potencial para a aplicação de energia solar no Brasil, associado a isso ainda são poucas as empresas que trabalham com essa tecnologia (pode-se citar: SS Solar, Ultra Solar, Passuelo Tec).

3. LEVANTAMENTO DE ALTERNATIVAS

Concentradores solares transferem energia a uma temperatura maior que a possível pela incidência natural de radiação, isso ocorre porque a área de perda de calor é reduzida por meio de um mecanismo óptico.

3.1 Configurações de concentradores

Existem muitas configurações de concentradores, podem ser refletores ou refratores, cilíndricos para focar em uma linha ou circulares com foco em um ponto.

Concentrador parabólico linear:

A superfície refletora em forma de parábola concentra a radiação em seu foco onde está o receptor (elemento do sistema onde a radiação é absorvida e convertida em outra forma de energia).

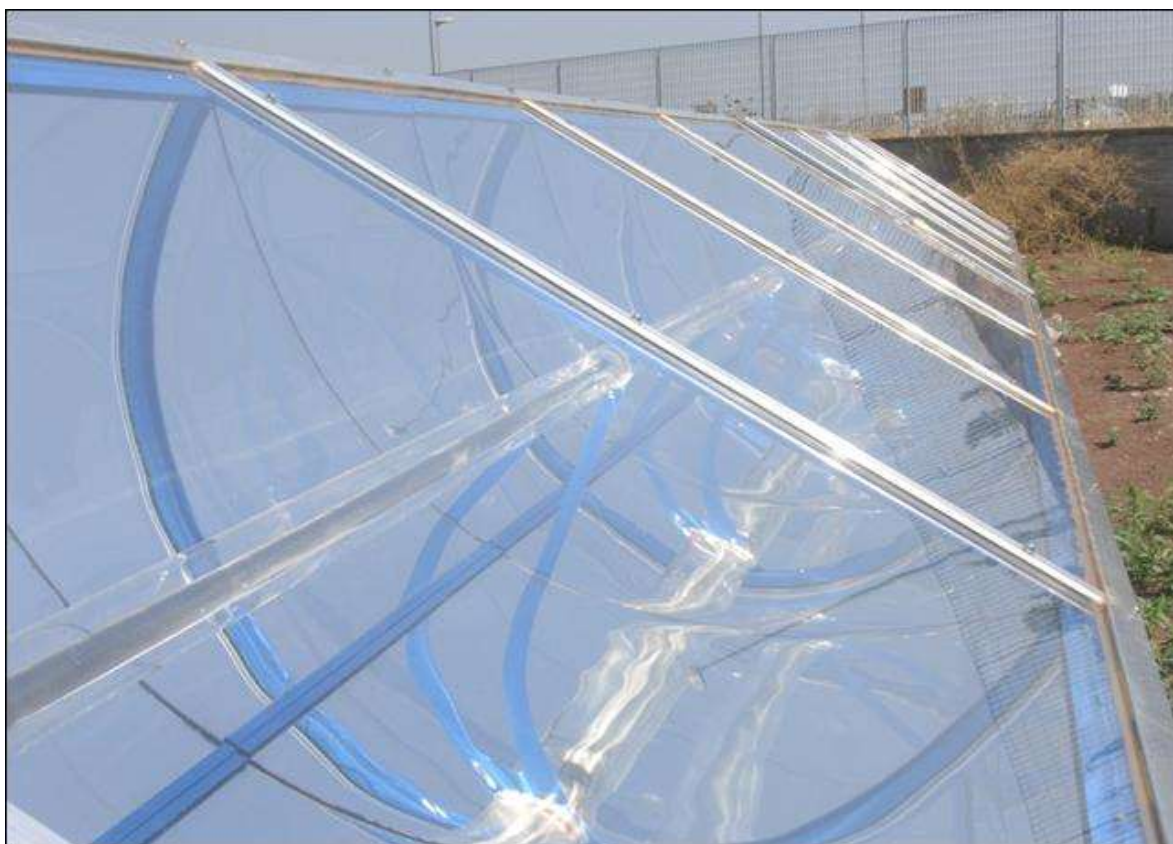


Figura 5 - Concentrador parabólico linear (Fonte: SolarPACES)

Concentrador parabólico composto:

Esse concentrador tem a característica de se ajustar a diversos ângulos de incidência de radiação com pouca necessidade de ajustes de posição.

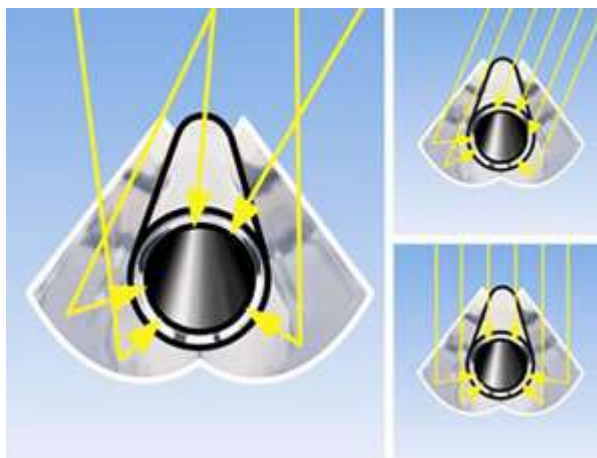


Figura 6 - Concentrador parabólico composto (Fonte: SolarPACES)

Concentrador parabolóide:

Consiste de uma superfície formada pela revolução de uma parábola, e, portanto, concentra a radiação em um único ponto.



Figura 7 - Concentrador parabolóide (Fonte: SolarPACES)

Concentrador com receptor central:

Uma torre centra capta a radiação de diversos espelhos.



Figura 8 - Coletor com receptor central (Fonte: SolarPACES)

4. ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO

O concentrador solar foco desse projeto será dividido em três partes essenciais, o coletor (ou receptor), o refletor (ou concentrador) e a estrutura. O coletor é o componente onde a radiação é absorvida e convertida em energia interna, a radiação é transmitida ao coletor pelo refletor e a estrutura é o que dá sustentação mecânica ao conjunto.

Além desses elementos, coletores solares também possuem controles e mecanismos de posicionamento e de sistemas de conversão da energia interna (ciclos de absorção, turbinas a vapor, entre outros).

4.1 O Coletor:

Neste tópico serão discutidas as variáveis e as considerações sobre o projeto que levarão a melhor solução para o coletor (ou receptor) separadamente.

Como discutido anteriormente o coletor é o componente do concentrador que absorve a energia vinda do sol na forma de radiação em outra forma mais útil de energia. No caso das células fotovoltaicas, ou fotoelétricas a energia luminosa é convertida em energia elétrica, já os absorvedores planos e cilíndricos convertem em energia térmica, ou, mais conceitualmente, em energia interna do fluido de trabalho.

O objetivo desse projeto é construir um concentrador solar de alta eficiência, portanto o foco principal está em maximizar a eficiência da conversão da radiação solar, e não a global do sistema. Portanto não é considerado o rendimento de uma subsequente utilização da energia disponível, conseqüentemente os absorvedores planos e cilíndricos que disponibilizam energia interna são mais interessantes pois não apenas são de mais simples fabricação como apresentam taxas maiores de conversão de radiação.

4.1.1 O absorvedor:

Existem várias configurações para os absorvedores, no caso de não haver uma superfície concentradora de radiação (caso dos coletores solares planos) o absorvedor é constituído, basicamente de uma chapa plana de material com elevada absortividade tanto para radiação difusa (a que é emitida pelo ambiente) quanto para radiação direta (emitida diretamente pelo sol).

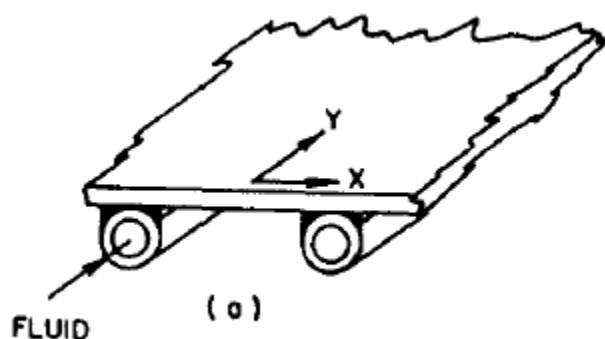


Figura 9 - Desenho esquemático de um absorvedor de chapa plana (Fonte: Duffie)

Para o caso de coletores planos, a utilização desse tipo de absorvedor é direta. Um sistema simples e eficiente para sua utilização pode ser visto na figura 10, onde está representado, esquematicamente, o absorvedor montado sobre uma base isolante para evitar a perda de calor na forma de condução e também duas coberturas que tem a finalidade de proteger a chapa do absorvedor contra corrosão e intempéries como podem ser usados para conter vácuo, o que evitaria a perda de calor por convecção. No esquema, o fluido de trabalho circula pelos tubos onde é aquecido.

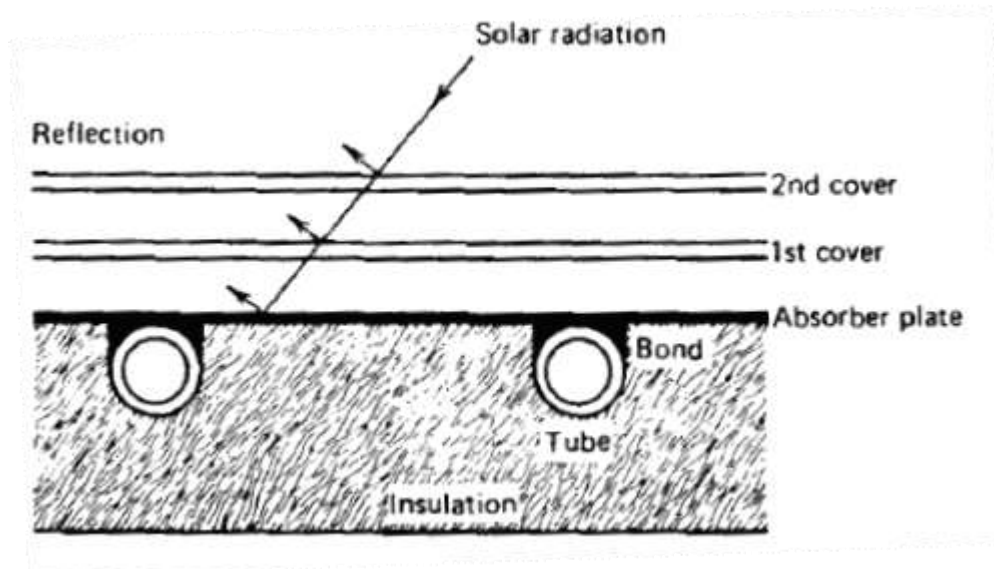


Figura 10 - Esquema de coletor plano (Fonte: Duffie)

Baseados no mesmo princípio dos absorvedores planos existem os cilíndricos, que são, basicamente, absorvedores planos enrolados para formar um cilindro. Existem algumas vantagens para essa geometria, principalmente quando utilizado em concentradores, pois não são necessárias tolerâncias tão rígidas para a posição do foco do concentrador (posição onde os raios de luz convergem) e, ainda, é mais fácil evacuar um espaço cilíndrico do que plano.

Um exemplo típico de absorvedor cilíndrico em conjunto com um recipiente evacuado é dado na figura 11:

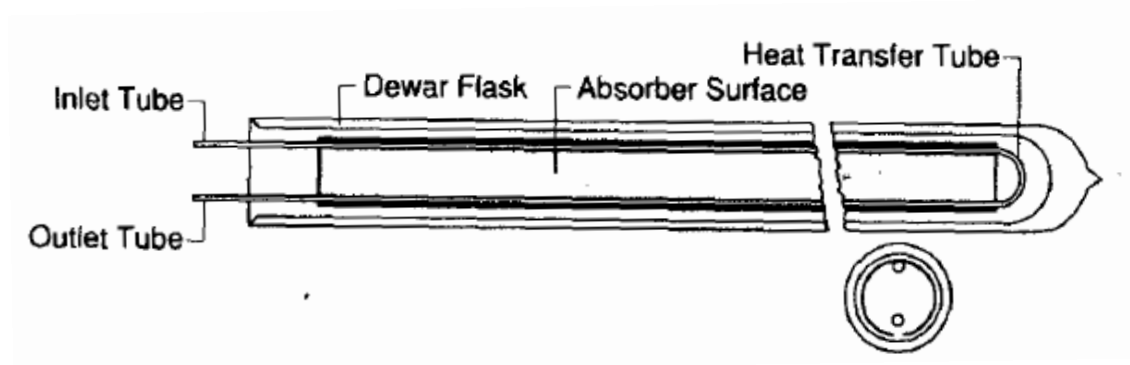


Figura 11 - Dewar com absorvedor cilíndrico (Fonte: Duffie)

A superfície absorvedora recebe radiação e troca calor, principalmente, com os tubos de entrada e saída. Uma parte da energia é perdida na forma de radiação reemitida pelo absorvedor e pela condução através do tubo, porém os efeitos da convecção são eliminados.

O frasco Dewar é tipicamente utilizado para evitar trocas de calor, existem versões para conservar o fluido no interior a uma temperatura desejada, que são muito utilizados em criogenia e para o transporte de gases no estado líquido.

O absorvedor escolhido para esse projeto será cilíndrico, porém, não será utilizado o frasco Dewar como no exemplo, em vez deste, será utilizado um recipiente formado por dois cilindros concêntricos, com a superfície absorvedora fixada no interno e entre o interno e o externo haverá isolamento, estando o externo em contato com o ambiente. Nesse caso não haverá tubo de entrada e saída, pois ambas as extremidades dos cilindros estarão abertas, possibilitando que o cilindro interno, juntamente com a superfície absorvedora, funcione como tubo condutor do fluido de trabalho.

A principal vantagem dessa configuração de absorvedor é a facilidade de construção, já que o tubo que servirá de superfície absorvedora funciona para conter o fluido.

A figura 12 ilustra a solução proposta:

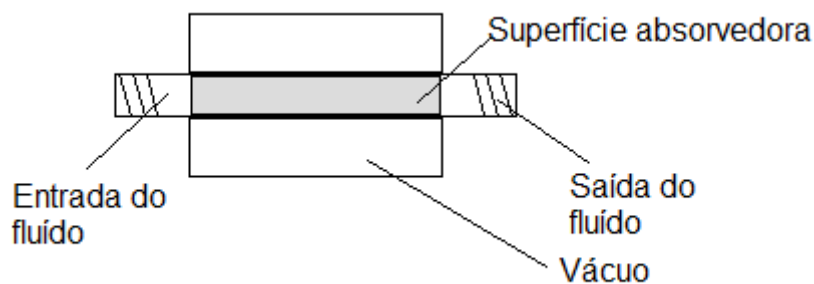


Figura 12 - Solução esquemática

Porém existem algumas desvantagens para essa configuração, a principal é que ao acoplar o diâmetro da superfície absorvedora ao da tubulação por onde escoar o fluido de trabalho, para uma mesma área de troca e vazão, a temperatura de saída do fluido será sempre menor do que a do caso típico dado como exemplo. Isso ocorre porque, para uma mesma vazão, a velocidade do fluido no caso típico é maior (menor diâmetro) o que proporciona uma maior troca por convecção, e conseqüentemente uma maior temperatura de saída.

4.1.2 Materiais:

São dois os materiais que devem ser selecionados para o coletor, um é o da estrutura que conterá o vácuo, o outro é o do absorvedor.

Como visto, a estrutura que conterá o vácuo deve, idealmente, não interferir na troca de calor por radiação, deve ser capaz de resistir às tensões provocadas pelo gradiente de pressão entre o ambiente e o vácuo e ainda deve servir de apoio para o absorvedor e transportar o fluido.

Para a condição de não interferir na troca de radiação a propriedade física que representa essa característica é a transmissividade do material semitransparente. Materiais com transmissividade elevada para todos os comprimentos de onda são caros e não interessam para aplicações com concentradores. Isso ocorre porque o mecanismo óptico do concentrador aumenta a radiação direta recebida pelo absorvedor, como será visto, o efeito do absorvedor é de aumentar a área onde há incidência de radiação direta sobre o absorvedor.

Portanto a principal característica da estrutura que estará evacuada é a transmissividade para a radiação solar. As características da radiação solar são bem conhecidas (figura 13), com irradiação espectral de maior intensidade nos comprimentos de onda visíveis, assim materiais transparentes são, naturalmente, as melhores opções para o material do tubo evacuado.

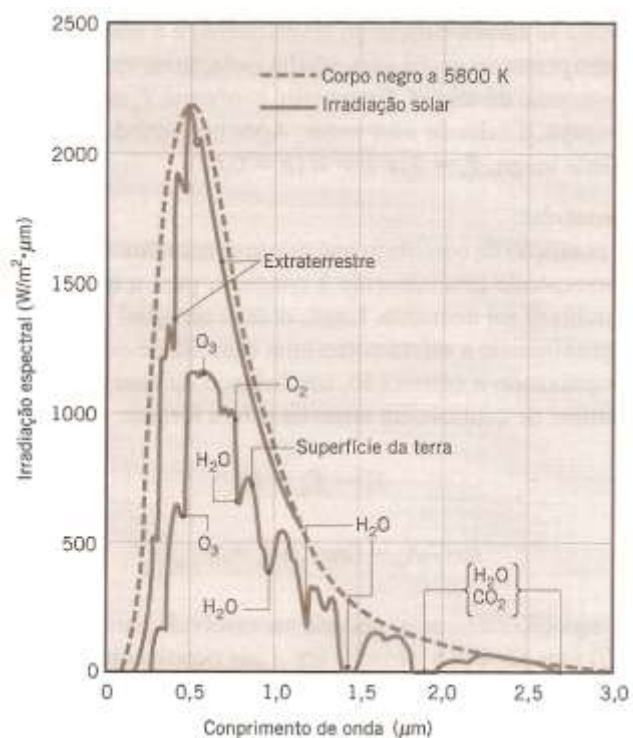


Figura 13 - Distribuição espectral de radiação solar (Fonte: Incropera)

A figura 14 mostra como a transmitância espectral (transmitância para cada comprimento de onda) varia com o comprimento de onda da radiação para alguns materiais. Através desse gráfico é possível selecionar o melhor material, para isso basta compará-lo à figura 13 de forma que quanto maior for a área da multiplicação dos gráficos maior será a radiação transmitida.

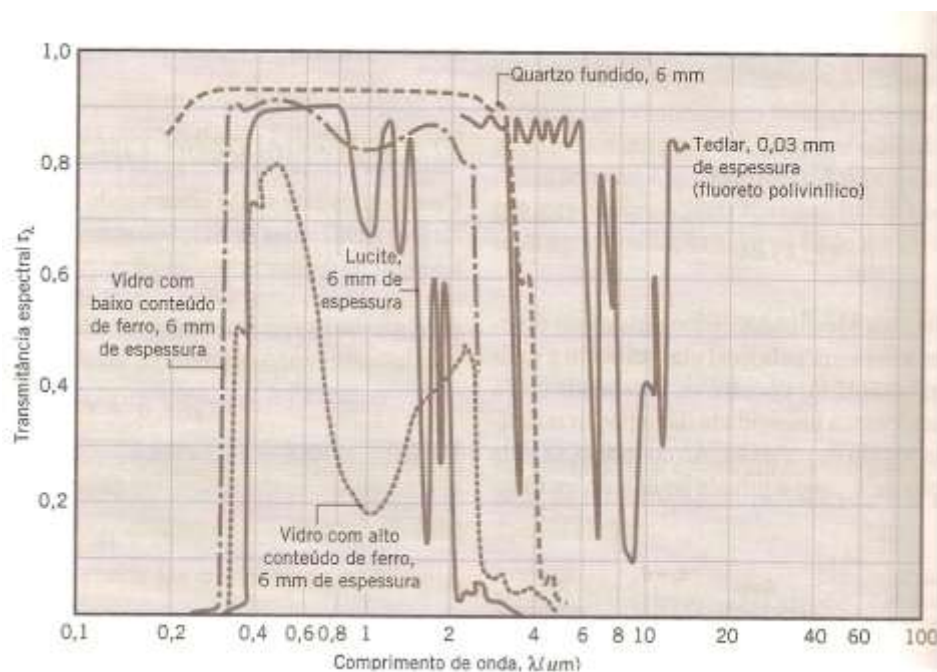


Figura 14 - Dependência espectral das transmitâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados (Fonte: Incropera)

Da análise dos gráficos vê-se que os materiais mais interessantes são o quartzo fundido, vidro com baixo conteúdo de ferro e lucite. Porém como o projeto tem por objetivo a construção de um protótipo de baixo custo a facilidade em encontrar materiais torna o vidro comum (alto conteúdo de ferro) a alternativa mais atrativa. A integral no comprimento de onda da multiplicação da irradiação espectral do sol com a transmitância espectral fornece a transmissividade total que, para um vidro comum de 3 mm de espessura, vale 0,79 (Fonte: tabela A.12, Incropera). Isso significa que 79% da irradiação que atinge o vidro será transmitida através dele.

Para o material do absorvedor a característica física essencial é a alta absortividade para a radiação solar direta, uma análise similar ao da transmissividade pode ser feita para determinar o material a ser usado, porém a tabela A.12 de Incropera e DeWitt (tabela 2) apresentam os resultados de maneira simplificada para superfícies de vários materiais:

Tabela 2 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Seleccionados a aproximadamente 300 K (fonte: Incropera)

Descrição/Componente	α_s	ϵ
Metal, revestido		
Sulfeto negro	0,92	0,10
Óxido de cobalto negro	0,93	0,30
Óxido de níquel negro	0,92	0,08
Cromo negro	0,87	0,09
Placa de metal galvanizada		
Limpa, nova	0,65	0,13
Oxidada ao tempo	0,80	0,28
Tintas		
Negras (Parsons)	0,98	0,98
Branca, acrílica	0,26	0,90

Analizando a tabela unicamente com base na absortividade dos materiais a melhor opção seria simplesmente a superfície com maior α (tinta negra), porém esse material apresenta alta emissividade, o que ocasionaria maiores perdas por radiação no absorvedor, portanto uma opção mais interessante são os metais revestidos ou galvanizados. Contudo, visando simplificar a fabricação do protótipo é mais interessante utilizar a tinta negra para revestir um material de alta condutividade térmica, como o cobre ou alumínio.

4.1.3 Dimensões:

As principais restrições do projeto estão relacionadas com custo, portanto não será possível ter muita precisão na fabricação dos componentes, o que reflete diretamente no fator de concentração (razão da área útil do refletor pela área do absorvedor).

É ainda necessário levar em consideração o espaço ocupado pelo protótipo, que refletirá a quantidade de material empregada e, conseqüentemente, o custo. Assim a área útil do concentrador será definida em $1,0 \text{ m}^2$.

Uma consideração importante para esse projeto é que o coletor deve ser compacto. Dessa forma a área será dividida em 3 partes para reduzir a altura do foco da parábola e tornar o sistema mais compacto.

4.2 O Concentrador:

O concentrador tem a função de concentrar a radiação solar direta que o equipamento recebe, o que reduz a área submetida à troca de calor e conseqüentemente haverá menos perdas. Por essa característica, as temperaturas que podem ser atingidas são muito maiores que em comparação com coletores planos.

O funcionamento do concentrador tem natureza puramente óptica, pois altera a direção de propagação dos raios solares de tal forma que passem por um ponto em comum, denominado foco. Isso pode ser conseguido através da utilização de uma superfície refletora com uma geometria que proporcione esse fenômeno (como será visto) ou através da refração através de um material semitransparente.

A restrição ao uso desse equipamento está na necessidade de radiação direta, é necessário que os raios sejam paralelos para haver a convergência, a radiação difusa da atmosfera e de outros objetos não é concentrada, ao ponto que é desprezível a contribuição da radiação difusa para a determinação da energia que chega ao absorvedor.

O refletor que será construído nesse projeto será refletor, linear formador de imagem, tendo em vista o fator de concentração e a facilidade em construir e de obter materiais com baixo custo, já que o refletor ocupa grande parte do espaço físico do protótipo o baixo custo do material é essencial para o custo global do protótipo.

4.2.1 Materiais:

A solução de um concentrador que reflete a radiação solar impõe que, para reduzir as perdas, é necessário que o material que será utilizado possua alta refletividade. Para a seleção do material baseado na refletividade apresenta os mesmos problemas como já visto no absorvedor e na estrutura evacuada. A refletividade de uma superfície depende do ângulo da radiação incidente e do seu comprimento de onda, porém fatores como polimento da superfície afetam de maneira muito significativa suas propriedades.

O que será levado em consideração para a seleção do material é a refletividade para a radiação solar de alguns materiais selecionados, de acordo com a tabela 4 e

fazendo a mesma análise elaborada na seção 4.1.2 para a absorvidade é possível definir alguns materiais mais interessantes para essa aplicação.

A tabela 3 foi extraída da tabela A.12 de Incropera e DeWitt, lembrando que, para materiais opacos ρ (refletividade) = $1 - \alpha$ (absorvidade).

Tabela 3 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Selecionados a aproximadamente 300 K (fonte: Incropera)

Descrição/Componente	ρ_s	ϵ
Alumínio		
Polido	0,91	0,03
Anodizado	0,86	0,84
Revestido de quartzo	0,89	0,37
Folha	0,85	0,05
Tintas		
Branca, óxido de zinco	0,84	0,93
Branca, acrílica	0,74	0,90

O material escolhido com base na tabela e levando em consideração custos e facilidade de obtenção e fabricação é o alumínio em folha.

4.2.2 Dimensões:

O concentrador, como visto, é um aparato óptico que concentra os raios solares. O mecanismo pelo qual isso é possível utiliza as propriedades geométricas da parábola, segundo a proposição 22-35 de Camargo e Boulos: “Sejam $T = (h,k)$ um ponto da parábola $\mathbf{P}$: $y^2 = 4.p.x$, t a reta tangente e s a reta normal a $\mathbf{P}$ em T . Seja r a reta que contém T e é paralela ao eixo da parábola. Então, s e t contêm as bissetrizes dos ângulos formados pelas retas r e TF .”

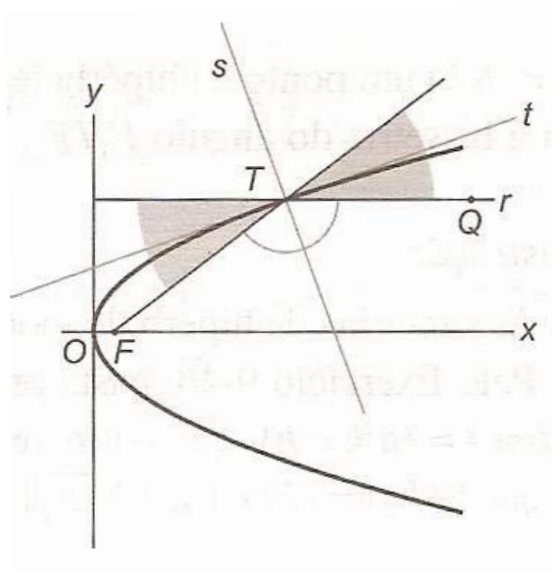


Figura 15 - Parábola

Combinando a propriedade da parábola com a Lei de reflexão vê-se que qualquer raio de luz que chega paralelo ao eixo de simetria da parábola e é refletido em sua superfície interna convergirá para o foco (ponto F).

Na equação que descreve a parábola o parâmetro p é igual a $2.f$, sendo f a distância do vértice (O) ao foco (F), assim:

$$y^2 = 4.f.x$$

Conhecida a abertura da parábola (a) (que foi determinada na seção 4.1.3 em 0,333 m) para escolher a distância focal (f) um critério importante é que o foco fique posicionado abaixo do ponto mais alto da parábola que poderá servir de base para uma cobertura de vidro para proteger o concentrador da deposição de materiais sobre a superfície refletora.

A tabela 4 apresenta a máxima altura da parábola ($x(a/2)$) para vários valores de f :

Tabela 4 - Distancia focal, altura máxima e ângulo de borda do concentrador

f (m)	x (a/2) (m)	Φ_r (°)
0,01	0,694444	165,71
0,05	0,138889	69,86
0,055	0,126263	60,65
0,06	0,115741	53,29
0,065	0,106838	47,42
0,07	0,099206	42,67
0,083	0,083668	33,87

O ângulo de borda (ângulo formado pelo raio que incide na borda do concentrador e é refletido para o foco com o vértice da parábola) está relacionado com a eficiência do concentrador em refletir a radiação incidente de tal forma que quanto maior o ângulo menor é a eficiência.

Com base nos critérios anteriores e levando em consideração o ângulo de borda a alternativa escolhida para a distância focal foi de 8,3 cm e altura máxima da parábola de 8,4 cm e Φ_r de 33,87°.

Conhecidas as características da parábola a geometria está definida e é ilustrada na figura 16:

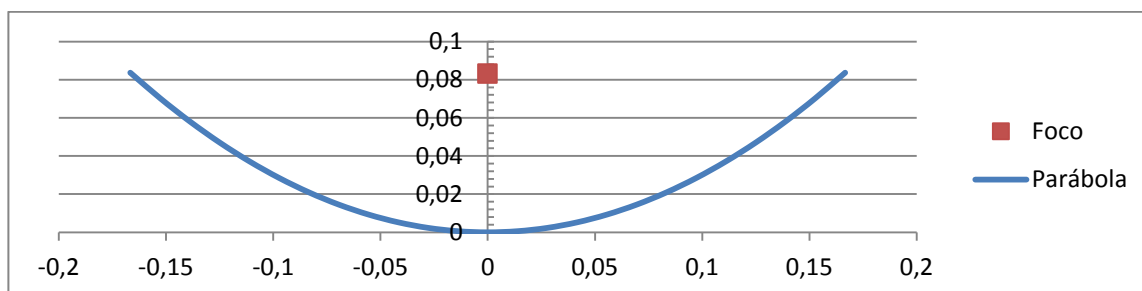


Figura 16 - Perfil parabólico do concentrador

4.3 A Estrutura:

A finalidade da estrutura é manter os componentes do sistema em uma posição que otimiza a irradiação solar incidente no absorvedor. Para isso ela precisa suportar intempéries e ser capaz de posicionar o refletor e absorvedor.

O vértice da parábola do refletor estará posicionado na direção Leste-Oeste, pois não haverá o reposicionamento ao longo do dia, assim o ângulo de inclinação superfície do refletor com o plano horizontal (β) será dado por:

$$\beta = |\phi - \delta|$$

Como mostrado na figura 17 o ângulo ϕ corresponde à latitude (norte positivo) e δ a inclinação do eixo de rotação da terra.

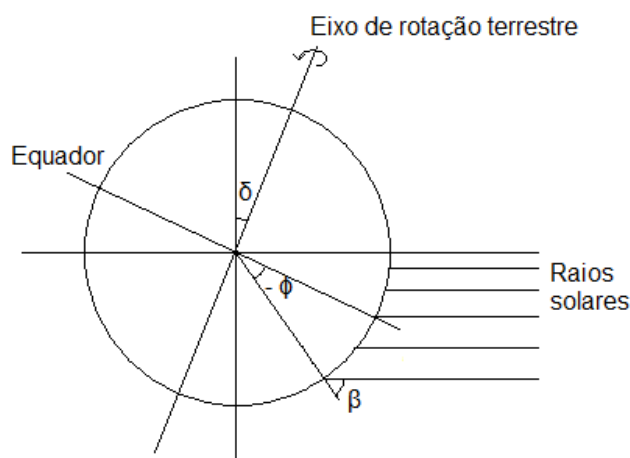


Figura 17 - Posição da Terra com relação à direção dos raios solares

O ajuste de β deve ser feito sazonalmente, pois δ varia ao longo do ano (responsável pelas estações do ano). Contudo, mesmo com o ajuste, essa posição do refletor só será ótima para o meio-dia.

Um dispositivo poderia ser construído para que o ajuste para qualquer época do ano seja possível para a estrutura do coletor, para tanto é necessário que seja possível o

ajuste para qualquer época do ano, dessa forma o máximo ângulo que deve ser ajustado para a cidade de São Paulo, cuja latitude é de $-23^{\circ}32'51''$, é:

$$\beta = |23,45^{\circ} + 23^{\circ}32'51''| = 47^{\circ}$$

4.3.2 Dimensões:

O desenho de conjunto da estrutura é apresentado na figura 18, juntamente com um sistema para o posicionamento do coletor.

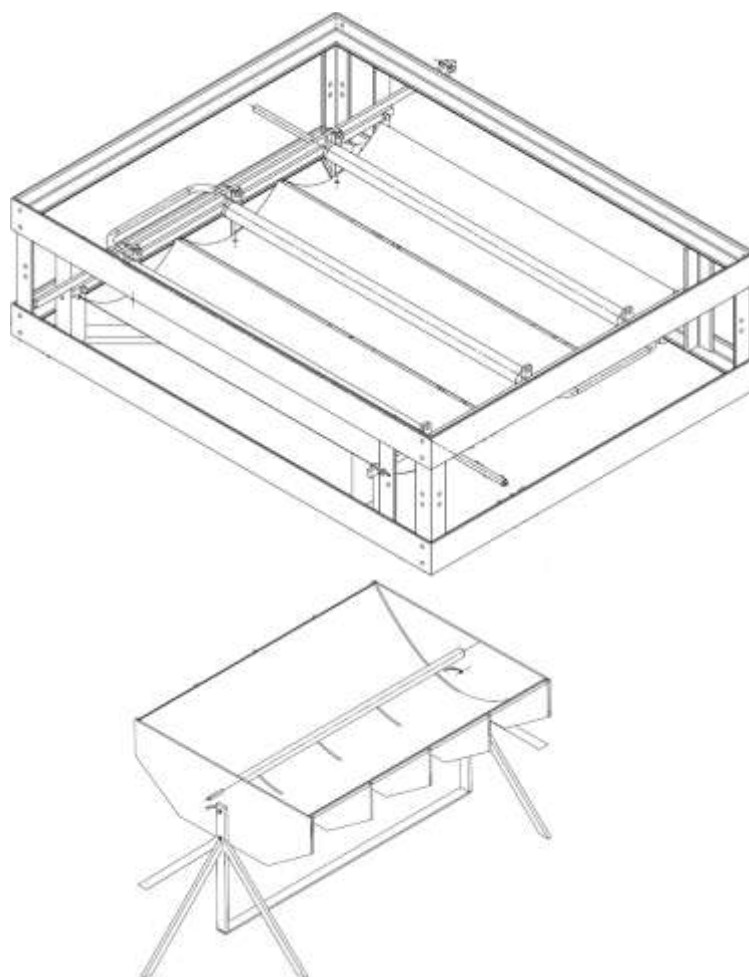


Figura 18 - Desenho de conjunto da estrutura

5. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

5.1 Estrutura:

A construção do protótipo foi iniciada com a montagem da estrutura de sustentação do coletor. Para esta foram utilizadas cantoneiras de aço, em L e em T, soldadas para formar uma caixa, conforme a figura 19.

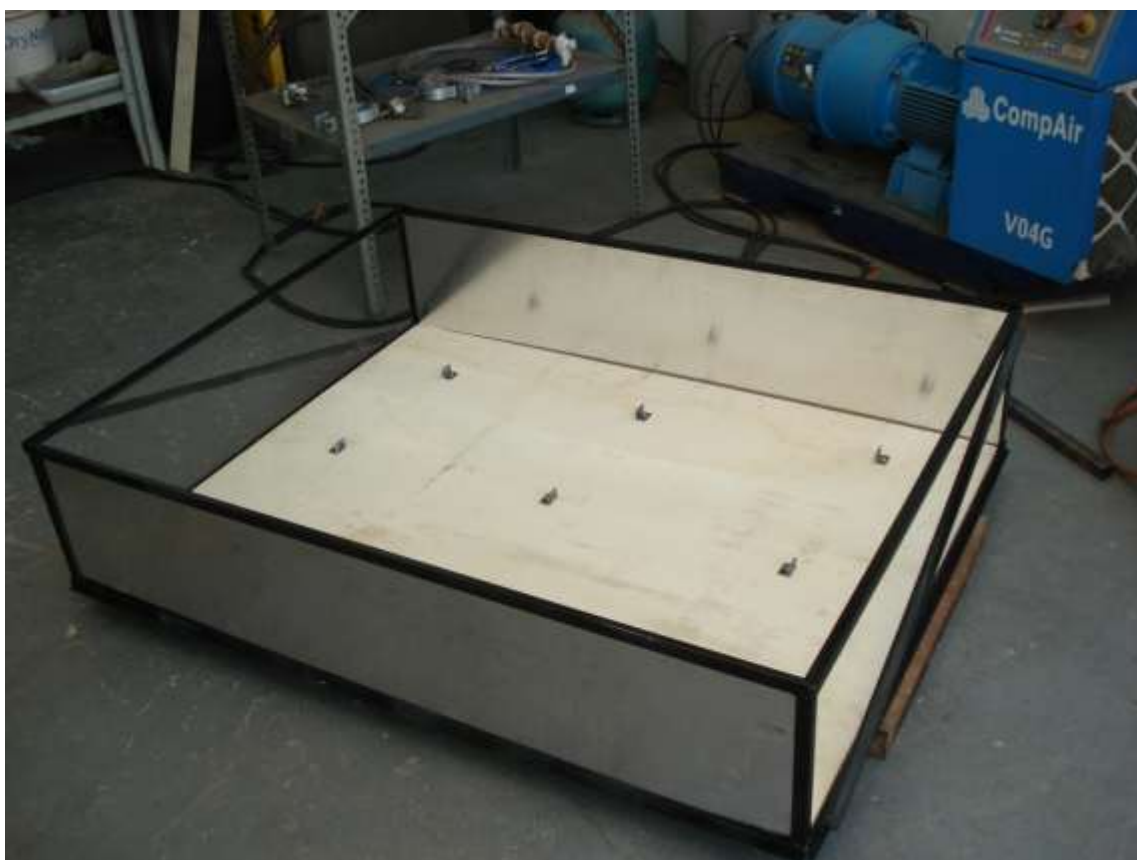


Figura 19 - Estrutura do coletor

Por ser de aço carbono as cantoneiras tiveram que ser pintadas para evitar que corroessem ao longo do tempo.

A base da estrutura é composta de compensado para possibilitar a fixação dos gabaritos parabólicos da figura 20.



Figura 20 - Gabaritos parabólicos

Os gabaritos parabólicos são necessários para conformar o concentrador que refletirá a radiação no foco da parábola.

5.2 Concentrador:

O concentrador é o elemento responsável por concentrar a radiação incidente na área de abertura do coletor focando na área do absorvedor. Para essa aplicação foram utilizadas três chapas de alumínio (alta refletividade) de 1x385x1000 mm da figura 21.



Figura 21 – Chapa de alumínio dobrada

Para possibilitar que a chapa acompanhasse o perfil parabólico da figura 20 foi necessário utilizar uma calandra para curvar a chapa a uma curvatura próxima ao perfil parabólico. A chapa curvada foi então fixada ao gabarito parabólico de maneira a garantir a curvatura desejada.

A área de abertura do concentrador foi estabelecida em 1 m^2 , de forma que cada chapa, quando dobrada, apresentaria $0,33 \text{ m}^2$ de área projetada. A área projetada é a área correspondente à projeção da área da chapa na superfície normal à direção da radiação solar incidente.

5.3 Absorvedor:

O absorvedor é o elemento que converte a radiação solar em energia interna do fluido de trabalho, sendo, portanto, o elemento que troca calor.

Para essa aplicação foram utilizados tubos de cobre DN 15 pintados de preto (figura 22).



Figura 22 - Tubos de cobre pintados de preto

Nessas condições os tubos de cobre têm alta capacidade de absorver radiação e de transferir calor para a água (alta condutividade), porém também estão sujeitos a perder calor por convecção e condução.

Para evitar as perdas por convecção foram utilizados tubos de vidro envolvendo os tubos de cobre com uma fina camada de ar, de maneira que, nessa camada, só existisse condução através do ar, cujo coeficiente de condutividade térmica é

0,030 W/m.K (Incropera), o que o caracteriza como um isolante térmico. Tal característica do ar somada à sua alta transmissividade tornam-no uma ótima alternativa para o isolamento térmico do coletor.

Porém é necessário estabelecer qual espessura a camada de ar deve apresentar. Uma camada muito fina implicaria em maiores perdas por condução, enquanto uma camada muito espessa poderia acarretar em trocas por convecção. Para garantir a máxima espessura possível onde os efeitos de convecção do ar não são relevantes foram utilizados os resultados de Raythby e Hollands (Incropera) para a convecção livre com fluido confinado no espaço anular entre cilindros longos, horizontais concêntricos. Esse estudo estabelece que se $Ra_c^* < 100$ não haverá efeitos de convecção no fluido confinado, sendo:

$$Ra_c^* = \frac{\left[\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) \right]^4}{L^3 \left(D_i^{-3/5} + D_0^{-3/5} \right)^5} \cdot Ra_L$$

E,

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_e)L^3}{\nu\alpha}$$

Sendo:

Ra_L o número de Rayleigh (adimensional);

D_0 o diâmetro interno do tubo de vidro (mm);

D_i o diâmetro externo do tubo de cobre (15 mm);

L a espessura da camada de ar (mm);

g a aceleração da gravidade (m/s²);

β o coeficiente de expansão térmica volumétrica (K⁻¹);

T_i a temperatura da superfície do tubo de cobre (máxima de $\approx 100^\circ\text{C}$);

T_e a temperatura da superfície interna do tubo de vidro ($\approx 62^\circ\text{C}$);

ν a viscosidade cinemática do ar (m²/s);

α a difusividade térmica do ar (m²/s).

Substituindo os valores para o ar, o diâmetro interno para o do tubo de cobre e a temperatura externa do tubo para a temperatura média entre a mínima de operação (ambiente, $\approx 24^\circ \text{C}$) e a máxima (ebulição da água, $\approx 100^\circ \text{C}$) resulta que Ra_c^* será menor que 100 quando o diâmetro externo do espaço anular for menor que 29 mm. Assim, os tubos de vidro da figura 23 possuem diâmetro externo de 30 mm e interno de 28 mm.



Figura 28 - Tubos de vidro de diâmetro interno 28 mm

Conforme discutido anteriormente, outro ponto importante para evitar perdas no coletor é reduzir a condutividade através dos tubos de cobre, para isso foram utilizadas buchas de PTFE (figura 29) nas extremidades do coletor. O PTFE possui baixa condutividade - $0,35 \text{ W/m.K}$ – (Incropera) e também foi utilizado para o ajuste do tubo de cobre com o tubo de vidro (figura 30).



Figura 29 - Bucha de PTFE

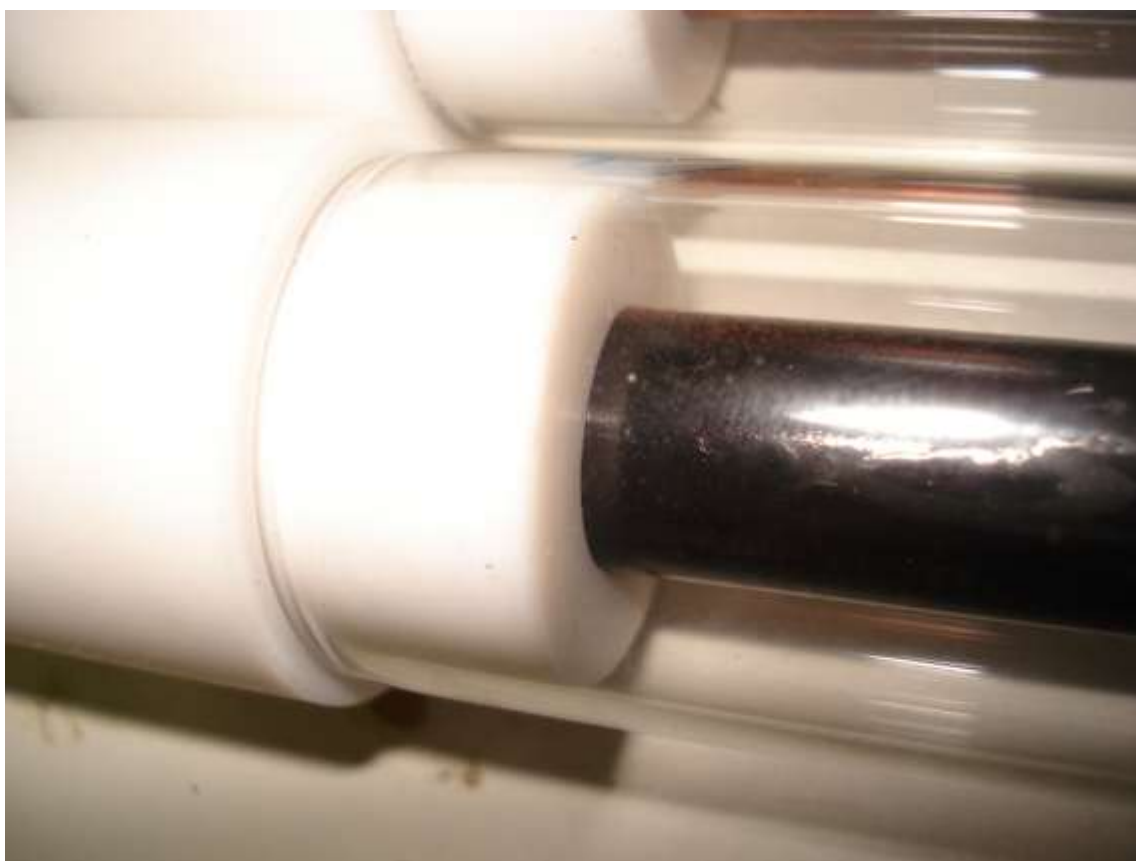


Figura 30 - Ajuste do tubo de cobre e tubo de vidro

Para garantir a vedação do conjunto foram utilizados anéis de vedação (o'rings) entre a bucha e o tubo de cobre.

Uma consideração importante sobre a vedação do conjunto é o efeito da dilatação térmica do cobre, assim, para o cálculo da variação do raio do tubo de cobre devido à dilatação térmica foi verificado que o coeficiente de dilatação térmica linear do cobre é de $1,7.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Nussenzveig) e que, portanto, a variação do perímetro do tubo seria dada por:

$$\Delta P = \alpha \cdot P_0 \cdot \Delta T$$

$$\therefore 2 \cdot \pi \cdot r_f - 2 \cdot \pi \cdot r_0 = \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \Delta T$$

Substituindo os valores do coeficiente de dilatação térmica e a variação da temperatura (de 24° ao máximo de 100°):

$$\therefore r_f - r_0 = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 15,76 = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Ou seja, o tubo se dilatará menos de 2 centésimos de milímetro, assim, essa variação foi desprezada.

A figura 31 mostra o conjunto dos três absorvedores.



Figura 31 - Absorvedores

5.4 Montagem:

Com o concentrador e o coletor construídos foi necessário fixá-los na estrutura e garantir o posicionamento do absorvedor no foco, isso foi realizado através da estrutura de compensado da figura 32.

O conjunto foi então fixado no compensado da base da estrutura, conforme figura 33.

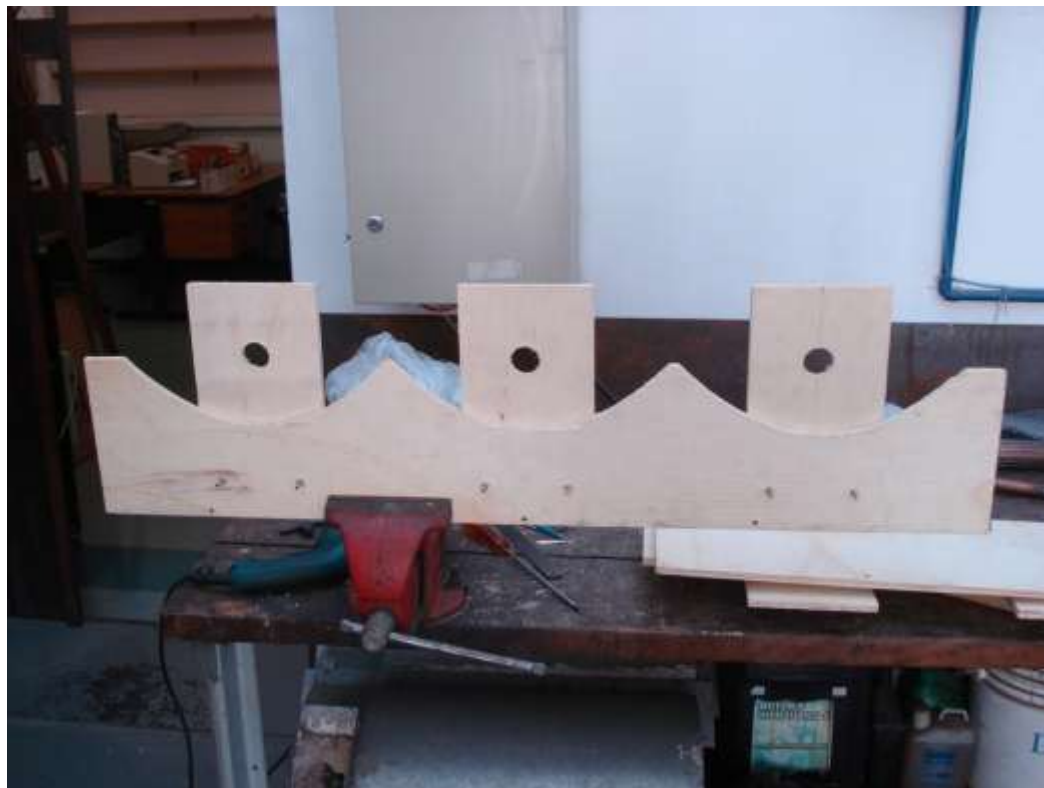


Figura 32 - Estrutura para o posicionamento do absorvedor no foco do concentrador

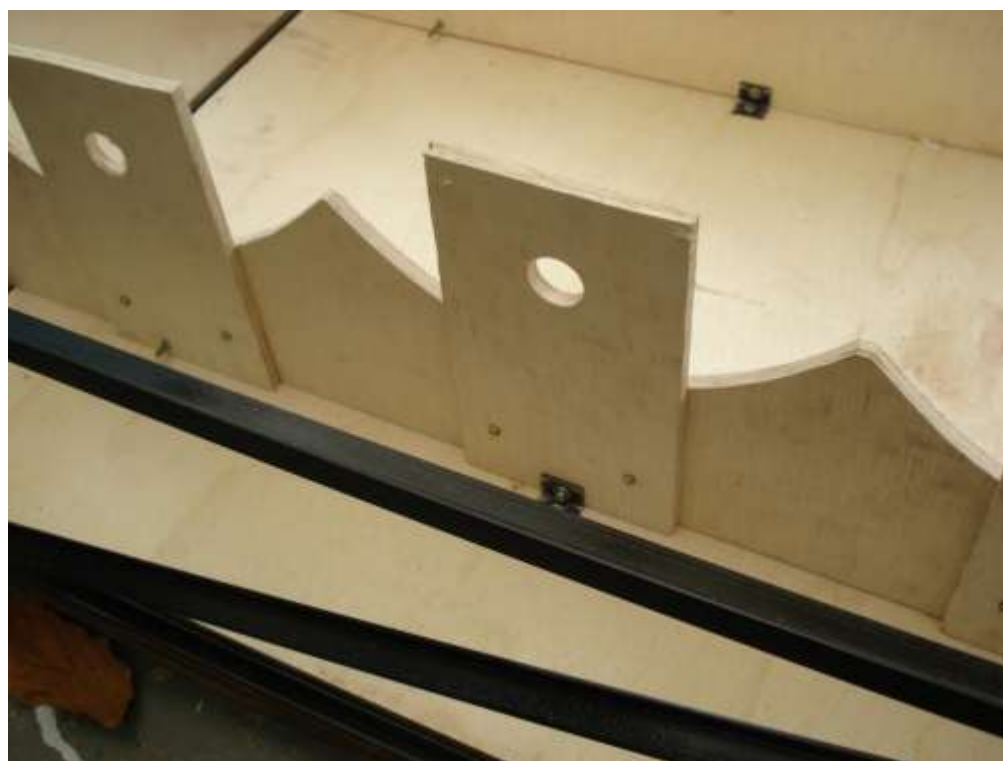


Figura 33 – Montagem da estrutura

5.4.1 Isolamento térmico:

Tendo em vista a função do coletor solar foi necessário garantir o isolamento térmico do conjunto. O isolamento do interior da estrutura com o ambiente tem duas funções distintas, uma é auxiliar no isolamento do absorvedor, contribuindo para uma maior temperatura de parede externa do tubo de vidro (o que reduz a perda por condução através do ar no interior do tubo). A outra função do isolamento é funcionar como uma estufa, reduzindo a emissão da radiação solar direta na forma de radiação difusa.

Para o isolamento da estrutura foi utilizada lã de rocha sobre chapas de alumínio, como visto na figura 34.



Figura 34 - Isolamento térmico com lã de rocha

Sobre o coletor foi encaixada uma chapa de vidro, cujas propriedades de alta transmissividade para radiação visível e baixa para os demais comprimentos de onda (radiação difusa infravermelha). Como para o coletor concentrador só a radiação direta importa, visto que esta pode ser direcionada para o absorvedor, o efeito do vidro de reter a radiação difusa no interior da estrutura contribui para a redução das perdas por emissão.

Na tubulação de cobre do coletor foi utilizada espuma elastomérica para o isolamento da seção dos tubos que interliga os absorvedores.



Figura 35 - Soldagem dos tubos de cobre

A estrutura montada com os isolamentos térmicos e a cobertura de vidro é apresentada na figura 36.

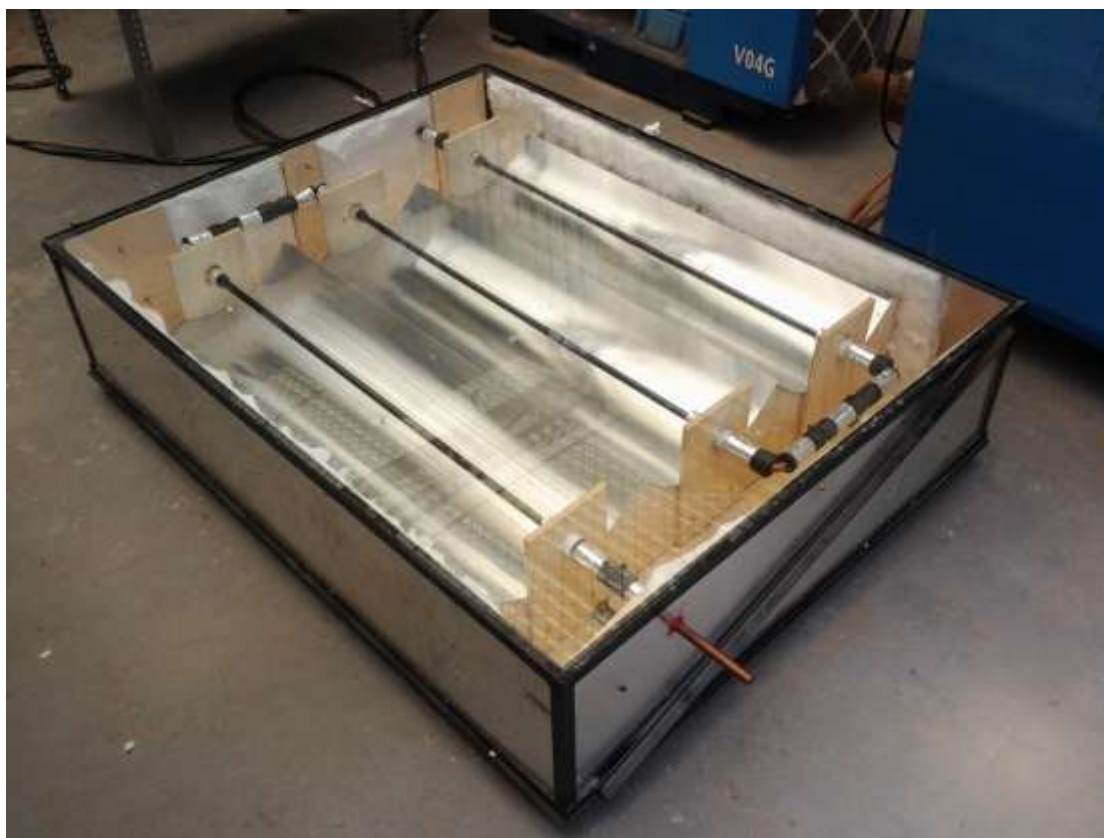


Figura 36 - Coletor terminado

5.5 Custos:

A tabela 5 apresenta os custos dos materiais para a fabricação do protótipo:

Tabela 5- Custos do protótipo

Material	Empresa	Custo
Cantoneiras de aço	Glauco	R\$ 91,80
Chapa de vidro	Divinal Vidros	R\$ 121,77
Chapas de alumínio	GGD Metals	R\$ 236,15
Compensado	Madeiras Pinheiro	R\$ 65,00
Lã de rocha	Antonio Ferreira	R\$ 48,00
Tarugo de PTFE	Univerflex	R\$ 205,00
Tubos de vidro	Laborglass	R\$ 86,06
Tubos e conexões de cobre	Hidráulica Tropeiros	R\$ 70,00
Total	-	R\$ 923,78

Todas as despesas com os materiais utilizados na fabricação do protótipo foram pagos pela Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia – INOVATA FDTE.

6. DESEMPENHO TÉRMICO

A norma ABNT NBR 15747 (1 e 2) estabelece os requisitos e os métodos de ensaio de coletores solares para o aquecimento de líquidos. Procurando seguir o estabelecido em norma, foi realizado o ensaio de desempenho térmico no coletor construído.

6.1 Instrumentação:

Para as medidas de temperatura foi utilizado o termopar da figura 37.



Figura 37 - Termopar utilizado

Os sensores foram posicionados sobre o tubo de entrada do coletor e cobertos com pasta térmica e espuma elastomérica (figura 38).



Figura 38 - A esquerda sensor do termopar revestido com pasta térmica, a direita o conjunto coberto por espuma elastomérica

Outro sensor foi utilizado para medir a temperatura ambiente.

A vazão foi medida através de um cronômetro e de um Becker graduado.

6.2 Condições de ensaio:

O ensaio foi realizado entre 12:12 e 13:54 do dia 10 de novembro de 2011.. A temperatura ambiente medida com o termopar da figura 37 era de 32,7 °C, a radiação solar com céu claro foi estimada em 450 W/m² (Momi) e o coletor foi ajustado para um ângulo de inclinação menor que 2% da incidência normal (a figura 39 mostra o foco do coletor antes deste ajuste).



Figura 39 – Concentração fora do foco, antes do ajuste da inclinação do coletor

De acordo com a NBR 15747 a vazão deve ser fixada em 0,02 kg/s/m² de área do coletor, para a área de abertura de 1 m² do coletor a vazão foi fixada em 0,02 l/s, ou 20 ml/s. Porém, para tornar a medição da temperatura mais precisa, aumentando sua variação entre a entrada e saída, a vazão utilizada foi de 10 ml/s.

6.3 Resultados:

Foram realizadas quatro medições das temperaturas de entrada e saída e da vazão, os resultados são mostrados na tabela 6:

Tabela 6 - Resultados medidos

	Cp (kJ/kg.K)	Temp. ambiente (°C)	Radiação (W)		
	4,18	32,7	450		
Hora	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Vazão (ml/s)	Energia absorvida (W)	Eficiência
12:12	28,9	32,2	11	151,7	34%
12:25	29,3	33,7	11	202,3	45%
13:08	30,1	35,2	10	213,2	47%
13:25	31,8	38,3	10	271,7	60%
Média	30,0	34,9	11	211,8	47%

Também foi testada a temperatura de estagnação (máxima possível) para o coletor, sem nenhuma vazão significativa a temperatura na saída do coletor chegou a **96,8°C**. O coletor não apresentou nenhuma avaria após atingir essa temperatura.



Figura 40 - Coletor solar em funcionamento

7 CONCLUSÕES

Foi construído um coletor solar concentrador e foi realizado o ensaio para verificação da eficiência desse equipamento. Os resultados obtidos indicam uma eficiência média de 47%, porém essa eficiência é válida para a faixa de temperatura de 30 – 40 °C em que o ensaio foi realizado.

Associado a esses resultados pode-se destacar as características únicas do coletor construído, como:

- Utilização de três parábolas para a concentração, o que possibilitou que o coletor fosse construído dentro de uma estrutura compacta.
- Utilização de ar como isolamento térmico.

A temperatura máxima atingida pelo coletor de 96,8°C indica porque os coletores concentradores são utilizados para aquecimento a elevadas temperaturas, na medida que apresentam um bom desempenho em temperaturas elevadas, diferente dos coletores planos, cuja eficiência é mais sensível ao aumento de temperatura.

A tecnologia de coletores concentradores é reconhecida como mais eficiente que os coletores planos (devido ao efeito de redução na área de perda de calor). Porém existem alguns desafios para a aplicação dessa tecnologia, principalmente envolvendo o posicionamento do concentrador com relação ao sol, para garantir o efeito de concentração. Isso foi observado durante o ensaio do coletor construído, onde o ajuste do coletor foi essencial para o seu funcionamento, sendo que sem esse posicionamento praticamente não existia absorção de radiação pelo coletor.

O ajuste norte-sul do coletor possibilita a utilização do coletor sem a necessidade de um ajuste constante, porém o alinhamento da superfície de tempos em tempos ainda é necessário. Contudo, um sistema de posicionamento totalmente automático certamente seria mais vantajoso.

8 BIBLIOGRAFIA

BARROS, E. V. 2007. A Matriz Energética Mundial e a Competitividade das Nações: Bases de uma Nova Geopolítica, **Engevista**, v.9, n.1, p. 47-56, 2007. Disponível em: <<http://www.uff.br>>. Acessado em: 5 de Nov. 2009.

CAMARGO, I.; BOULOS, P.; **Geometria Analítica: um tratamento vetorial**. 3ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 543 p.

DUFFIE, JOHN A.; BECKMAN, WILLIAN A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, INC. 1991. 919 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003. 698 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE OPINIÃO PÚBLICA E ESTATÍSTICA . Disponível em: <<http://www.ibope.com.br>>. Acessado em: 16 de Nov. 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics. Disponível em: <<http://www.iea.org/index.asp>>. Acessado em: 15 de Out. 2009.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo Produtos com Planejamento, Criatividade e Qualidade**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2000, 132p.

MARTINS, F. R. et al. 2005. **Mapas de Irradiação Solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <<http://www.lepten.ufsc.br>>. Acessado em: 18 de Nov. 2009.

MOMOI, Alexandre. **Projeto e Testes de Coletor Solar de Alta Eficiência**. 2005. 93p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PARTIDO VERDE. Programa do Partido Verde. Disponível em: <<http://www.pv.org.br>>. Acessado em: 20 de Out. 2009.

TOMALSQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. 2007. Matriz Energética Brasileira: Uma Prospectiva, **Novos Estudos**, CEBRAP, 79, p. 47-69, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 25 de Nov. 2009.

WWF Brasil. Disponível em: <<http://www.wwf.org.br>>. Acessado em: 16 de Nov. 2009.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica, 2**. São Paulo, Edgard Blücher, 2004, 314p