

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

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AQUECEDOR SOLAR COM  
CONCENTRADOR**

**Denny Anderson Ho  
Eric Ayao Ito**

**São Paulo  
2007**

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

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE AQUECEDOR SOLAR COM  
CONCENTRADOR**

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

**Denny Anderson Ho  
Eric Ayao Ito**

**Orientador: Prof. Eitaro Yamane**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica**

**São Paulo  
2007**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ho, Denny Anderson ; Ito, Eric Ayao  
Projeto e construção de aquecedor solar com concentrador/ D.  
Ho, E. A. Ito. – São Paulo, 2007 102 p.

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

1.Aquecedor solar, concentrador, energia solar, transferência de calor,  
Termodinâmica, Fontes alternativas de energia I. Ito, Eric Ayao II.  
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia Mecânica III.

## RESUMO

O Sol é fonte de energia renovável e o aproveitamento desta energia tanto como fonte de calor quanto de luz é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. A energia solar é abundante, permanente e renovável a cada dia, não polui e nem prejudica o ecossistema. Com base nesse contexto, o presente trabalho consiste no projeto e construção de um protótipo de concentrador solar integrado a um sistema de rastreamento solar.

O texto constituiu-se basicamente em duas etapas. A primeira relaciona-se à definição do modelo teórico, através da análise dos tipos de concentradores solares, fundamentação teórica e simulação. O concentrador solar escolhido para o projeto foi a calha parabólica, pois, comparado aos outros tipos de concentradores, apresentou-se como a configuração mais econômica e fácil de se construir. Com relação ao sistema de rastreamento solar, utilizou-se um “timer” com disco central girante acoplado ao tubo de cobre do concentrador.

Na segunda etapa do projeto, as forças concentraram-se na construção do protótipo. Usaram-se materiais de baixo custo e diferentes de peças comumente utilizadas. Alguns exemplos são: papel alumínio colado em papel cartão, para a superfície refletora; caixa de isopor para o reservatório; transparência para o tubo externo. A maior dificuldade deu-se na montagem da superfície refletora, já que papel alumínio é um material muito sensível e a presença de bolhas e dobras na superfície é inevitável. O custo total de material utilizado na montagem do protótipo foi de R\$ 170,00. Foram efetuados dois experimentos para o concentrador, sendo o primeiro em um dia com nuvens, e o segundo com presença apenas do Sol. O rendimento do primeiro experimento foi de aproximadamente de 14% e o segundo foi de aproximadamente de 19%.

## ABSTRACT

The Sun is renewable energy source and the exploitation of this energy so much as heat source how much of light is one of the more promising energy alternatives to face the challenges of the new millennium. The solar energy is abundant, permanent and renewable to each day, didn't pollute and neither it injures the ecosystem. On the basis of this context, the present work consists of the design and construction of a prototype of solar heater with concentrator integrated to a system of solar tracking.

The text constituted itself basically in two phases. The first relates to the definition of the theoretical model, through the analysis of the types of solar concentrators, theoretical ground and simulation. The solar concentrator chosen for the project was the parabolic trough, therefore, compared to other types of concentrators, presented itself as the easy and most economic setup to build. For the system of solar tracking, utilized itself a "timer" with rotor button coupled to the pipe of copper of the concentrator.

To second phase of the design, the forces concentrated in the construction of the prototype. They used itself cost bass stuff, unlike the parts commonly utilized. Some examples are: paper aluminum bonds in paper card, for the surface reflector; box of polystyrene for the reservoir; transparency for the external pipe. To bigger difficulty gave in the assembly of the surface reflector, since paper aluminum is a very sensible stuff and the presence of blisters and you fold in the surface is inevitable. The total cost of material used in the assembly of the prototype was of R\$ 170.00. Two experiments were made to the concentrator, being the first one in a day with clouds, and the second with presence only of the Sun. The yield of the first experiment was approximately 14% and the second was approximately 19%.

## SUMÁRIO

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE FIGURAS

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. CRONOGRAMA FÍSICO</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Primeiro Semestre</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. Segundo Semestre</b> .....	<b>2</b>
<b>3. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1. Pesquisa Bibliográfica</b> .....	<b>3</b>
<b>3.2. Estudo dos tipos de concentradores</b> .....	<b>3</b>
<b>3.3. Definição do concentrador</b> .....	<b>3</b>
<b>3.4. Estudo de dispositivo para rastreamento do Sol</b> .....	<b>3</b>
<b>3.5. Descrição do modelo teórico</b> .....	<b>4</b>
<b>3.6. Simulação e avaliação do modelo</b> .....	<b>4</b>
<b>3.7. Dimensionamento final</b> .....	<b>4</b>
<b>3.8. Seleção de peças comerciais</b> .....	<b>5</b>
<b>3.9. Desenhos Técnicos</b> .....	<b>5</b>
<b>3.10. Construção do Protótipo</b> .....	<b>5</b>
<b>3.11. Experiência real e avaliação final</b> .....	<b>5</b>
<b>4. FONTES DE ENERGIA</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1. Energia Solar</b> .....	<b>6</b>
<b>4.2. Energia Eólica</b> .....	<b>7</b>
<b>4.3. Energia Hidráulica</b> .....	<b>7</b>
<b>4.4. Biomassa</b> .....	<b>8</b>
<b>4.5. Petróleo</b> .....	<b>8</b>
<b>4.6. Carvão</b> .....	<b>9</b>
<b>4.7. Gás Natural</b> .....	<b>9</b>
<b>4.8. Energia Nuclear</b> .....	<b>10</b>

<b>5. RESUMO TEÓRICO DA RADIAÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>5.1. Conceitos Fundamentais.....</b>	<b>11</b>
<b>5.2. Radiação do corpo negro .....</b>	<b>12</b>
<b>5.3. Emissão de superfícies .....</b>	<b>13</b>
<b>5.4. Absortividade .....</b>	<b>15</b>
<b>5.5. Refletividade .....</b>	<b>17</b>
<b>5.6. Transmissividade .....</b>	<b>18</b>
<b>5.7. Radiação Solar.....</b>	<b>19</b>
<b>6. CONCENTRADORES SOLARES DE REFLEXÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1. “Heliostats” - Torres de Energia .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2. Coletor de Calha Parabólica .....</b>	<b>25</b>
<b>6.3. Coletor Parabólico de Foco Pontual.....</b>	<b>26</b>
<b>7. DEFINIÇÃO DO COLETOR SOLAR.....</b>	<b>27</b>
<b>8. SISTEMA DE RASTREIO SOLAR .....</b>	<b>28</b>
<b>8.1. Definição do sistema de “tracking” .....</b>	<b>29</b>
<b>9. REQUISITOS DO MODELO.....</b>	<b>32</b>
<b>9.1. Definição da geometria do coletor .....</b>	<b>32</b>
<b>9.2. Tubo Receptor Externo .....</b>	<b>32</b>
<b>9.3. Tubo Receptor Interno .....</b>	<b>33</b>
<b>9.4. Superfície Refletora .....</b>	<b>34</b>
<b>9.5. Outros Componentes .....</b>	<b>34</b>
<b>10. DEFINIÇÃO DO MODELO TEÓRICO.....</b>	<b>35</b>
<b>10.1. Definição da Geometria do Concentrador.....</b>	<b>35</b>
<b>10.2. Tubo Receptor Interno .....</b>	<b>36</b>
<b>10.3. Superfície Externa do Tubo Receptor Interno.....</b>	<b>38</b>
<b>10.4. Tubo Receptor Externo .....</b>	<b>40</b>
<b>10.5. Superfície Refletora .....</b>	<b>41</b>
<b>10.6. Rendimento.....</b>	<b>43</b>
<b>11. SIMULAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>12. DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>49</b>

<b>13. LISTA DE MATERIAIS .....</b>	<b>54</b>
<b>14. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>56</b>
14.1. Suportes.....	57
14.2. Estrutura do perfil parabólico .....	58
14.3. Montagem da superfície refletora.....	61
14.4. Tubos .....	64
14.4.1. Tubo Receptor Interno .....	64
14.4.2. Tubo Receptor Externo .....	65
14.5. Acessórios.....	66
14.5.1. Conectores e mangueiras.....	66
14.5.2. Bomba .....	69
14.5.3. Reservatório.....	70
14.5.4. Termômetros .....	70
<b>15. APLICAÇÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>16. EXPERIMENTO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>76</b>
16.1. Primeiro experimento .....	76
16.2. Segundo experimento.....	83
<b>17. CONCLUSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>18. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1. 1 – Sol - base para a vida. ....	1
Fig. 5. 1 – Espectro da radiação eletromagnética.....	11
Fig. 5. 2 – Distribuição espectral. ....	14
Fig. 5. 3 – Valores de absorvidade total para diferentes superfícies.....	16
Fig. 5. 4 – Dependência espectral das reflectâncias e absortâncias de materiais selecionados. ....	17
Fig. 5. 5 – Reflexões difusas e especular. ....	18
Fig. 5. 6 – Dependência espectral das transmitâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados.....	19
Fig. 5. 7 – Distribuição espectral da radiação solar. ....	21
Fig. 5. 8 – Mapa da média de radiação solar diária na América do Sul.....	22
Fig. 6. 1 – “Heliostats” do sistema de torre de energia. ....	24
Fig. 6. 2 – Instalações de torre de energia no sul da Espanha.....	24
Fig. 6. 3 – Coletores de calha parabólica. ....	25
Fig. 6. 4 – Prato parabólico de foco pontual. ....	26
Fig. 7. 1 – Coletores de calha parabólica. ....	27
Fig. 8. 1 – Desenho do “Timer” com disco girante no sentido horário.....	29
Fig. 8. 2 – Ilustração do “timer” utilizado.....	30
Fig. 8. 3 – Tubo de cobre acoplado ao timer.....	30
Fig. 8. 4 – Ilustração do timer com o tubo de plástico.....	31
Fig. 10. 1 – Parábolas e seus respectivos focos. ....	35
Fig. 10. 2 – Parábola escolhida de foco 0,175m. ....	36
Fig. 10. 3 – Volume de controle para escoamento interno em um tubo. ....	37
Fig. 10. 4 – Parede do tubo receptor. ....	39
Fig. 10. 5 – Tubo receptor externo.....	40
Fig. 10. 6 – Superfície refletora. ....	42
Fig. 12. 1 – Estrutura da calha parabólica.....	49
Fig. 12. 2 – Suporte e tubo de cobre acoplado à calha parabólica.....	50
Fig. 12. 3 – Concentrador de calha parabólica.....	51
Fig. 12. 4 – Dimensões da calha parabólica – vista superior.....	52
Fig. 12. 5 – Dimensões da calha parabólica – vista frontal. ....	52
Fig. 12. 6 – Dimensões do suporte com timer. ....	53
Fig. 12. 7 – Dimensões do suporte.....	53
Fig.14. 1 – Ferramentas utilizadas para construção do protótipo. ....	56
Fig.14. 2 – Suportes. ....	57
Fig.14. 3 – Detalhe da caixa do “timer”.....	58
Fig.14. 4 – Esquema para tracejar a linha da parábola sobre o MDF.....	59
Fig.14. 5 – MDF cortado em formato parabólico. ....	59
Fig.14. 6 – Detalhe de corte do MDF em formato parabólico.....	60
Fig.14. 7 – Acabamento das partes construídas em MDF utilizando uma lixa.....	60
Fig.14. 8 – Estrutura da calha parabólica sobre os suportes e com o tubo ajustado. ....	61
Fig.14. 9 – Testes de colagem da superfície refletora.....	62

Fig.14. 10 – Superfícies refletoras. ....	63
Fig.14. 11 – Superfícies refletoras sobre a estrutura. ....	63
Fig.14. 12 – Tubo de cobre de 22 mm de diâmetro. ....	64
Fig.14. 13 – Pintura do tubo interno receptor ....	65
Fig.14. 14 – Anéis plásticos para apoio das transparências. ....	65
Fig.14. 15 – Tubo externo. ....	66
Fig.14. 16 – TE de redução com vedação de durepoxi. ....	67
Fig.14. 17 – Bucha de redução e luva passante com vedação de durepoxi. ....	68
Fig.14. 18 – Mangueira com isolante térmico. ....	68
Fig.14. 19 – Bomba de aquário. ....	69
Fig.14. 20 – Reservatório de isopor. ....	70
Fig.14. 21 – Termômetro de mercúrio para medição da água de entrada. ....	71
Fig.14. 22 – Termômetro digital para medição da saída de água. ....	72
Fig.14. 23 – Termopar para medição da temperatura do reservatório. ....	72
Fig.14. 24 – Protótipo montado. ....	73
Fig.14. 25 – Vista lateral do protótipo completo. ....	73
Fig. 16. 3 – Gráfico das temperaturas da água no reservatório, na entrada e na saída do tubo ao longo do tempo. ....	80
Fig. 16. 4 – Gráfico da irradiação Solar do dia 18/11/07. ....	81
Fig. 16. 5 – Gráfico da irradiação Solar do dia 28/11/07. ....	84
Fig. 16. 6 – Gráfico da irradiação Solar do dia 28/11/07 durante o experimento. ....	85
Fig. 16. 7 – Gráfico da temperatura da água no reservatório ao longo do experimento medida pelos dois termômetros. ....	86

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Cronograma do 1º semestre de 2007 .....	2
Tabela 2.1 – Cronograma do 2º semestre de 2007 .....	2
Tabela 11. 1 – Parâmetros para simulação.....	44
Tabela 11. 2 – Temperatura final da água após primeira passagem pelo tubo .....	45
Tabela 11. 3 – Variação da temperatura da água após primeira passagem pelo tubo.....	45
Tabela 11. 4 – Variação da temperatura da água após terceira passagem pelo tubo .....	46
Tabela 11. 5 – Variação da temperatura da água após terceira passagem pelo tubo .....	47
Tabela 11. 4 – Temperatura final da água no reservatório.....	47
Tabela 15. 1 – Potenciais utilizadores de aquecedores solares .....	74
Tabela 16. 1 – Temperaturas da água medidas no experimento .....	79
Tabela 16. 2 – Irradiação Solar do dia 18/11/07. ....	80
Tabela 16. 3 – Valores dos parâmetros utilizados.....	81
Tabela 16. 4 – Cálculo dos rendimentos. ....	83
Tabela 16. 5 – Valores da Irradiação Solar no período do experimento.....	84
Tabela 16. 6 – Valores da temperatura da água no reservatório .....	86

## 1. INTRODUÇÃO

O recurso às energias renováveis constitui-se em uma solução para muitos problemas sociais associados ao consumo de combustíveis fósseis. O seu uso permite uma melhoria do nível de vida, diminuindo a sua dependência econômica e reduzindo os impactos negativos resultantes da queima dos combustíveis na sua utilização e transformação de energia.

Todos os aspectos do nosso cotidiano envolvem o uso de energia: o transporte, a produção de alimentos e o abastecimento de água (bombeamento), assim como o aquecimento das nossas casas e escritórios. Para esses fins, existem diversas formas de se obter essa energia, sendo que os combustíveis fósseis são os mais utilizados, porém uma diversificação e o uso de uma energia mais limpa é essencial para uma melhor qualidade de vida no futuro.

A energia solar é a principal fonte de vida na Terra e é a origem da maioria das fontes de energia renováveis: energia eólica, hidrelétrica, da biomassa e das ondas e correntes marinhas. Pode-se obter calor mediante coletores térmicos e eletricidade por meio de células fotovoltaicas, apesar dos processos terem diferentes tecnologias e aplicações. Além disso, A energia solar é indispensável para a existência de vida na Terra, sendo o ponto de partida para a realização de processos químicos e biológicos.

Nesse contexto, o trabalho em questão visa o projeto e construção de um concentrador solar. O objetivo principal é a montagem e testes de um protótipo real de coletor. Com isso, será possível determinar o rendimento do concentrador utilizando materiais incomuns.



**Fig.1. 1** – Sol - base para a vida.

## 2. CRONOGRAMA FÍSICO

Segue abaixo cronograma físico contendo as atividades para ambos os integrantes.

### 2.1. Primeiro Semestre

**Tabela 1.1** – Cronograma do 1º semestre de 2007

No.	Atividade	Março				Abril				Maio				Junho			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Pesquisa Bibliográfica		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	Estudo dos tipos de concentradores			D	D	D	D										
3	Definição do concentrador						E	E									
4	Estudo de dispositivo para rastreamento do Sol				E	E	E	E									
5	Descrição do modelo teórico							D	D	D	D	D					
6	Simulação e avaliação do modelo									E	E	E	E	E	A	A	A

### 2.2. Segundo Semestre

**Tabela 2.1** – Cronograma do 2º semestre de 2007

No.	Atividade	Julho				Agosto				Setembro				Outubro				Novembro			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
7	Pesquisa Bibliográfica	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
8	Dimensionamento final		E	E	E	E	E														
9	Seleção de peças comerciais		D	D	D	D	D														
10	Desenhos Técnicos							D	D	D	D	D									
11	Construção do protótipo								E	E	E	A	A	A	A	A					
12	Simulação real e avaliação final																A	A	A	A	A

D – Denny Anderson Ho

E – Eric Ayao Ito

A – Ambos

### **3. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES**

#### **3.1. Pesquisa Bibliográfica**

Durante todo o período de trabalho, será feito um levantamento bibliográfico adequado ao tema em questão. Isso porque, na medida em que as dúvidas surgirem, seja de um assunto conhecido ou novo, uma nova consulta ou aprofundamento deverá ser feito.

#### **3.2. Estudo dos tipos de concentradores**

Nesse tópico, a preocupação será decorrente das formas de concentradores existentes atualmente. Foi feito um estudo quanto à descrição e a aplicação para cada sistema. Após levantamento bibliográfico, tem-se que nos dias de hoje, as plantas utilizam três tipos de concentradores por reflexão: “heliostats”(sistema de torres de energia), coletores parabólicos de foco linear (sistema de calha parabólica) e coletores parabólicos de foco pontual (sistema de prato parabólico).

#### **3.3. Definição do concentrador**

A partir da pesquisa realizada dos tipos de concentradores, foi feito um estudo da alternativa mais adequada ao nosso propósito. Para isso, fez-se um comparativo com relação ao custo dos materiais usados na construção, priorizando baixo custo, e a facilidade de montagem. Após comparação, determinou-se que a melhor forma será o coletor parabólico de foco linear.

#### **3.4. Estudo de dispositivo para rastreamento do Sol**

O sistema de rastreamento solar consiste em um mecanismo capaz de aproveitar melhor a radiação solar incidente, resultando em uma melhor eficiência do concentrador. A partir dessa idéia, foi feito um estudo simplificado desse mecanismo a ser integrado ao

concentrador. Chegou-se a conclusão que o dispositivo a ser utilizado no concentrador de foco linear será o acoplamento direto de um “timer” com disco girante com o tubo central da calha parabólica. Vale ressaltar que não há preocupação alguma em um sistema de controle.

### **3.5. Descrição do modelo teórico**

Será projetado um modelo ideal considerando as seguintes hipóteses:

- Perdas de calor do reservatório e da mangueira desprezíveis;
- Total concentração dos raios refletidos sobre o foco linear;
- Perfeito funcionamento do sistema de rastreamento solar.

A partir dessas considerações, será realizado um estudo teórico do modelo para então, serem calculados os parâmetros necessários para se determinar o rendimento e temperatura de operação, levando em consideração as propriedades de cada componente do sistema.

### **3.6. Simulação e avaliação do modelo**

A partir do modelo teórico foi realizada uma simulação da temperatura final da água do tubo receptor para diferentes condições climáticas e vazões.

### **3.7. Dimensionamento final**

Após definição das dimensões da parábola, do diâmetro do tubo e a área a ser projetada efetuou-se a complementação dos cálculos relacionados às características do coletor, sem nenhum tipo de critério. Deve-se ter cuidado com relação a esse tópico para minimizar eventuais erros na hora da montagem.

### **3.8. Seleção de peças comerciais**

Os itens escolhidos para a fabricação do concentrador solar foram baseados no baixo custo do projeto. Utilizaram-se materiais como papel alumínio, transparência, papel cartão, entre outros. Além disso, alguns itens usados eram pertences próprios como bomba, caixa de isopor, “timer”, etc.

### **3.9. Desenhos Técnicos**

A partir dos cálculos efetuados, serão feitos desenhos de fabricação e de conjunto utilizando-se o AutoCad. Essa parte é importante para uma prévia visualização do protótipo.

### **3.10. Construção do Protótipo**

Com os desenhos técnicos, iniciou-se a montagem do protótipo. O longo período estabelecido para a construção, de dois meses, deveu-se basicamente a eventuais dificuldades de montagem e possibilidade de reparar de erros antes do tempo.

### **3.11. Experiência real e avaliação final**

A partir do protótipo, efetuaram-se testes para determinar a temperatura do reservatório, da entrada e da saída da água. Com isso, foi possível calcular o rendimento do concentrador solar.

## 4. FONTES DE ENERGIA

### 4.1. Energia Solar

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico.

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Assim, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Neste último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares.

## **4.2. Energia Eólica**

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas.

## **4.3. Energia Hidráulica**

A energia hidráulica resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Ao contrário das demais fontes renováveis, a energia hidráulica representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e responde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo.

A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional, segundo o Balanço Energético Nacional (2003), é da ordem de 14%, participando com quase 83% de toda a energia elétrica gerada no País. Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil.

#### 4.4. Biomassa

Do ponto de vista energético, para fim de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica

e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos.

Embora grande parte do planeta esteja desprovida de florestas, a quantidade de biomassa existente na terra é da ordem de dois trilhões de toneladas; o que significa cerca de 400 toneladas *per capita*. Em termos energéticos, isso corresponde a mais ou menos 3.000 EJ por ano, ou seja, oito vezes o consumo mundial de energia primária (da ordem de 400 EJ por ano) (RAMAGE; SCURLOCK, 1996).

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a co-geração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética, conforme comentado no capítulo 2. No referido capítulo, pode-se observar a participação da biomassa em 30% dos empreendimentos de co-geração em operação no País.

#### 4.5. Petróleo

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos (moléculas de carbono e hidrogênio) que tem origem na decomposição de matéria orgânica, principalmente o plâncton (plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas), causada pela ação de bactérias em meios com baixo teor de oxigênio. Ao longo de milhões de anos, essa decomposição foi-se acumulando no fundo dos oceanos, mares e lagos e, pressionada pelos movimentos da crosta terrestre, transformou-se na substância oleosa denominada

petróleo. Essa substância é encontrada em bacias sedimentares específicas, formadas por camadas ou lençóis porosos de areia, arenitos ou calcários.

Além de predominante no setor de transportes, o petróleo ainda é o principal responsável pela geração de energia elétrica em diversos países do mundo. Apesar da expansão recente da hidroeletricidade e da diversificação das fontes de geração de energia elétrica verificadas nas últimas décadas, o petróleo ainda é responsável por aproximadamente 7,9% de toda a eletricidade gerada no mundo (PAFFENBARGER, 1997; AIE, 2003).

#### **4.6. Carvão**

O carvão é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos, como ocorre com todos os combustíveis fósseis. Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos. A turfa, de baixo conteúdo carbonífero, constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; o linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém cerca de 75% a 85% de carbono, e o mais puro dos carvões; o antracito que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

Da mesma forma, os depósitos variam de camadas relativamente simples e próximas da superfície do solo e, portanto, de fácil extração e baixo custo, a complexas e profundas camadas, de difícil extração e custos elevados. Em termos de participação na matriz energética mundial, segundo o Balanço Energético Nacional (2003), o carvão é atualmente responsável por cerca de 7,9% de todo o consumo mundial de energia e de 39,1% de toda a energia elétrica gerada.

#### **4.7. Gás Natural**

De modo similar aos demais combustíveis fósseis, o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. Em seu estado bruto, o gás natural é composto principalmente

por metano, com proporções variadas de etano, propano, butano, hidrocarbonetos mais pesados e também CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, água, ácido clorídrico, metanol e outras impurezas. Os maiores teores de carbono são encontrados no gás natural não-associado (20) (GASNET, 1999).

Além de insumo básico da indústria gasoquímica, o gás natural tem-se mostrado cada vez mais competitivo em relação a vários outros combustíveis, tanto no setor industrial como no de transporte e na geração de energia elétrica. Nesse último caso, a inclusão do gás natural na matriz energética nacional, conjugada com a necessidade de expansão do parque gerador de energia elétrica e com o esgotamento dos melhores potenciais hidráulicos do país, tem despertado o interesse de analistas e empreendedores em ampliar o seu uso na geração termelétrica.

#### **4.8. Energia Nuclear**

A energia nuclear é proveniente da fissão do urânio em reator nuclear. Apesar da complexidade de uma usina nuclear, seu princípio de funcionamento é similar ao de uma termelétrica convencional. Calor é gerado pela queima de um combustível produzindo vapor. Em seguida, é acionada uma turbina acoplada a um gerador de corrente elétrica.

Na usina nuclear, o calor é produzido pela fissão do urânio no reator, cujo sistema mais empregado (PWR – *Pressurized Water Reactor*) é constituído por três circuitos, a saber: primário, secundário e de refrigeração. No primeiro, a água é aquecida a uma temperatura de aproximadamente 320°C, sob uma pressão de 157 atmosferas. Em seguida, essa água passa por tubulações e vai até o gerador de vapor, onde vaporiza a água do circuito secundário, sem que haja contato físico entre os dois circuitos. O vapor gerado aciona uma turbina, que movimenta o gerador e produz corrente elétrica (ELETRONUCLEAR, 2001).

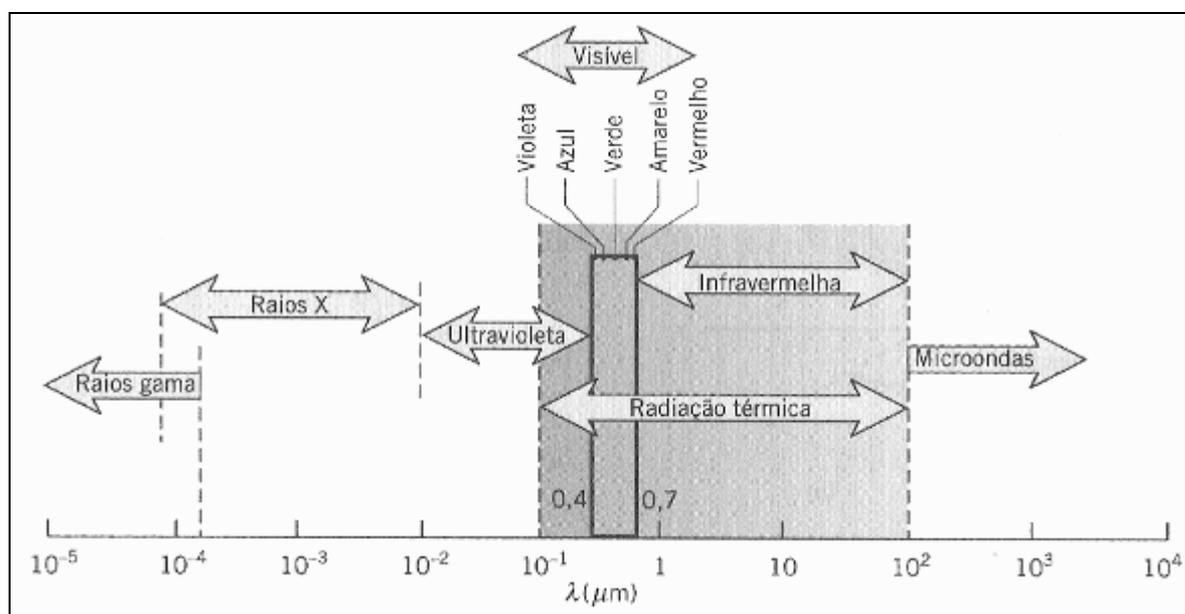
## 5. RESUMO TEÓRICO DA RADIAÇÃO

### 5.1. Conceitos Fundamentais

A radiação se origina devido à emissão pela matéria e seu transporte subsequente não requer a presença de nenhum meio. Ela pode ser descrita como a propagação de um conjunto de partículas denominadas fótons ou quanta. Alternativamente, a radiação pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas. Em qualquer caso, atribuem-se à radiação as propriedades padrões das ondas de frequência  $\nu$  e comprimento de onda  $\lambda$ . Para a propagação da radiação em um meio particular, as duas propriedades são relacionadas por

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (5.1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no meio. Para a propagação no vácuo,  $c_0 = 2,998 \times 10^8$  m/s. O espectro eletromagnético completo é delineado na **Fig. 5.1**.



**Fig. 5.1** – Espectro da radiação eletromagnética.

A radiação térmica emitida por uma superfície engloba uma faixa de comprimentos de onda. A intensidade de radiação varia com o comprimento de onda, e o termo espectral é utilizado para nos referirmos à natureza dessa dependência. A radiação emitida consiste em uma distribuição contínua e não-uniforme de componentes monocromáticos (comprimento de onda único). Tanto a intensidade da radiação em qualquer comprimento de onda quanto à distribuição espectral variam com a natureza e a temperatura da superfície emissora.

A natureza espectral da radiação térmica é uma das duas características que complicam a sua descrição. A segunda característica é relativa à sua direcionalidade. Uma superfície pode emitir radiação preferencialmente em certas direções, criando uma distribuição direcional da radiação emitida.

## 5.2. Radiação do corpo negro

A emissão de radiação do Sol é semelhante a de um corpo negro a 5.800K. O corpo negro é uma superfície ideal que tem as seguintes propriedades:

- Absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e direção.
- Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro.
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso.

A distribuição espectral da emissão de um corpo negro é bem conhecida, tendo sido determinada primeiramente por Planck e tem a forma

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (5.2)$$

onde  $h = 6,6256 \times 10^{-34}$  J.s e  $k = 1,3805 \times 10^{-23}$  J/K são as constantes universais de Planck e Boltzmann, respectivamente,  $c_0$  é a velocidade da luz no vácuo e  $T$  é a temperatura

absoluta do corpo negro (K). Uma vez que o corpo negro é um emissor difuso, segue que

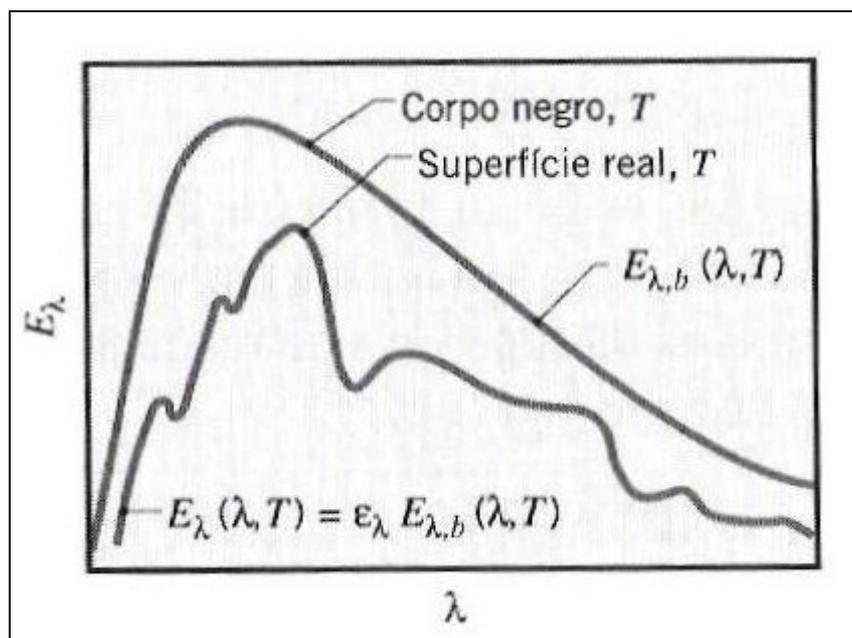
$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (5.3)$$

onde a primeira e a segunda constantes de radiação são  $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$  e  $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ .

Uma fração significativa da radiação emitida pelo Sol, que pode ser aproximada como um corpo negro a 5800 K, encontra-se na região visível do espectro.

### 5.3. Emissão de superfícies

Essa propriedade é relevante para todos os materiais. Emissividade pode ser definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. É importante saber que, em geral, a radiação espectral emitida por uma superfície real difere da distribuição de Planck. Além disso, a distribuição direcional pode ser diferente da difusa. Assim sendo, a emissividade pode assumir diferentes valores conforme estamos interessados na emissão a um dado comprimento de onda ou em uma dada direção, ou nas médias integradas sobre o comprimento de onda e direção.



**Fig. 5. 2** – Distribuição espectral.

Se as emissividades de uma superfície forem conhecidas, é simples calcular suas características.

A emissividade direcional de um emissor difuso é uma constante, independente da direção. Contudo, embora essa condição seja freqüentemente uma aproximação razoável, todas as superfícies exibem um comportamento difuso diferente do esperado.

Diversas generalizações podem ser feitas quanto a emissividade dos materiais:

- A emissividade de superfícies metálicas é geralmente pequena, alcançando valores tão baixos quanto 0,02 para ouro e prata altamente polidos.
- A presença de camada de oxido pode aumentar significativamente a emissividade de superfícies metálicas. Contraste com o valor de 0,10 para o aço inoxidável levemente oxidado para o valor de aproximadamente 0,50 para a forma fortemente oxidada.
- A emissividade dos não-condutores é comparativamente alta, excedendo geralmente 0,60.

- A emissividade dos condutores cresce com o aumento da temperatura; entretanto, dependendo do material específico, a emissividade dos não-condutores pode ou crescer ou decrescer com o aumento da temperatura.

#### 5.4. Absortividade

Será importante para o duto receptor interno. A absortividade é uma propriedade que determina a fração da irradiação absorvida por uma superfície. A determinação dessa propriedade é complicada pelo fato de que ela pode ser caracterizada pela dependência direcional e espectral. A absortividade direcional espectral é definida como

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)} \quad (5.4)$$

Nesta expressão, despreza-se qualquer dependência da absortividade na temperatura da superfície. Tal dependência é pequena para a maior parte das propriedades radiativas espectrais.

A absortividade hemisférica total,  $\alpha$ , representa a média integrada sobre a direção e o comprimento de onda. Ela é definida como a fração da irradiação total absorvida por uma superfície

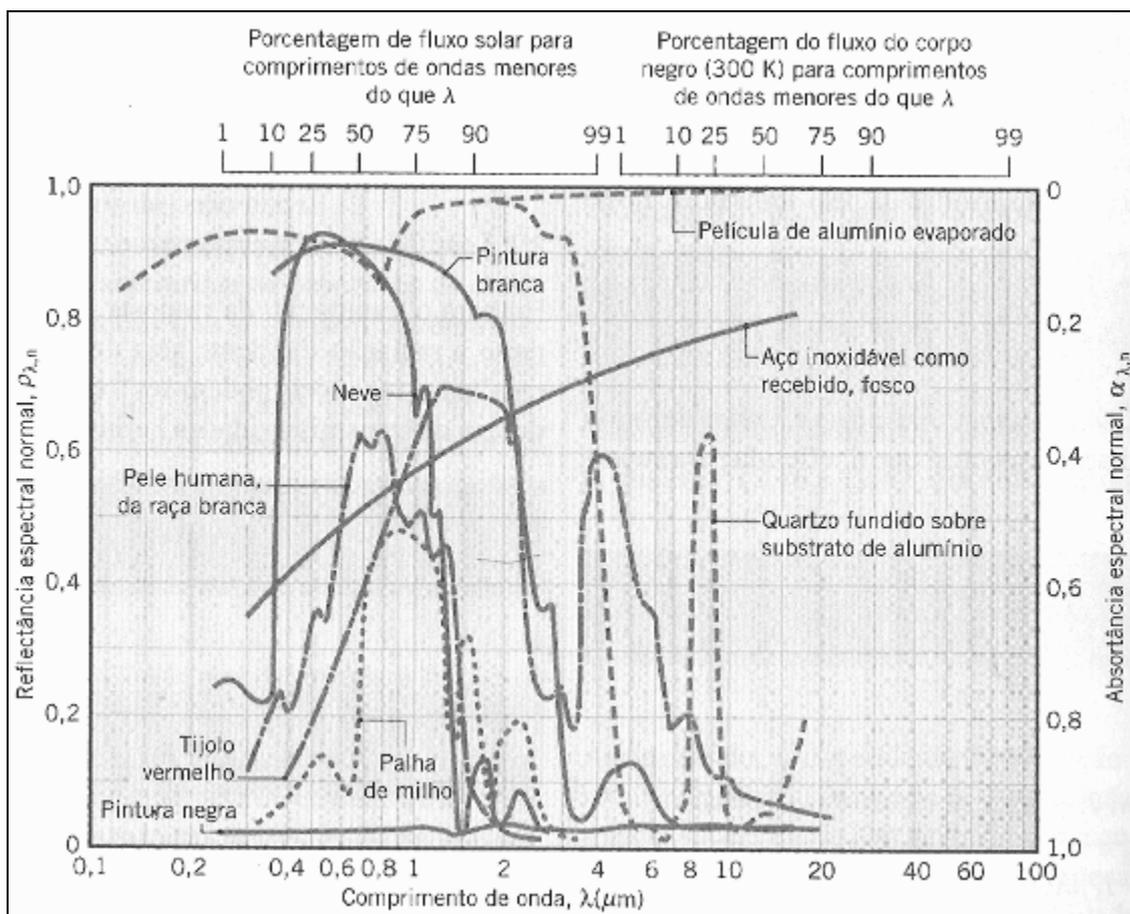
$$\alpha \equiv \frac{G_{abs}}{G} \quad (5.5)$$

Assim sendo,  $\alpha$  depende da distribuição espectral da radiação incidente, assim como de sua distribuição direcional e da natureza da superfície de absorção. Como  $\alpha$  depende da distribuição espectral da irradiação, seu valor para uma superfície exposta a radiação solar pode diferir apreciavelmente de seu valor para a mesma superfície exposta a radiação de comprimento mais alto de onda oriunda de uma fonte menor de temperatura. Uma vez que a distribuição espectral da radiação solar é aproximadamente proporcional à da emissão de um corpo negro a 5800 K, a absortividade total para a radiação solar  $\alpha_s$ , pode ser aproximada como

$$\alpha_s = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda(\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda} \quad (5.6)$$

SUPERFÍCIE	$\alpha_s$	$\epsilon$ (300 K)	$\alpha_s/\epsilon$
Filme de alumínio evaporado	0,09	0,03	3,0
Quartzo fundido sobre filme de alumínio	0,19	0,81	0,24
Pintura branca em substrato metálico	0,21	0,96	0,22
Pintura negra em substrato metálico	0,97	0,97	1,0
Aço inoxidável, conforme recebido, fosco	0,50	0,21	2,4
Tijolo vermelho	0,63	0,93	0,68
Pele humana (raça branca)	0,62	0,97	0,64
Neve	0,28	0,97	0,29
Palha de milho	0,76	0,97	0,78

**Fig. 5.3** – Valores de absorvidade total para diferentes superfícies.



**Fig. 5. 4** – Dependência espectral das reflectâncias e absorptâncias de materiais selecionados.

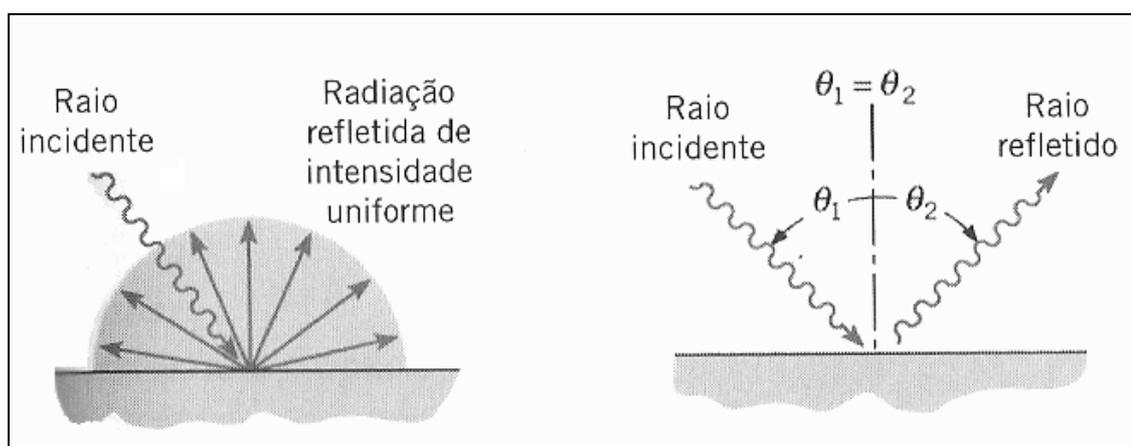
### 5.5. Refletividade

Será importante para a superfície refletora do concentrador. A refletividade é uma propriedade que determina a fração da radiação incidente refletida por uma superfície. Entretanto, sua definição específica pode assumir diversas formas diferentes devido à propriedade ser inerentemente bidirecional. Isto é, além de depender da direção da radiação incidente, ela também depende da direção da radiação refletida. Para evitar essa complicação trabalha-se exclusivamente com uma refletividade que represente uma média integrada sobre o hemisfério associada com a radiação refletida e, dessa forma, não forneça informações relativas à distribuição direcional dessa radiação.

A refletividade hemisférica total  $\rho$  é então definida como

$$\rho \equiv \frac{G_{ref}}{G} \quad (5.7)$$

As superfícies podem ser idealizadas como difusas ou especulares, de acordo com a maneira pela qual elas refletem a radiação, conforme **Fig. 5.5**. A reflexão difusa ocorre se, independente da direção da radiação incidente, a intensidade da radiação refletida for independente do ângulo de reflexão. Ao contrário, se toda a reflexão for na direção de  $\theta_2$ , que equivale ao ângulo incidente  $\theta_1$ , ocorre a reflexão especular. Embora nenhuma superfície seja perfeitamente difusa ou especular, a última condição é mais bem aproximada por superfícies polidas como espelhos e a primeira condição por superfícies rugosas. Para o projeto em questão, apenas a reflexão especular será relevante.



**Fig. 5.5** – Reflexões difusas e especular.

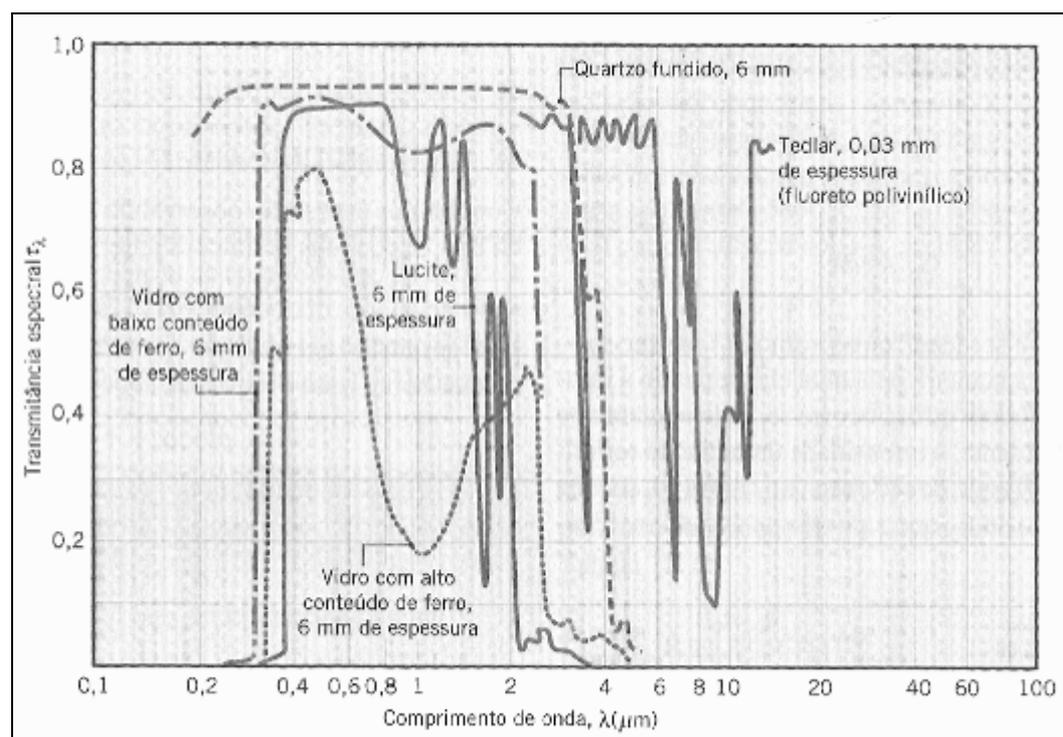
## 5.6. Transmissividade

Embora o tratamento de resposta de um material semitransparente à radiação incidente seja um problema complicado, resultados razoáveis podem ser frequentemente obtidos através do uso de transmissividades hemisféricas definidas como

$$\tau_{\lambda} = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G(\lambda)} \quad (5.8)$$

e

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (5.9)$$



**Fig. 5. 6** – Dependência espectral das transmissâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados.

### 5.7. Radiação Solar

A radiação solar é, obviamente, essencial para toda forma de vida na Terra. Através de processos térmicos e fotovoltaicos, ela tem o potencial de satisfazer grande parte de nossa demanda por ambientes aquecidos, processos de calor e eletricidade.

O Sol é aproximadamente uma fonte de radiação esférica que tem  $1,39 \times 10^9$  m no diâmetro e é localizado a  $1,5 \times 10^{11}$  m da Terra. Em relação à magnitude e à dependência

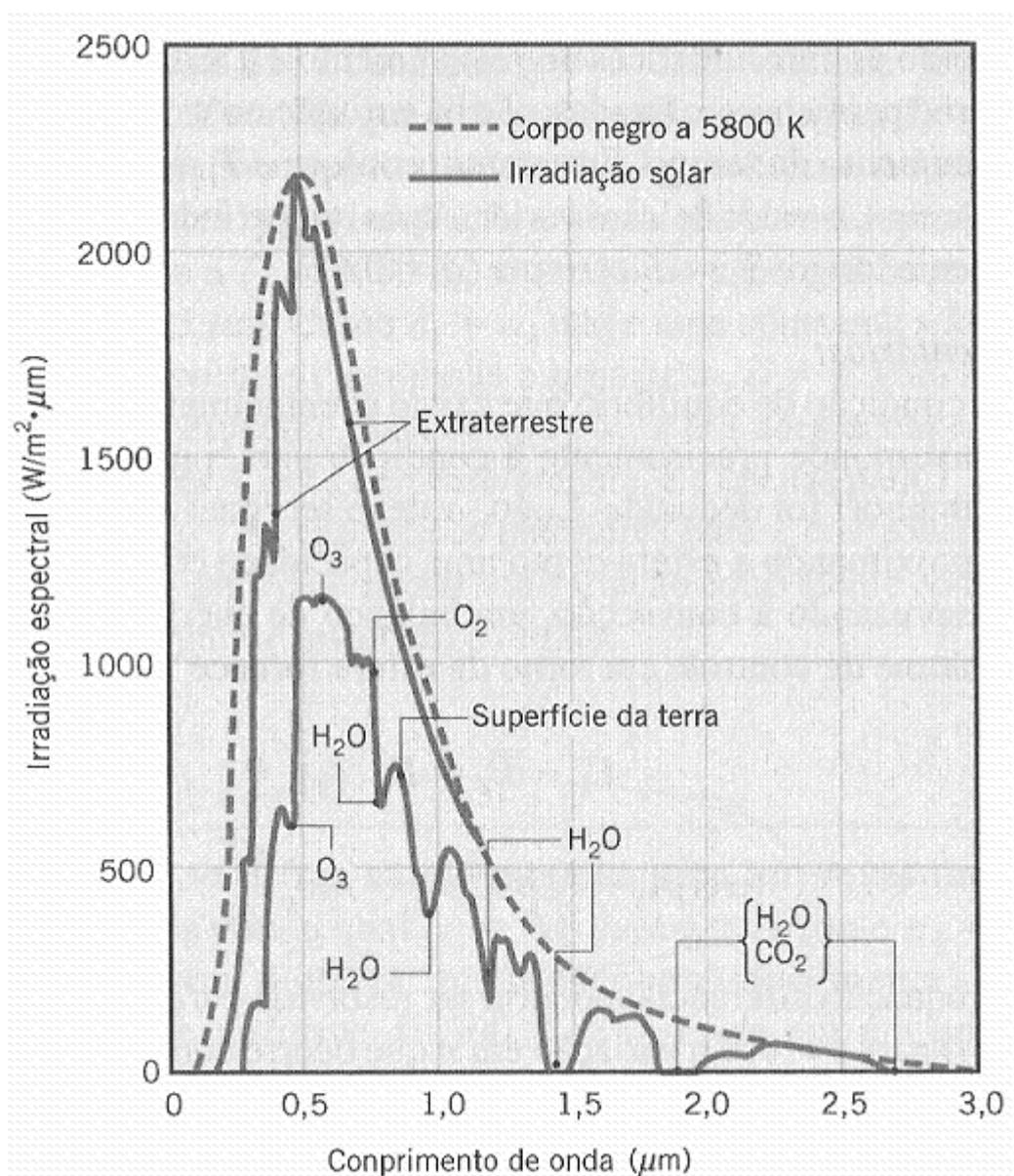
espectral e direcional na radiação solar incidente, é necessário distinguir entre as condições de superfície da terra e fora da atmosfera terrestre.

A distribuição espectral da radiação solar é significativamente diferente daquela associada à emissão de superfícies utilizadas em engenharia. Conforme mostrado na Fig. 6, essa distribuição se aproxima à de um corpo negro a 5800 K. A irradiação é concentrada na região de baixo comprimento de onda ( $0,2 \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$ ) do espectro térmico, com o pico ocorrendo em aproximadamente  $0,50 \mu\text{m}$ . É essa pequena concentração de comprimento de onda que freqüentemente impede a consideração de comportamento de corpo cinzento para as superfícies irradiadas pelo Sol, uma vez que a emissão é geralmente na região espectral acima de  $4 \mu\text{m}$  e é improvável que as propriedades espectrais da superfície sejam constantes sobre tal ampla faixa espectral.

Conforme a radiação solar passa através da atmosfera da Terra, sua magnitude e suas distribuições espectral e direcional sofrem variação significativa. A variação é devida à absorção e dispersão da radiação pelos constituintes atmosféricos. O efeito da absorção pelos gases atmosféricos  $\text{O}_3$  (ozônio),  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$  é mostrado pela curva mais baixa da Fig. 6. A absorção pelo ozônio é alta na região UV, fornecendo uma considerável atenuação abaixo de  $0,3 \mu\text{m}$ . Na região visível existe alguma absorção pelo  $\text{O}_3$  e  $\text{O}_2$ ; e, nas regiões próximas e afastadas da IV, a absorção é domiada pelo vapor de água. Em todo o espectro solar, existe também uma absorção contínua da radiação pelo conteúdo de poeira e aerossol da atmosfera.

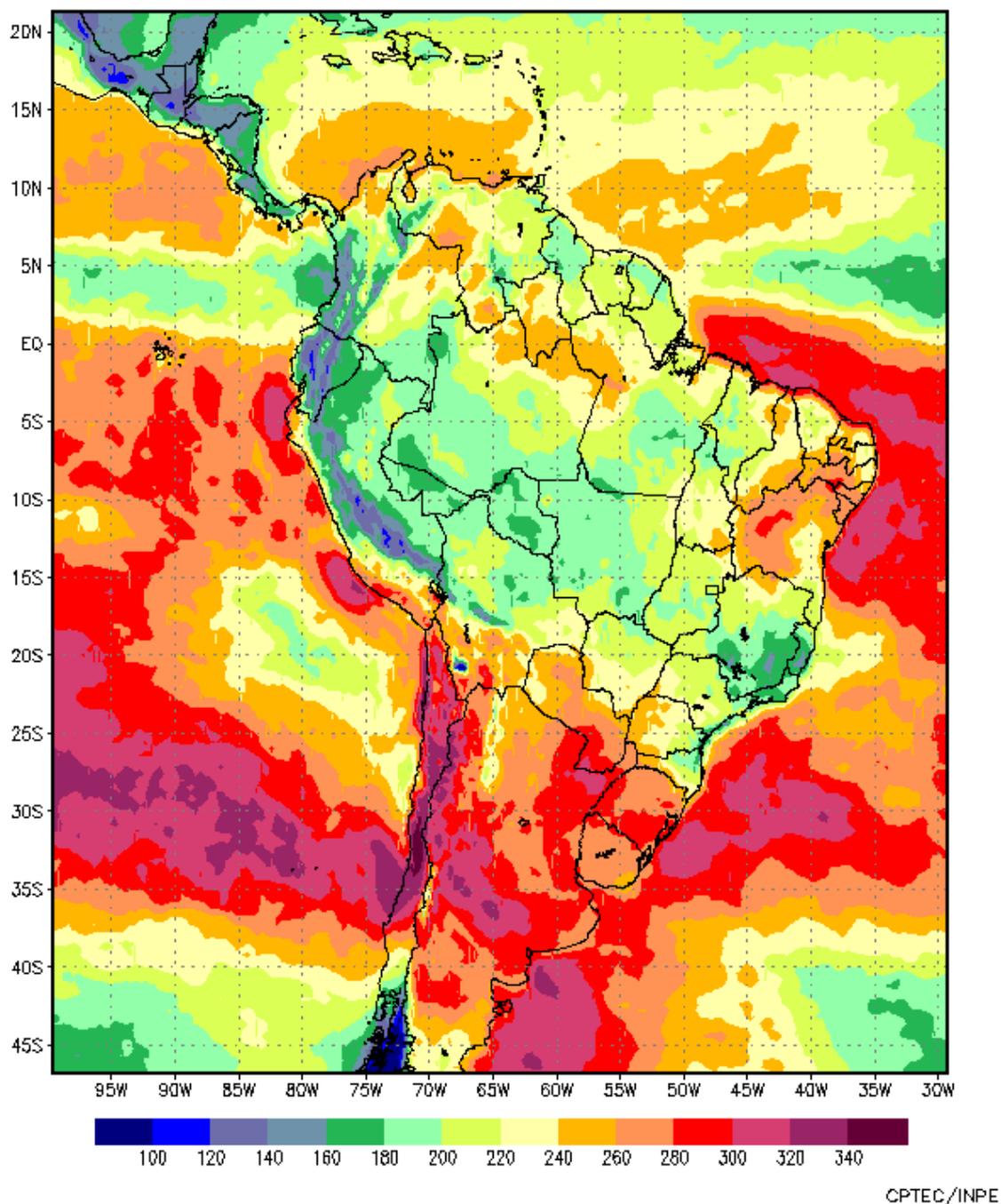
A dispersão atmosférica fornece o *redirecionamento* dos raios de Sol de dois tipos. A dispersão de Rayleigh (ou molecular) pelas moléculas do gás fornece uma dispersão aproximadamente uniforme da radiação em todas as direções. Assim sendo, aproximadamente metade da radiação dispersada é redirecionada para o espaço, enquanto a parte restante colide na superfície da Terra. Em qualquer ponto sobre essa superfície, a radiação dispersada é incidente de todas as direções. Ao contrário, a *dispersão de Mie* pelas partículas de poeira e aerossol da atmosfera é concentrada nas direções que se encontram próximas àquelas dos raios incidentes. Logo, praticamente toda essa radiação colide na superfície da Terra nas direções próximas àquela dos raios solares.

A radiação solar total que atinge a superfície da Terra é, dessa forma, a soma das contribuições direta e difusa. A contribuição difusa pode variar de aproximadamente 10% da radiação solar total em um dia claro para aproximadamente 100% em um dia totalmente nublado.



**Fig. 5.7** – Distribuição espectral da radiação solar.

Media da Radiação Diária Mod. GL1.2 (W/m<sup>2</sup>)  
UV+VIS+IV Período: Dezembro 2006



**Fig. 5. 8** – Mapa da média de radiação solar diária na América do Sul.

(Fonte: CPTEC/INPE)

## 6. CONCENTRADORES SOLARES DE REFLEXÃO

O coletor solar é o elemento chave para um sistema de energia solar. É nessa área tecnológica que há possibilidades de novos entendimentos no sentido de tornar essa energia capturada em uma fonte viável para o futuro.

A função de um coletor solar é simples. Ele intercepta os raios solares incidentes e o transforma em um forma de energia que pode ser aplicado para atender a uma demanda específica. Quando temperaturas mais elevadas são necessárias, utilizam-se concentradores solares. A energia solar incide sobre uma superfície refletora e concentra-se em superfície receptora. Realizou-se uma busca acerca das formas de concentradores solares existentes atualmente. Os mais utilizados são:

### 6.1. “Heliostats” - Torres de Energia

Torres de Energia geram eletricidade concentrando a radiação solar em um foco localizado no alto de uma torre receptora, transferindo esse calor a um fluido que pode ser óleo ou sal derretido. Para isso, utilizam-se milhares de refletores planos, denominados “heliostats”, integrados a um dispositivo de rastreamento do Sol, para refletirem os raios solares incidentes no receptor da torre.

Os “heliostats” que se localizam em torno da torre apresentam um arranjo de tal modo a otimizar a energia ao longo do ano. O campo, a quantidade e o tamanho dos refletores são dimensionados de acordo com a necessidade de operação. Em uma instalação típica, a energia concentrada do Sol é maior que a energia máxima necessária para a produção de vapor. Conseqüentemente, o sistema de armazenamento térmico pode ser “carregado” ao mesmo tempo em que a planta estiver operando em sua capacidade máxima.

O ciclo de torres de energia segue-se da seguinte forma: fluido armazenado em um reservatório “frio” é bombeado até o receptor da torre central. O fluido é aquecido a uma temperatura de 565°C e depois segue até ser armazenado em um reservatório “quente”. Assim, o fluido quente passa pelo gerador de vapor trocando calor com a água,

gerando vapor superaquecido. Este, por sua vez, segue até a turbina gerando energia mecânica e posteriormente em energia térmica. Do gerador de vapor, o fluido retorna para o tanque “frio” onde é novamente armazenado e eventualmente re-aquecido no receptor. Esse sistema tem aplicação em indústrias que operam em uma faixa de 30 a 400MW. Segue abaixo um modelo esquemático do ciclo do fluido de uma torre de energia.



**Fig. 6. 1** – “Heliostats” do sistema de torre de energia.



**Fig. 6. 2** – Instalações de torre de energia no sul da Espanha.

## 6.2. Coletor de Calha Parabólica

Essa é uma tecnologia de um sistema, provido de uma superfície refletora em formato de calha parabólica, que concentra os raios solares em um tubo receptor localizado ao longo da linha focal do coletor. A energia solar é utilizada para aquecer o fluido que passa através do tubo. Em seguida, o fluido é transportado por canos até um gerador de vapor/turbina.

A estrutura da calha é normalmente projetada para rastrear o Sol ao longo de um eixo, predominantemente norte-sul. Essa configuração permite que um eixo singular rastreie o Sol de leste a oeste durante o dia para assegurar que o Sol é continuamente focado nos tubos receptores. Um sistema de calha individual atualmente consegue gerar 80 MW de eletricidade.

Nos dias de hoje, todos os sistemas de calha são “híbridos”, isto é, utilizam combustível fóssil como suplemento da energia solar nos dias de pouca radiação solar. Essa tecnologia pode ser utilizada para prover processos de aquecimento ou conduzir reações químicas, mas é atualmente mais conhecido para aplicações em fornecimento de energia elétrica.



**Fig. 6. 3** – Coletores de calha parabólica.

### 6.3. Coletor Parabólico de Foco Pontual

Esses sistemas parabólicos consistem em refletores em forma de “pratos” parabólicos que concentram os raios solares incidentes em um receptor localizado no ponto focal. O fluido do receptor é aquecido até altas temperaturas chegando até a 750°C. Esses concentradores são montados para rotacionarem em torno de dois eixos distintos para seguir o Sol, já que para uma eficiência máxima há a necessidade de que os raios incidentes sejam normais ao coletor.

A energia térmica coletada pelo receptor é convertida diretamente em energia mecânica por um motor de ciclo Stirling ou Brayton. Posteriormente, esta energia é convertida em energia elétrica. Esses coletores são caracterizados pela alta eficiência, operação autônoma e capacidade de operar independentemente ou em conjunto com combustível fóssil.

De todos os tipos de concentradores solares, esse sistema tem mostrado a melhor eficiência, de 29,4%, na conversão de energia solar em energia térmica e se tornar uma das mais baratas fontes de energia renovável. A modularidade desse sistema permite que se possa ser desenvolvida individualmente para aplicações distantes e para redes elétricas de menor porte.



**Fig. 6. 4** – Prato parabólico de foco pontual.

## 7. DEFINIÇÃO DO COLETOR SOLAR

Apesar de apresentar o menor rendimento, a escolha pelo concentrador de calha parabólica para o projeto se deve a exclusão dos outros dois tipos, assim como, a facilidade em sua construção e instalação em relação aos outros tipos de concentradores.

A torre exigiria a construção de uma grande estrutura receptora de radiação e um sistema de rastreamento do Sol para cada superfície refletora (“heliostats”), o que inviabiliza sua fabricação. Já o concentrador de foco pontual, exigiria a construção de um refletor parabólico em forma de prato, que normalmente opera com um motor Stirling e de um sistema de controle para o rastreamento solar em dois eixos, o que tornaria muito caro.



**Fig. 7. 1** – Coletores de calha parabólica.

## 8. SISTEMA DE RASTREIO SOLAR

Para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor de acordo com a incidência dos raios solares através de um sistema de rastreo solar, denominado “tracking”. Três configurações desse sistema foram pensadas para o concentrador.

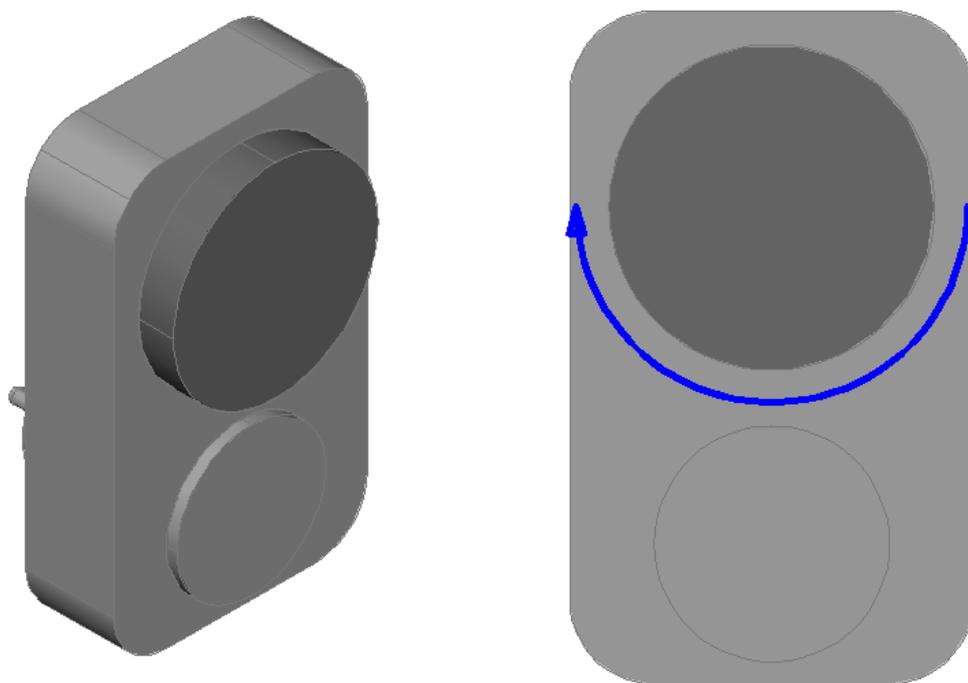
A primeira idéia é a de utilizar um relógio de grande porte para ser acoplado diretamente com a calha. O maior problema é a disponibilidade do torque do relógio. Para garantir a rotação da calha, mesmo com baixo torque disponível, o foco linear (centro de rotação) será também o centro de gravidade da calha. Assim, o eixo de rotação da calha será acoplado diretamente com o eixo do relógio que representa as horas, permitindo a sincronização do período da calha com o do Sol. Durante a presença do Sol, o coletor terá a sua superfície refletora voltada diretamente para o mesmo e durante a noite, devido a sua rotação contínua, terá a mesma superfície voltada para baixo.

Uma segunda alternativa seria a utilização de um motor com um sistema de engrenagens. O motor, que seria definido, utilizaria energia da rede elétrica e teria seu funcionamento contínuo e responsabilidade de gerar energia mecânica para a rotação da calha. As engrenagens seriam usadas na redução da velocidade até o ponto de operação ideal. Para isso, as engrenagens seriam dimensionadas de acordo com a rotação do motor fazendo com que o período de uma volta completa da calha seja exatamente à de um dia. O sistema de engrenagens deveria reduzir significativamente a rotação do motor para tal finalidade.

A última opção, caso as alternativas anteriores não funcionassem de acordo com o esperado, será o rastreo manual.

### 8.1. Definição do sistema de “tracking”

Para o projeto em questão será utilizado a primeira idéia. Entretanto, não será usado um relógio, mas um “timer” que possui um disco central com movimento giratório no sentido horário, conforme **Fig. 8.1**. O acoplamento será feito diretamente com o eixo do concentrador, isso porque, uma volta completa do disco girante corresponde a um dia.

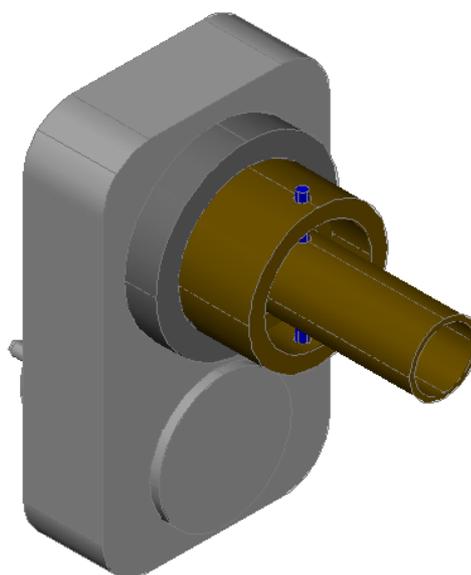


**Fig. 8. 1** – Desenho do “Timer” com disco girante no sentido horário.



**Fig. 8. 2** – Ilustração do “timer” utilizado.

Para acoplar o tubo de cobre ao timer será colado um tubo vazado de plástico diretamente no disco. Assim, o tubo de cobre será fixado através de um pino passante conforme **Fig. 8.3**.



**Fig. 8. 3** – Tubo de cobre acoplado ao timer.



**Fig. 8. 4** – Ilustração do timer com o tubo de plástico.

## 9. REQUISITOS DO MODELO

### 9.1. Definição da geometria do coletor

Será definida uma área projetada dos raios solares incidentes. A partir disso, pretende-se dimensionar o comprimento e a abertura da parábola. Para uma parábola aberta, a maior parte dos raios refletidos se concentra na parte inferior do duto receptor. Para uma melhor distribuição dos raios refletidos, a parábola deverá possuir uma geometria mais fechada. Portanto, para o protótipo será utilizada a segunda opção.

### 9.2. Tubo Receptor Externo

O tubo externo terá a função de reduzir a perda de calor do tubo interno, por onde flui a água, para o meio externo por convecção e produzir o efeito estufa. Para isso o material deverá apresentar baixa condutividade térmica a fim de diminuir as perdas e transmitir grande parte da radiação solar incidente. Este terá maior importância para o projeto na escolha do material a ser utilizado.

A face interna do tubo estará mais quente que a exterior e vai se dilatar mais, existindo o risco de quebra ou deformação, exigindo do material um coeficiente de dilatação pequeno. Pode se usar uma dupla cobertura ou aumentar a espessura da cobertura transparente para tentar minimizar as perdas por convecção, mas essas soluções aumentam as perdas por absorção do fluxo solar incidente, além de encarecer o produto. Em geral, pode se dizer que a dupla cobertura é tanto mais interessante quanto mais baixa seja a temperatura exterior e mais forte seja o vento.

Os materiais disponíveis para tal finalidade podem ser:

- Vidro: São transparentes à radiação de onda inferior a  $3 \mu\text{m}$  e opacos às radiações superiores. Existem vários vidros que se diferenciam por sua composição química, suas características mecânicas e ópticas. Deve-se optar pelos vidros recozidos ou temperados, já que melhoram suas propriedades mecânicas sem alterar as ópticas.

- Materiais plásticos: Apresentam-se sob a forma de filmes flexíveis de alguns décimos de milímetros de espessura, ou sob a forma de placa rígida de alguns milímetros. Suas principais características são: baixa densidade, má condutividade térmica, coeficiente de dilatação linear e má resistência a temperaturas elevadas. Além disso, sofrem deterioração física e instabilidade química sob a ação dos elementos exteriores.

### **9.3. Tubo Receptor Interno**

A superfície do duto receptor interno deve apresentar uma alta absorvidade, ou seja, deve absorver grande parte da irradiação total incidente sobre superfície. A determinação dessa propriedade é complicada pelo fato de que ela pode ser caracterizada pela dependência direcional dos raios incidentes, do comprimento de onda e da natureza da superfície absorvedora. Seria interessante utilizar um material que apresente alta absorvidade na faixa espectral próxima a UV onde a irradiação do Sol é maior. Para isso pode-se usar:

- Tinta preta ou escura, que absorve a radiação solar. Apresenta o inconveniente de ter um coeficiente de emissão sensivelmente igual ao de absorção, portanto não é recomendada para altas temperaturas.
- Superfícies seletivas. Possui um coeficiente de absorção de radiação solar alto e um baixo coeficiente de emissão. Não existem materiais simples que tenham essa propriedade, portanto ela é obtida mediante a superposição de camadas ou tratamentos especiais da superfície. Além disso, esse material é muito caro inviabilizando a sua utilização.

As tintas são mais econômicas que os tratamentos seletivos, mas se danificam antes.

#### **9.4. Superfície Refletora**

O material para tal finalidade deverá refletir grande parte da radiação solar incidente sobre a superfície. Nosso maior desafio está nesse componente, pois pretende-se utilizar no protótipo papel alumínio, material de difícil manuseio. Outras opções para a superfície são: aço inox, plástico especial, espelho, alumínio polido e tinta.

#### **9.5. Outros Componentes**

Para a bomba, mangueira e reservatório a principal restrição é a alta temperatura de operação em que estão sujeitos. Para a estrutura da calha, pretende-se utilizar MDF devido ao fácil manuseio.

## 10. DEFINIÇÃO DO MODELO TEÓRICO

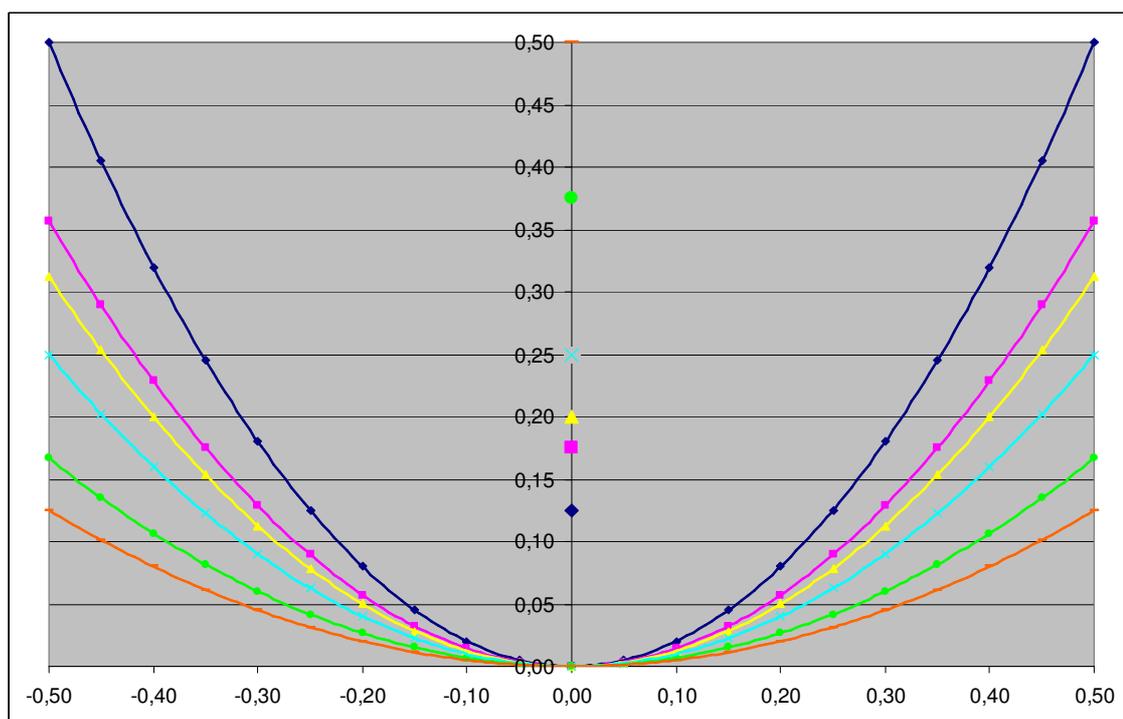
### 10.1. Definição da Geometria do Concentrador

A parábola é uma função quadrática que pode ser representada como

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (10.1)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes. A parábola tem a importante propriedade de que todo raio solar que incide paralelamente ao seu eixo reflete sobre o foco. Para o dimensionamento do concentrador,  $b$  e  $c$  serão considerados nulos.

Na figura abaixo temos algumas ilustrações de parábolas com seus focos representados na linha vertical identificados pelas cores correspondentes.

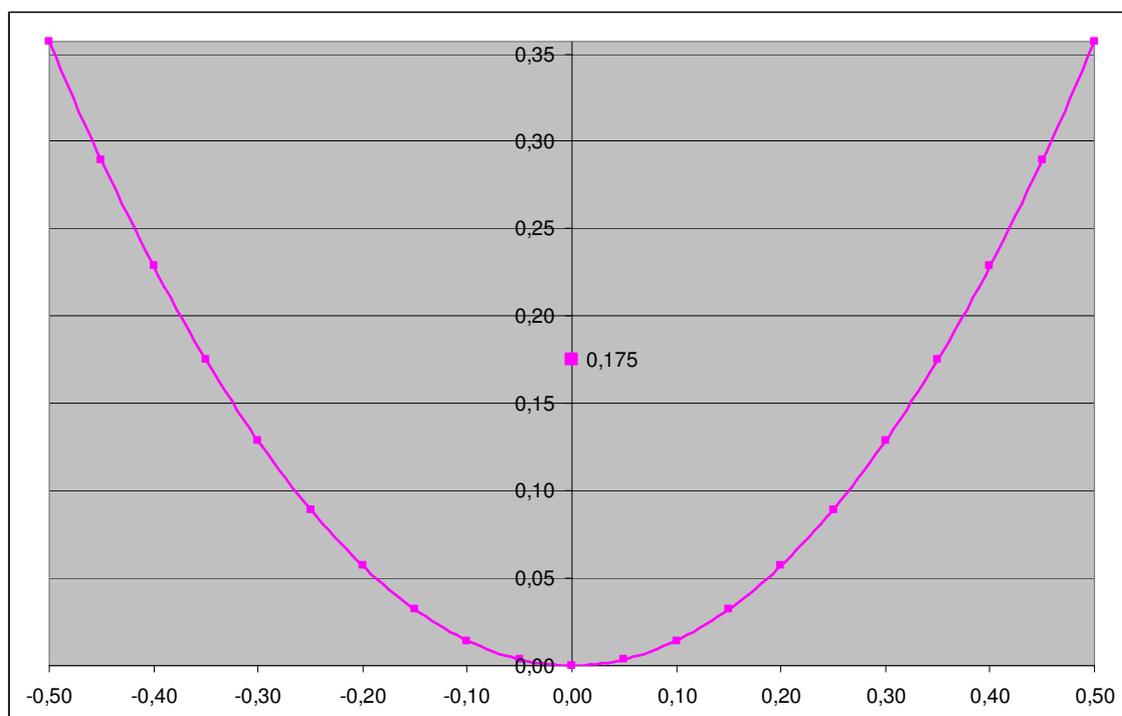


**Fig. 10.1** – Parábolas e seus respectivos focos.

A escolha por uma parábola mais aberta como a representada pela linha laranja na figura acima, onde o foco se encontra a 0,50 m, tem a vantagem de utilizar menos material e maior facilidade na construção. Porém, toda a radiação refletida pela

superfície parabólica será concentrada apenas na parte inferior do tubo coletor. Para amenizar esse problema, ou seja, distribuir melhor a radiação sobre o tubo coletor, deve-se optar por uma parábola mais fechada onde o foco possa se encontrar mais abaixo da extremidade do refletor. Contudo mais material é exigido e conseqüentemente maior será o custo de construção. Como o projeto não apresenta exigências rigorosas sobre tais parâmetros, o perfil escolhido se encontra na média dos termos. Assim o coeficiente  $a$  da eq. (10.1) assume o valor de  $(4.0,175)^{-1}$  onde o valor de 0,175 representa a altura do foco em metros.

$$f(x) = \frac{1}{4.0,175} x^2 + 0x + 0 \quad (10.2)$$



**Fig. 10. 2** – Parábola escolhida de foco 0,175m.

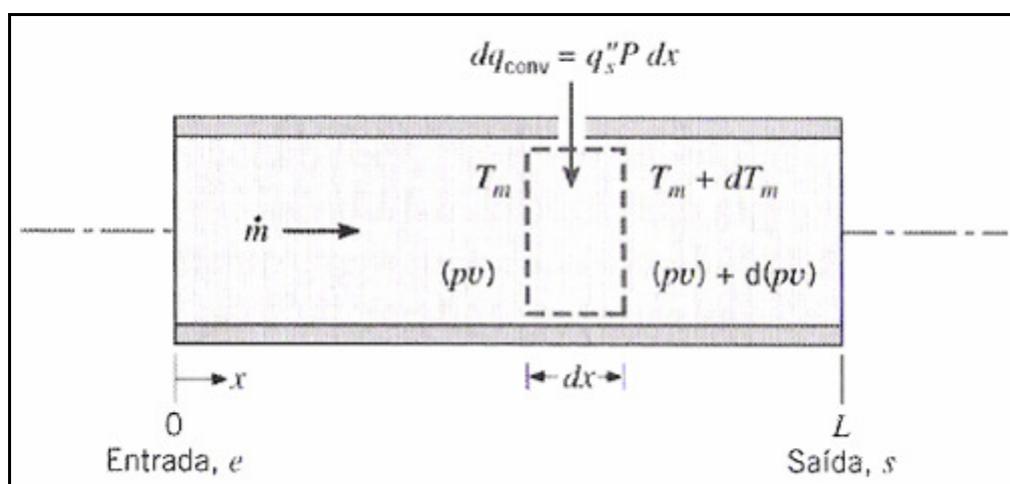
## 10.2. Tubo Receptor Interno

Como o escoamento em um tubo é completamente limitado em seu interior, um balanço de energia pode ser aplicado para determinar como a temperatura média  $T_m(x)$

varia com a posição ao longo do tubo e como a transferência de calor total por convecção  $q_{conv}$  é relacionada com as diferenças de temperaturas na entrada e na saída do tubo. Considere o escoamento no tubo da **Fig.10.3**. O fluido move-se a uma taxa de escoamento constante  $\dot{m}$  ponto, e a transferência de calor por convecção ocorre na superfície interna. Tipicamente, as mudanças das energias cinéticas e potencial do fluido, assim como a transferência de energia por condução na direção axial, são desprezíveis. Assim sendo, se nenhum trabalho for realizado pelo fluido conforme ele se move através do tubo, os únicos efeitos significativos serão os associados com as variações de energia térmica e com o trabalho de fluxo. O trabalho de fluxo é realizado para mover o fluido através da superfície de controle e, por unidade de massa do fluido, pode ser representado como o produto da pressão do fluido  $p$  e o volume específico  $v$ .

Aplicando a conservação de energia ao volume de controle da **Fig.10.3**, temos

$$dq_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[ \dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0 \quad (10.2)$$



**Fig. 10. 3** – Volume de controle para escoamento interno em um tubo.

ou

$$dq_{conv} = \dot{m}d(c_v T_m + pv) \quad (10.3)$$

Ou seja, a taxa de transferência de calor por convecção para o fluido deve ser igual à taxa a que a energia térmica do fluido aumenta mais que a taxa líquida na qual o trabalho é realizado ao movimentar o fluido através do volume de controle.

Essa equação também pode ser utilizada como uma boa aproximação para líquidos incompressíveis. Nesse caso,  $c_p = c_v$ , e, uma vez que  $v$  é muito pequeno,  $d(pv)$  é geralmente muito menor do que  $d(c_v T_m)$ .

Uma forma especial da equação do balanço se relaciona às condições para todo o tubo. Em particular, integrando a partir da entrada e para a saída  $s$ , segue que

$$q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{ms} - T_{me}) \quad (10.4)$$

onde  $q_{conv}$  é a taxa total de transferência de calor no tubo. Esse simples balanço de energia global relaciona três variáveis térmicas importantes ( $q_{conv}$ ,  $T_{m,s}$ ,  $T_{m,e}$ ). Ela é uma expressão geral que se aplica independentemente da natureza das condições da superfície térmica ou das condições do escoamento do tubo.

Para o fluxo de calor constante na superfície é simples determinar a taxa total de transferência de calor  $q_{conv}$ . Uma vez que  $q_s''$  é independente de  $x$ , segue que

$$q_{conv} = q_s''(PL) \quad (10.5)$$

onde  $P$  é o perímetro da superfície e  $L$  é o comprimento total do tubo. Essa expressão pode ser utilizada para determinar a variação da temperatura.

Para  $q_s''$  constante, segue também que

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = f(x) \quad (10.6)$$

Integrando a partir de  $x=0$ , segue que

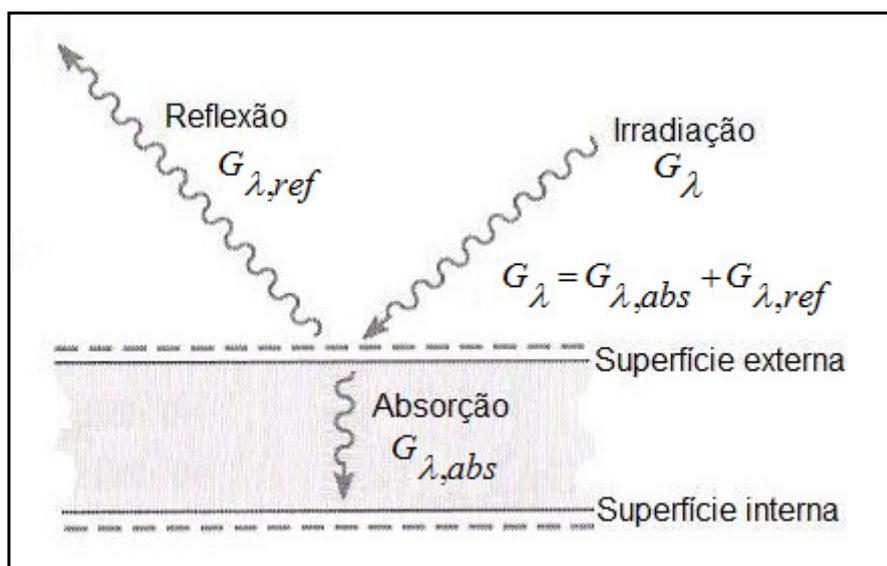
$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} x \quad (10.7)$$

### 10.3. Superfície Externa do Tubo Receptor Interno

A irradiação incidente sobre a superfície do tubo receptor é composta em duas parcelas após sua incidência. Uma parte é refletida e outra é absorvida. O mais

interessante para o projeto seria que a superfície do tubo receptor apresentasse toda a irradiação incidente absorvida pelo mesmo. O que na realidade não ocorre com nenhum material. A decomposição nas duas parcelas pode ser representada na seguinte equação

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} \quad (10.8)$$



**Fig. 10. 4** – Parede do tubo receptor.

As absorções e reflexões da radiação variam de acordo com o comprimento de onda. As duas parcelas podem ser representadas como se segue

$$G_{abs} = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.9)$$

$$G_{ref} = \int_0^{\infty} \rho(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.10)$$

O que será levado em conta para aquecer o fluido é somente a parcela absorvida, assim

$$G_{abs} = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda = q''_s \quad (10.11)$$

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda P}{\dot{m} C_p} x \quad (10.12)$$

#### 10.4. Tubo Receptor Externo

O tubo externo semitransparente tem por finalidade diminuir as perdas por convecção do tubo interno para o meio externo. O ideal seria que toda a irradiação incidente sobre o mesmo transmitisse para outro lado do material. O que ocorre de fato é que após a incidência uma parte é refletida, uma outra parcela é absorvida e o resto é transmitido.

$$G_{2\lambda} = G_{1\lambda,abs} + G_{1\lambda,ref} + G_{1\lambda,tr} \quad (10.13)$$

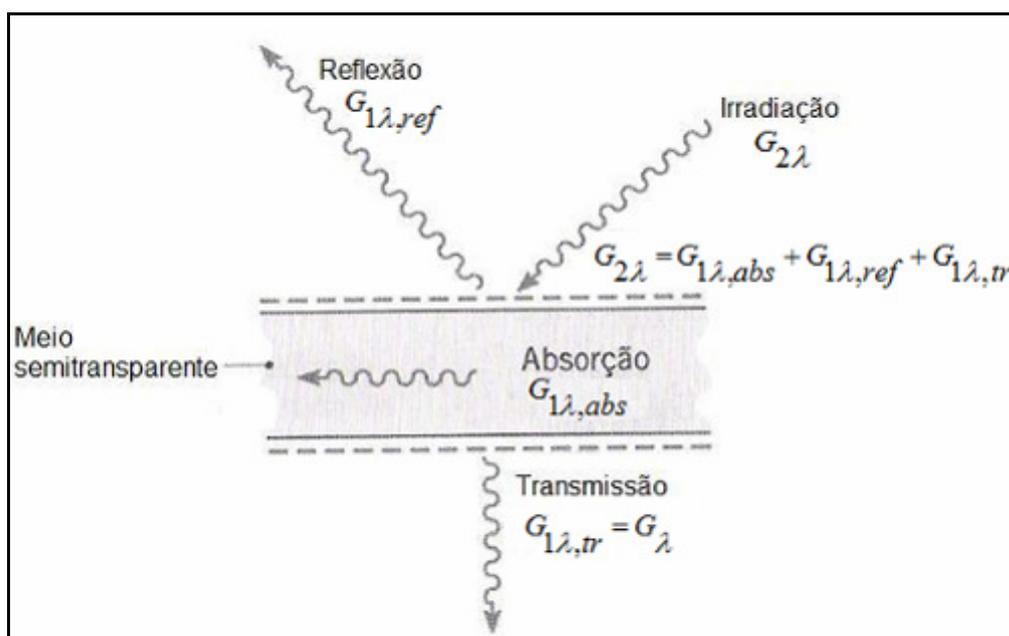


Fig. 10.5 – Tubo receptor externo.

$$G_{1,abs} = \int_0^{\infty} \alpha_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.14)$$

$$G_{1,ref} = \int_0^{\infty} \rho_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.15)$$

$$G_{1,tr} = \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.16)$$

A parcela da radiação transmitida pelo material é o que interessa para aquecer a água. Assim

$$G_{1,tr} = \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda = G_{\lambda} \quad (10.17)$$

$$G_{abs} = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda \right) d\lambda = q_s'' \quad (10.18)$$

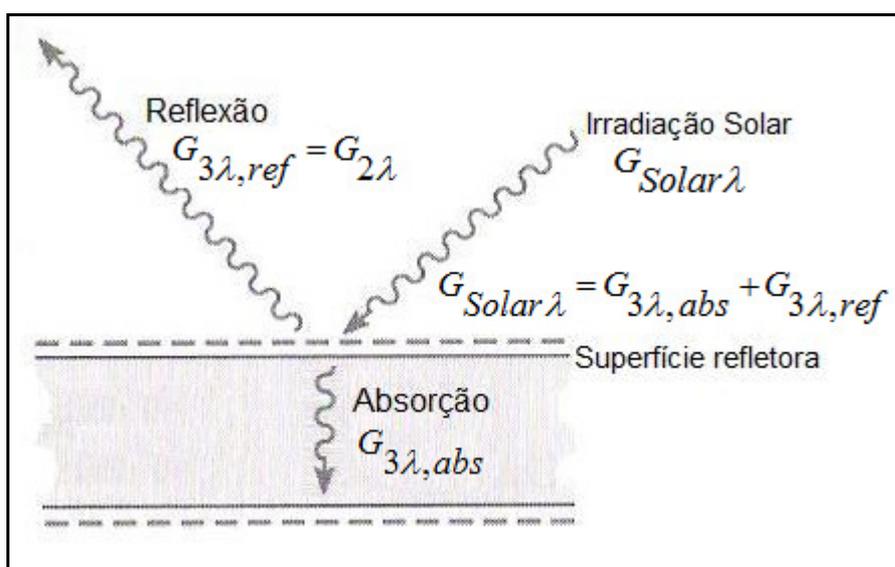
Substituindo na equação da temperatura do fluido dentro do tubo em função de  $x$ , temos

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) G_{2\lambda}(\lambda) d\lambda \right) d\lambda P}{\dot{m} C_p} x \quad (10.19)$$

### 10.5. Superfície Refletora

A superfície refletora que se encontra na calha parabólica tem por finalidade concentrar toda a radiação solar projetada sobre o mesmo para o tudo receptor que se encontra no foco. O ideal seria que todos os raios incidentes sobre ela fossem refletidos. Novamente, o que ocorre é similar com o tubo interno, porém o que se prioriza aqui é justamente o que era desprezível para o tubo interno.

$$G_{Sol,\lambda} = G_{3\lambda,abs} + G_{3\lambda,ref} \quad (10.20)$$



**Fig. 10. 6** – Superfície refletora.

Considerando apenas os valores das absorptâncias e reflectâncias hemisféricas totais, segue

$$G_{3\lambda,abs} = \int_0^{\infty} \alpha_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.21)$$

$$G_{3\lambda,ref} = \int_0^{\infty} \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (10.22)$$

A parcela relevante para o projeto é a parcela refletida, ou seja

$$G_{3\lambda,ref} = \int_0^{\infty} \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda = G_{2\lambda} \quad (10.23)$$

$$\begin{aligned} G_{abs} &= \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda \right) d\lambda \right) d\lambda = q_s'' \end{aligned} \quad (10.24)$$

Substituindo na equação da temperatura do fluido dentro do tubo em função de  $x$ , temos

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda \right) d\lambda \right) d\lambda PL}{\dot{m}C_p} x \quad (10.25)$$

Para o comprimento total e considerando todas as perdas ocorridas pelo material e desprezando a perda para o meio, temos

$$T_{m,s}(L) = T_{m,e} + \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \tau_{1\lambda}(\lambda) \left( \int_0^{\infty} \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda \right) d\lambda \right) d\lambda PL}{\dot{m}C_p} \quad (10.26)$$

$$T_{m,s}(L) = T_{m,e} + \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \tau_{1\lambda}(\lambda) \rho_{2\lambda}(\lambda) G_{Solar\lambda}(\lambda) d\lambda PL}{\dot{m}C_p} \quad (10.27)$$

## 10.6. Rendimento

O rendimento do coletor pode ser expresso como

$$\eta = \frac{q_{conv}}{G_{solar} \cdot A} \quad (10.28)$$

em que  $q_{conv}$  é a taxa total da troca de calor no tubo pela água expressa pela eq.(10.4),  $G_{solar}$  é a irradiação do sol e  $A$  é a projeção da área de incidência do Sol sobre o refletor.

Uma outra maneira de calcular o rendimento é utilizando a seguinte expressão

$$\eta = \frac{Q}{G_{solar} \cdot A \cdot \Delta t} \quad (10.29)$$

$\Delta t$  é o tempo em que a água que circula pelo tubo está sujeito ao aquecimento devido à irradiação solar,  $Q$  é a energia utilizada para o aquecimento da água e pode ser representada pela seguinte equação

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) \quad (10.30)$$

onde  $m$  é a massa total de água contida no reservatório e  $T_f$  e  $T_i$  são, respectivamente, a temperatura final e inicial da água dentro do reservatório.

## 11. SIMULAÇÃO

A partir da eq.(10.26), faz-se a simulação para determinar a temperatura de saída da água. Porém, algumas considerações serão levadas em conta como:

- Toda a radiação incidente sobre a superfície parabólica será refletida sobre o tubo receptor, ou seja,  $\rho = 1$ .
- Toda radiação que será refletida pela calha parabólica será transmitida para o tubo, ou seja,  $\tau = 1$ .
- A absorvidade para tinta preta é de 0,85.

Abaixo segue as tabela dos parâmetros utilizados para os cálculos. Em seguida, são mostradas tabelas com resultados das simulações.

**Tabela 11. 1** – Parâmetros para simulação

Parâmetros	Valores	Unidades
$T_{m,e}$	20	°C
$\rho$	1	
$\alpha$	0,85	
$\tau$	1	
$C_p$	4180	J/(kg.°C)
Diâmetro	22	mm
P	0,069115	m
L	1	m

Tabela 11. 2 – Temperatura final da água após primeira passagem pelo tubo

		Vazão [kg/s]						
		0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0035
G <sub>solar</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	400	34,31	27,16	24,77	23,58	22,86	22,39	22,04
	450	36,10	28,05	25,37	24,02	23,22	22,68	22,30
	500	37,89	28,94	25,96	24,47	23,58	22,98	22,56
	550	39,68	29,84	26,56	24,92	23,94	23,28	22,81
	600	41,47	30,73	27,16	25,37	24,29	23,58	23,07
	650	43,25	31,63	27,75	25,81	24,65	23,88	23,32
	700	45,04	32,52	28,35	26,26	25,01	24,17	23,58
	750	46,83	33,42	28,94	26,71	25,37	24,47	23,83
	800	48,62	34,31	29,54	27,16	25,72	24,77	24,09
	850	50,41	35,20	30,14	27,60	26,08	25,07	24,34
	900	52,20	36,10	30,73	28,05	26,44	25,37	24,60
	950	53,99	36,99	31,33	28,50	26,80	25,66	24,86
	900	52,20	36,10	30,73	28,05	26,44	25,37	24,60
950	53,99	36,99	31,33	28,50	26,80	25,66	24,86	
1000	55,78	37,89	31,93	28,94	27,16	25,96	25,11	
		Temperatura final da água [°C]						

Tabela 11. 3 – Variação da temperatura da água após primeira passagem pelo tubo

		Vazão [kg/s]						
		0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0035
G <sub>solar</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	400	14,31	7,16	4,77	3,58	2,86	2,39	2,04
	450	16,10	8,05	5,37	4,02	3,22	2,68	2,30
	500	17,89	8,94	5,96	4,47	3,58	2,98	2,56
	550	19,68	9,84	6,56	4,92	3,94	3,28	2,81
	600	21,47	10,73	7,16	5,37	4,29	3,58	3,07
	650	23,25	11,63	7,75	5,81	4,65	3,88	3,32
	700	25,04	12,52	8,35	6,26	5,01	4,17	3,58
	750	26,83	13,42	8,94	6,71	5,37	4,47	3,83
	800	28,62	14,31	9,54	7,16	5,72	4,77	4,09
	850	30,41	15,20	10,14	7,60	6,08	5,07	4,34
	900	32,20	16,10	10,73	8,05	6,44	5,37	4,60
	950	33,99	16,99	11,33	8,50	6,80	5,66	4,86
	900	32,20	16,10	10,73	8,05	6,44	5,37	4,60
950	33,99	16,99	11,33	8,50	6,80	5,66	4,86	
1000	35,78	17,89	11,93	8,94	7,16	5,96	5,11	
		Temperatura final da água [°C]						

As tabelas acima apresentadas mostram a temperatura final da água após uma passagem pelo tubo, que entra a 20°C, em diferentes condições de vazão e irradiação solar. As considerações feitas para a simulação fazem com que o rendimento seja bem alto, ou seja, as temperaturas finais atingem altos valores.

**Tabela 11. 4** – Variação da temperatura da água após terceira passagem pelo tubo

		Vazão (kg/s)						
		0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0035
G <sub>solar</sub> (W/m <sup>2</sup> )	400	66,97	36,69	30,71	27,97	26,36	25,29	24,52
	450	72,84	38,72	32,02	28,94	27,13	25,93	25,08
	500	78,71	40,76	33,32	29,92	27,90	26,57	25,63
	550	84,58	42,79	34,63	30,89	28,68	27,22	26,18
	600	90,46	44,83	35,93	31,86	29,45	27,86	26,73
	650	96,33	46,86	37,23	32,83	30,23	28,50	27,28
	700	102,20	48,90	38,54	33,80	31,00	29,15	27,83
	750	108,07	50,93	39,84	34,77	31,77	29,79	28,38
	800	113,94	52,97	41,15	35,74	32,55	30,43	28,93
	850	119,81	55,00	42,45	36,71	33,32	31,08	29,48
	900	125,68	57,04	43,76	37,68	34,10	31,72	30,03
	950	131,56	59,07	45,06	38,65	34,87	32,37	30,58
	900	125,68	57,04	43,76	37,68	34,10	31,72	30,03
950	131,56	59,07	45,06	38,65	34,87	32,37	30,58	
1000	137,43	61,11	46,37	39,62	35,64	33,01	34,59	
		Temperatura final da água (oC)						

**Tabela 11.5** – Variação da temperatura da água após terceira passagem pelo tubo

		Vazão [kg/s]						
		0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0035
$G_{\text{solar}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	400	46,97	16,69	10,71	7,97	6,36	5,29	4,52
	450	52,84	18,72	12,02	8,94	7,13	5,93	5,08
	500	58,71	20,76	13,32	9,92	7,90	6,57	5,63
	550	64,58	22,79	14,63	10,89	8,68	7,22	6,18
	600	70,46	24,83	15,93	11,86	9,45	7,86	6,73
	650	76,33	26,86	17,23	12,83	10,23	8,50	7,28
	700	82,20	28,90	18,54	13,80	11,00	9,15	7,83
	750	88,07	30,93	19,84	14,77	11,77	9,79	8,38
	800	93,94	32,97	21,15	15,74	12,55	10,43	8,93
	850	99,81	35,00	22,45	16,71	13,32	11,08	9,48
	900	105,68	37,04	23,76	17,68	14,10	11,72	10,03
	950	111,56	39,07	25,06	18,65	14,87	12,37	10,58
	900	105,68	37,04	23,76	17,68	14,10	11,72	10,03
	950	111,56	39,07	25,06	18,65	14,87	12,37	10,58
1000	117,43	41,11	26,37	19,62	15,64	13,01	14,59	
		Temperatura final da água [°C]						

As tabelas 11.4 e 11.5 acima apresentadas mostram a temperatura final da água após a terceira passagem pelo tubo, em diferentes condições de vazão e irradiação solar.

**Tabela 11.6** – Temperatura final da água no reservatório.

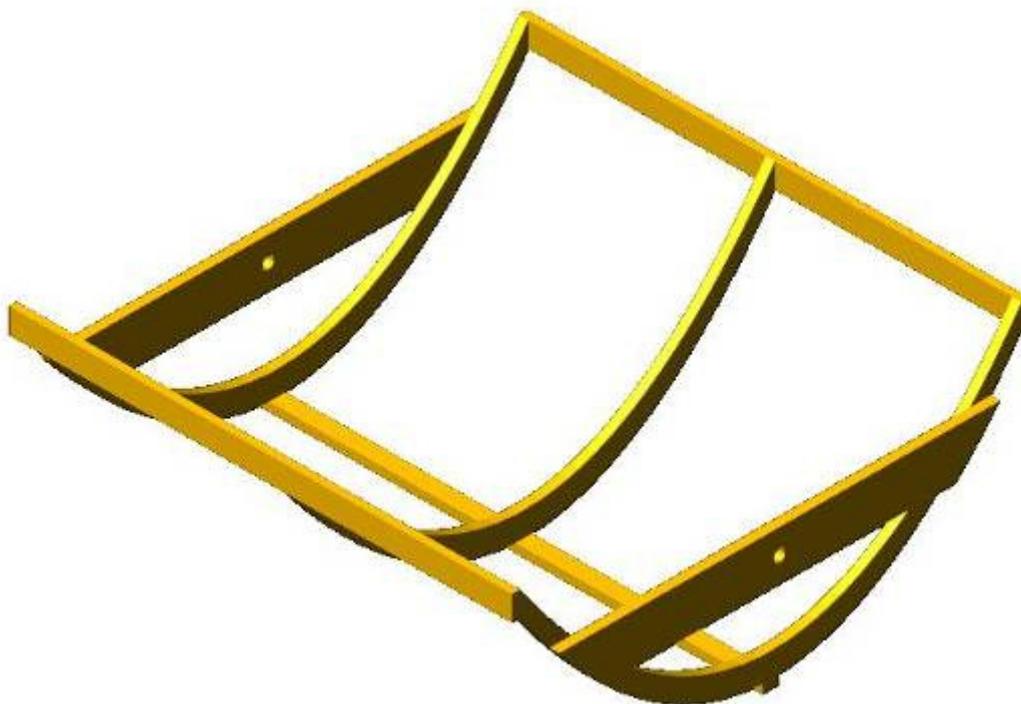
		Intervalo de tempo [min]				
		60	90	120	150	180
Quantidade de água no reservatório [kg]	10	106,1	149,2	192,2	235,3	278,4
	15	77,4	106,1	134,8	163,5	192,2
	20	63,1	84,6	106,1	127,7	149,2
	25	54,4	71,7	88,9	106,1	123,3
	30	48,7	63,1	77,4	91,8	106,1
		Temperatura final do reservatório [°C]				

A tabela acima representa a temperatura final da água que está no reservatório em função de diferentes quantidades de água e intervalo de tempo do experimento. Para a simulação e obtenção dessa tabela foi considerado um rendimento de 100%. Ou seja, toda a energia gerada pela irradiação solar na área projetada sobre o refletor em um determinado intervalo de tempo será utilizada para o aquecimento de toda a água contida

no reservatório. Em cima dos valores dos parâmetros (Quantidade de água no reservatório) e (Intervalo de tempo) pode-se obter o rendimento do concentrador pela **eq. (10.29)** em que  $Q$ , no caso, será a energia obtida experimentalmente.

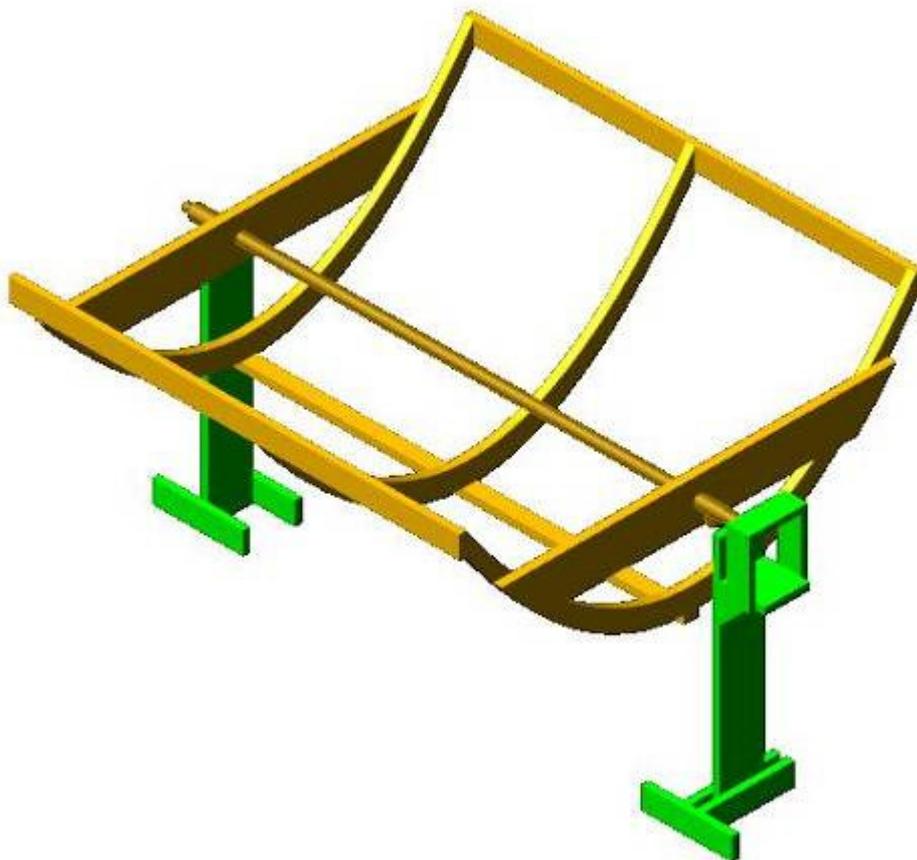
## 12. DIMENSIONAMENTO

O material escolhido para a estrutura da calha foi madeira MDF de 15mm de espessura. Serão feitas três estruturas com perfis parabólicos para apoiar e conformar a superfície refletora. Para tornar a calha suficientemente firme, serão fixados nos perfis parabólicos, três estruturas de madeira, conforme **Fig. 12.1**.



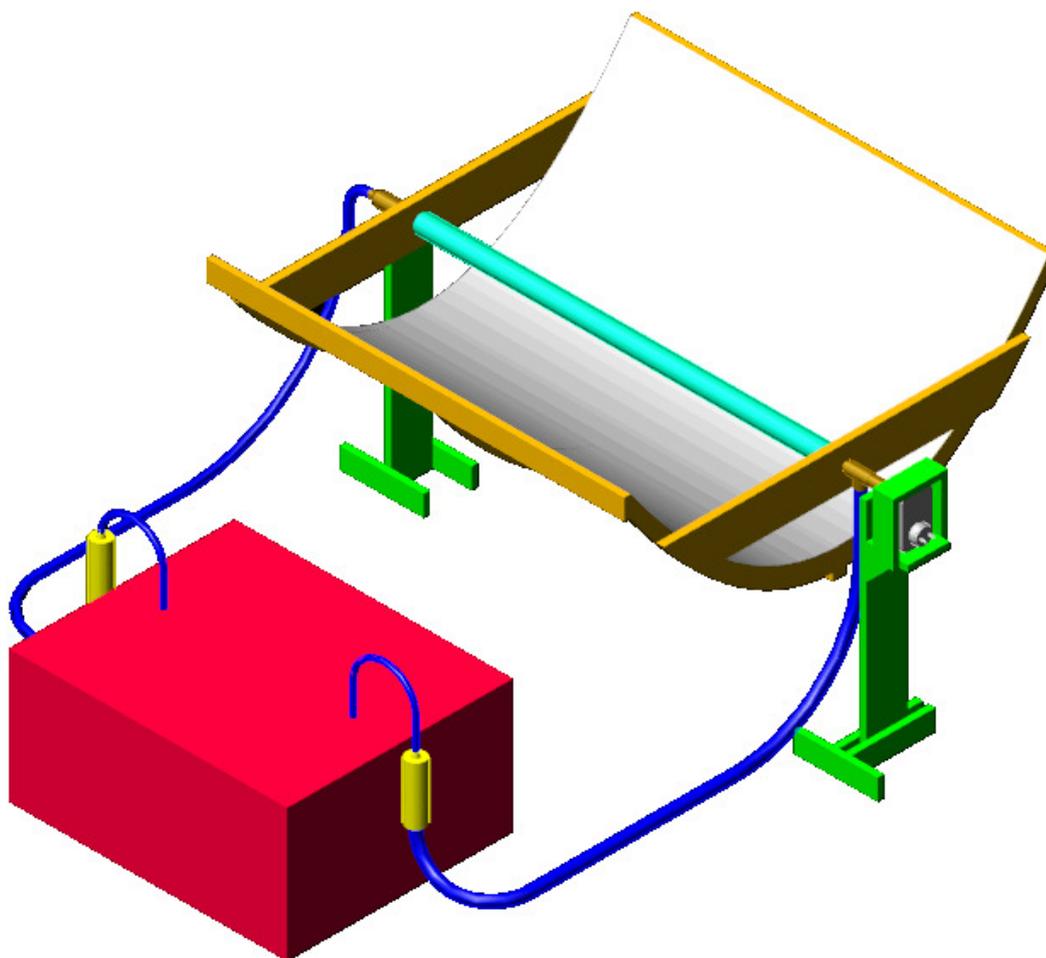
**Fig. 12. 1** – Estrutura da calha parabólica.

A sustentação da calha será feita pelo tubo de cobre. Nos dois perfis parabólicos das extremidades será fixada uma estrutura de madeira. Esta, apresenta um buraco no foco onde o tubo de cobre será fixado por ajuste forçado. O tubo será apoiado sobre dois suportes laterais que funcionam como mancais, conforme **Fig. 12.2**.



**Fig. 12. 2** – Suporte e tubo de cobre acoplado à calha parabólica.

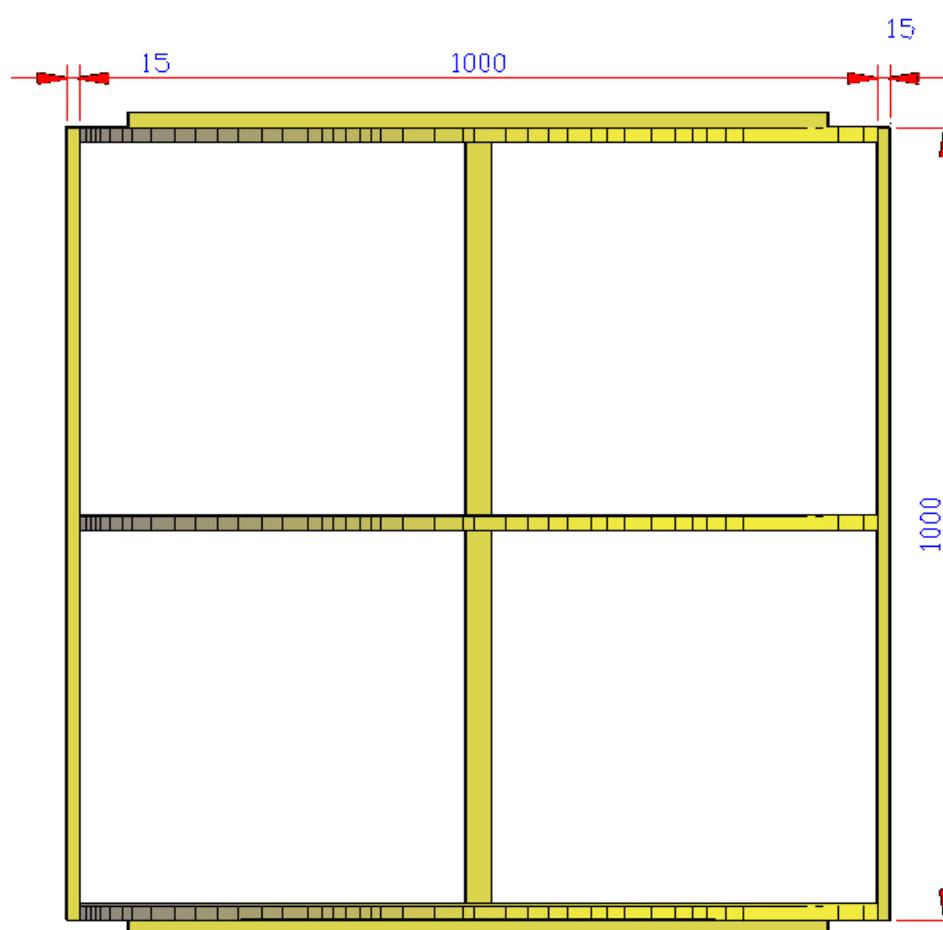
A figura abaixo representa o desenho preliminar do modelo que deseja-se construir. Toda a estrutura com exceção dos suportes estará sujeita a rotação realizada pelo “timer”. A superfície refletora será feita de papel alumínio colada à um papel cartão. Este, por sua vez, será moldado sobre a estrutura parabólica.



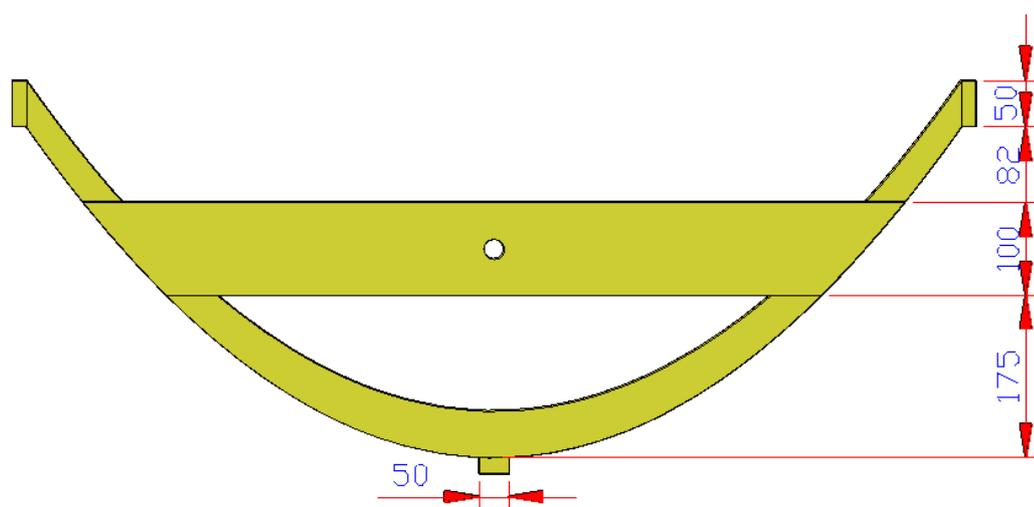
**Fig. 12. 3** – Concentrador de calha parabólica.

Neste arranjo seria impossível a calha parabólica ter uma rotação completa. Uma das mangueiras estaria sujeito a torção e a outra se enrolaria em volta do tubo conforme a evolução do movimento. Entretanto, o experimento será realizado no período de 3 a 4 horas permitindo que o movimento seja realizado adequadamente.

Segue abaixo as dimensões em milímetros da estrutura da calha e do suporte.



**Fig. 12. 4** – Dimensões da calha parabólica – vista superior.



**Fig. 12. 5** – Dimensões da calha parabólica – vista frontal.

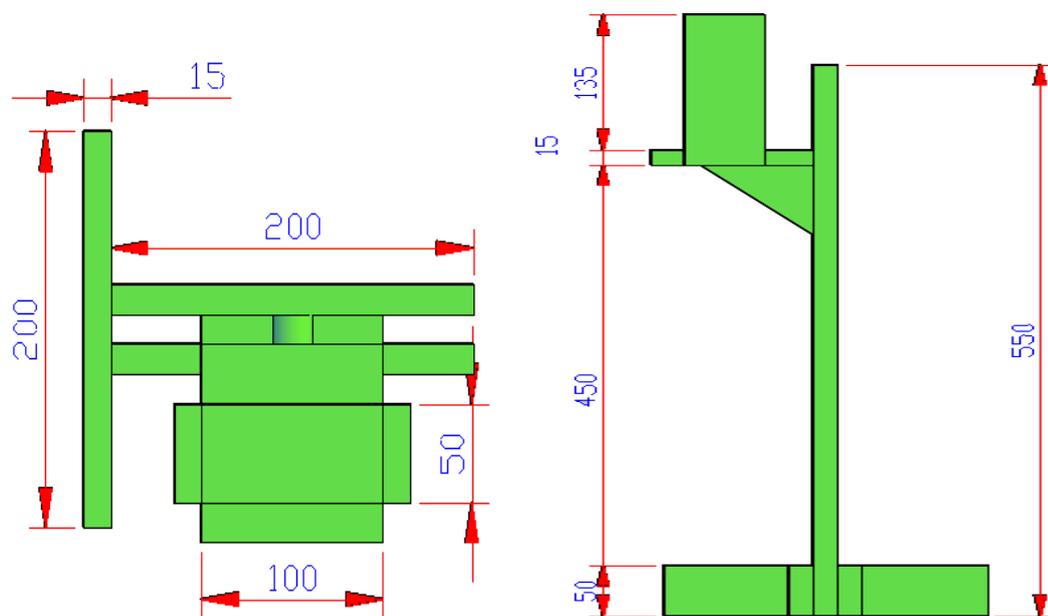


Fig. 12. 6 – Dimensões do suporte com timer.

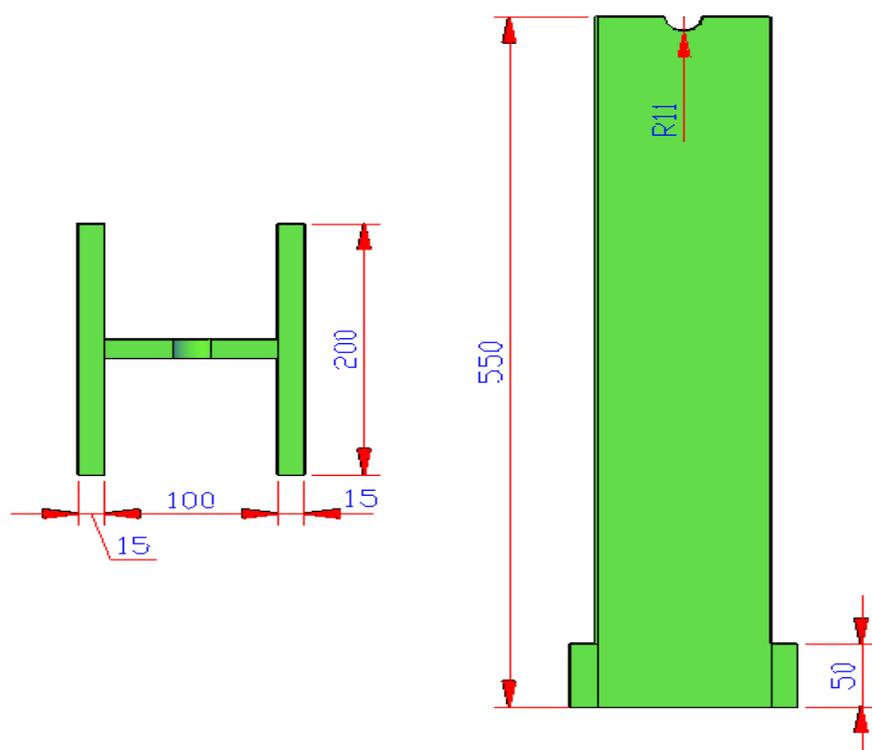


Fig. 12. 7 – Dimensões do suporte.

### 13. LISTA DE MATERIAIS

Os materiais usados na construção do protótipo foram escolhidos de forma a obter um baixo custo. Na verdade, como se refere a um protótipo, serve a idéia de se utilizar peças não comuns, mesmo que não sejam tão adequados para se trabalhar. Alguns componentes do concentrador como bomba, “timer”, mangueira e reservatório não serão comprados, pois serão utilizados equipamentos próprios. Optou-se também em utilizar materiais diferentes que se assemelham nas características dos materiais que comumente seriam usados. Por exemplo, ao invés de se utilizar uma placa fina de metal para a superfície refletora, utilizou-se papel alumínio. Outro exemplo interessante é a fabricação do tubo externo receptor com transparência xerográfica. Vale ressaltar que os materiais foram escolhidos no intuito de não comprometer a eficiência do concentrador.

Para os testes, será necessária a utilização de três termômetros, um colocado na entrada, o outro na saída do tubo e o último, no reservatório. Dois dos termômetros são equipamentos próprios usados em aquários. O outro, um termopar, será um instrumento emprestado pela Escola Politécnica. Além disso, para o cálculo da vazão, será usado um cronômetro e um vasilhame com medidas de volume. Segue abaixo uma tabela referente aos custos de materiais comprados para a construção do protótipo, totalizando R\$170,00. Materiais extras não foram inclusos na tabela.

Vale ressaltar que o custo refere-se apenas aos materiais comprados para a construção. Os cálculos de homem-hora da fabricação e dos experimentos bem como os custos adicionais de energia elétrica e água não foram calculados para obter-se o custo total da montagem do protótipo. Entretanto, para a realização da fabricação e da experiência foram gastos cerca de 25 horas de trabalho por pessoa. Dessa forma, é possível fazer uma estimativa do custo da mão-de-obra. Supondo que um engenheiro recém formado ganhe um salário mensal de R\$3.000,00, o que resulta em aproximadamente R\$20,00/h e como o trabalho foi realizado por duas pessoas, temos que o custo de mão-de-obra equivale a R\$1.000,00 hh.

**Tabela 3** – Custo dos componentes

<b>Itens comprados</b>	<b>Custo</b>
Tubo de cobre 22mm 2,5m	R\$ 38,40
Tinta preto fosco	R\$ 12,90
Madeira prensada (MDF) 15 mm 1,00x1,37m	R\$ 54,15
Parafuso madeira 3,2x25 20 unid.	R\$ 3,60
Transparência xerogr. 4 unid.	R\$ 4,00
Mangueira de nível	R\$ 11,95
Isolante térmico 3/4"	R\$ 2,80
Abraçadeira s/ fim 5/8x3/4 3 unid.	R\$ 3,63
Bucha de redução cobre 22x15mm	R\$ 3,05
Conector Tê de redução cobre 22mm	R\$ 12,20
Luva passante 22mm	R\$ 2,85
Cola Branca 500g	R\$ 5,50
Durepoxi	R\$ 2,45
Papel cartão 50x70mm 4 unid.	R\$ 1,88
Rolo de papel alumínio 45cmx7,50m	R\$ 5,99
Rolo de papel alumínio 30cmx7,50m	R\$ 4,24
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 169,59</b>

<b>Itens próprios</b>
Pote plástico para sorvete
Fita adesiva transparente
Timer
Bomba
Mangueiras
Caixa de isopor

## 14. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

As ferramentas utilizadas para a construção do protótipo foram:

- Furadeira com brocas de diferentes diâmetros;
- Tico-tico com diferentes tamanhos e finalidades de serra;
- Duas régua acrílicas de 30 cm;
- Uma régua plástica de 60 cm;
- Estilete;
- Chave de fenda;
- Lápis;
- Pincel;
- Lixa para madeira.
- Tesoura.



**Fig.14. 1** – Ferramentas utilizadas para construção do protótipo.

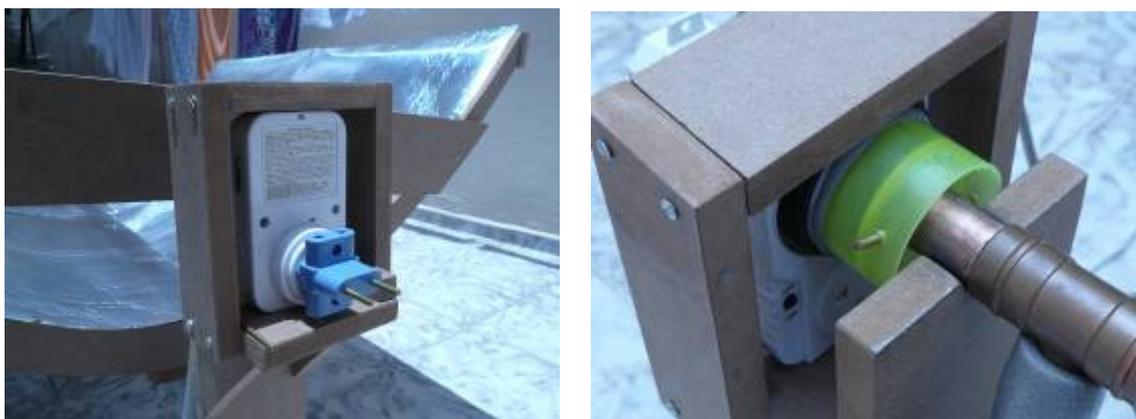
### 14.1. Suportes

Os dois suportes foram construídos em MDF e suas construções foram relativamente fáceis. Foi utilizado o tico-tico para cortes retos, régua para medições e parafusos como mecanismos de fixação. Um dos suportes tem sua estrutura bem simplificada, servindo apenas para sustentar um dos lados do tubo de cobre. Já o outro, apresenta uma base reforçada, pois, é neste suporte que será fixado o “timer” que gerará o torque necessário para a calha girar.



**Fig.14. 2** – Suportes.

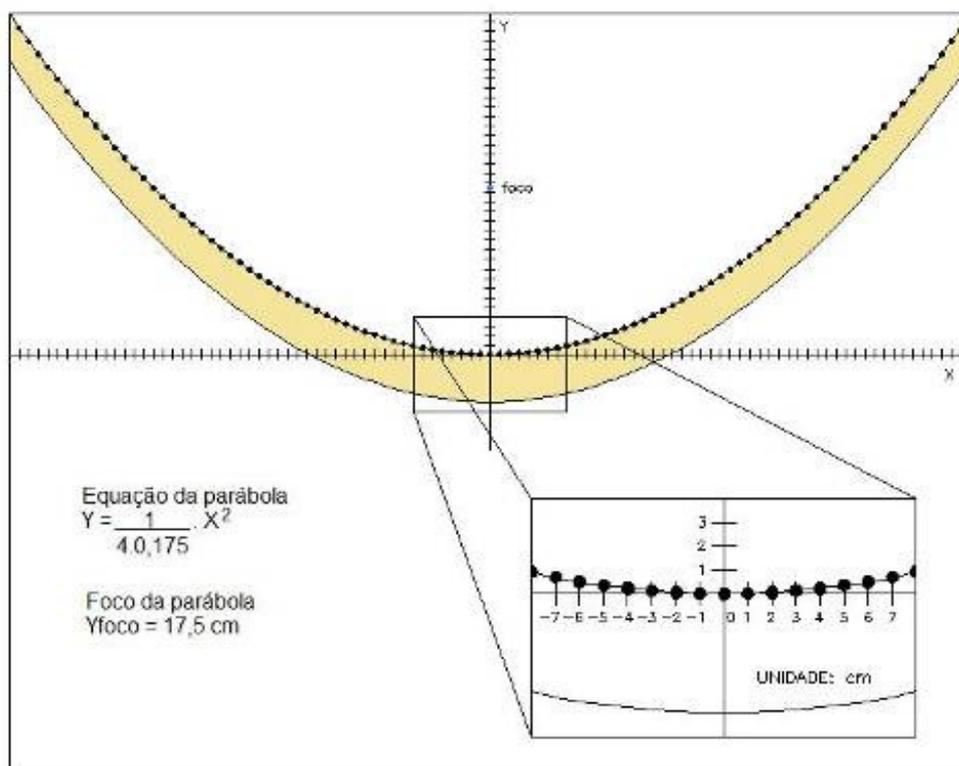
Uma adaptação mostrou-se necessária ao suporte do “timer”. Isso porque, um teste preliminar da rotação da calha parabólica foi feito e verificou-se que o “timer”, devido ao grande torque exigido pela estrutura, se deslocava diagonalmente, o que prejudicaria a simulação. Para resolver esse problema foi construído um caixa com dimensões para um encaixe vertical perfeito do “timer”, conforme pode ser visto na **Fig.14.3**.



**Fig.14. 3** – Detalhe da caixa do “timer”.

## **14.2. Estrutura do perfil parabólico**

Para a construção do perfil parabólico, utilizou-se madeira prensada (MDF) de 15 mm de espessura. Uma opção de gabarito para corte seria a plotagem de um desenho em escala 1:1 da parábola calculada. Entretanto, optou-se em fazer pontos medidos pela régua, conforme **Fig. 14.1**. Essa alternativa foi adotada porque ao se imprimir um desenho, mesmo que na escala 1:1, ele pode sair distorcido e prejudicar os testes do concentrador. Abaixo segue a figura do esquema realizado para traçar o perfil parabólico, em que no eixo das abscissas e das ordenadas foi feita uma escala de um em um cm. Com isso, foi possível marcar pontos correspondentes à parábola.



**Fig.14. 4** – Esquema para tracejar a linha da parábola sobre o MDF.



**Fig.14. 5** – MDF cortado em formato parabólico.

Realizou-se o corte com serra tico-tico para um perfil. Com isso, foi possível fazer os cortes dos outros dois perfis aproveitando os cortes realizados anteriormente. Para esta etapa, foi utilizada uma serra de tico-tico própria para cortes curvos. Houve uma grande dificuldade em fazer o corte bem rente à linha parabólica. Assim, foi feito um corte excedendo um pouco o material e depois, com uma lixa, desgastou-se a superfície até atingir o perfil desejado. Mesmo tomando os cuidados necessários, o perfil apresentou pequenas imperfeições que poderá comprometer o rendimento do concentrador.



**Fig.14. 6** – Detalhe de corte do MDF em formato parabólico.



**Fig.14. 7** – Acabamento das partes construídas em MDF utilizando uma lixa.



**Fig.14. 8** – Estrutura da calha parabólica sobre os suportes e com o tubo ajustado.

### **14.3. Montagem da superfície refletora**

Para montar a superfície refletora foi utilizado papel alumínio colado em papel cartão. Primeiramente, realizamos testes de colagem para pequenos pedaços de alumínio para visualizar a qualidade da superfície e aperfeiçoar a colagem. Conforme **Fig. 14.6**, pode visualizar-se que o jeito que se cola o papel alumínio faz uma grande diferença na qualidade da superfície.



**Fig.14. 9** – Testes de colagem da superfície refletora.

A figura à esquerda mostra uma das amostras em que o procedimento de colagem, primeiro, foi de espalhar cola por cima do papel cartão e em seguida sobrepor a folha de alumínio. Percebem-se deformações e bolhas causadas durante esse procedimento. A figura à direita ilustra uma amostra mais bem sucedida. A idéia é exatamente contrária à apresentada pela colagem da figura esquerda. Primeiro, espalhou-se cola sobre a folha de alumínio com uma esponja e em seguida foi colocado o papel cartão por cima resultando em uma superfície mais lisa e com poucas bolhas. Após testes, prosseguiu-se com a construção das superfícies refletoras necessárias para o projeto. Como o papel cartão possui um formato menor que a área do perfil parabólico, necessitou-se fazer a montagem de quatro superfícies refletoras para garantir a área do perfil.



**Fig.14. 10** – Superfícies refletoras.

As placas refletoras foram montadas no dia do experimento. A fixação delas no suporte do perfil parabólico foi feita com tachinhas de metal.



**Fig.14. 11** – Superfícies refletoras sobre a estrutura.

## 14.4. Tubos

### 14.4.1. Tubo Receptor Interno

O tubo interno receptor é feito de cobre e possui um diâmetro de 22 mm. É um material apropriado em transportar fluidos de temperatura mais elevados. Para melhorar a absorvidade da radiação solar na superfície do material optou-se por pintar o tubo com uma tinta de esmalte sintética fosca e preta. O tubo de cobre será o responsável pela sustentação de toda a estrutura da calha, assim seu ajuste com o buraco na madeira acoplado à estrutura da calha será forçado. O material de cobre é suficientemente resistente para resistir a flexões que seriam causadas pelo peso da estrutura.



**Fig.14. 12** – Tubo de cobre de 22 mm de diâmetro.



**Fig.14. 13** – Pintura do tubo interno receptor

#### **14.4.2. Tubo Receptor Externo**

O tubo receptor externo é feito de papel transparência justaposta. Para a fixação do papel em torno do tubo interno, utilizaram-se anéis de material plástico cortados de potes de sorvetes convencionais. As transparências foram colocadas com o mínimo de sobreposição entre elas, para que não atrapalhasse a função de tubo receptor com uma região mais espessa.



**Fig.14. 14** – Anéis plásticos para apoio das transparências.



**Fig.14. 15** – Tubo externo.

## 14.5. Acessórios

### 14.5.1. Conectores e mangueiras

Os conectores do tubo interno de cobre são do mesmo material. Para o projeto foram utilizados: uma conexão em TE de redução de 22 mm para 15 mm, uma redução concêntrica de 22 mm para 15 mm e uma luva passante de 22 mm para acoplar o tubo à redução. A vedação foi realizada com durepoxi devido ao preço reduzido e facilidade de manuseio, embora não recomendado para tal finalidade, principalmente a altas temperaturas.

De um lado do TE será conectado o tubo receptor interno. Do lado oposto, será utilizado um pequeno pedaço do próprio tubo de cobre apenas para sustentar e apoiar a estrutura sobre o suporte e fazer o acoplamento da estrutura com o timer, conforme mostra **Fig. 14.15**. Na saída perpendicular reduzida, para melhor fixação e vedação, será conectado uma das mangueiras com ajuste forçado e abraçadeira. Na parte interna da conexão, entre o TE e o pequeno pedaço de tubo de cobre, foi utilizado durepoxi. Isso

porque, não passará água por essa saída. Ela possui função apenas de sustentar e acoplar o timer à estrutura

A redução será utilizada do outro lado do tubo interno receptor para conectar a outra parte da mangueira, em que o ajuste será forçado e reforçado com durepoxi. A luva passante tem a função de acoplar o tubo à redução.

As mangueiras serão isoladas com espumas apropriadas para isolamento de tubos quentes. A idéia é isolar ao máximo todo o sistema para que não haja interferência na coleta dos resultados finais. O aquecimento deve ocorrer apenas na parte em que o tubo recebe irradiação pela superfície refletora.



**Fig.14. 16** – TE de redução com vedação de durepoxi.



**Fig.14. 17** – Bucha de redução e luva passante com vedação de durepoxi.



**Fig.14. 18** – Mangueira com isolante térmico.

### 14.5.2. Bomba

A bomba utilizada para o projeto deve apresentar uma vazão bem baixa. Assim será utilizada na experiência uma bomba própria para uso em aquários de peixes ornamentais com vazão regulável entre 90 L/h a 180 L/h. A vazão será regulada para a mínima e depois será medida com um cronômetro e vasilhame com escala de nível. Assim considerando certa densidade da água será possível obter a vazão mássica da água. As perdas de carga na tubulação, conexões e mangueiras serão relativamente altas e a vazão real da água deve reduzir significativamente. Embora não seja recomendado para trabalhar a altas temperaturas, a utilização dessa bomba será feita já que o mesmo se encontrava em pertence de um dos integrantes e estava inutilizado.



**Fig.14. 19** – Bomba de aquário.

### 14.5.3. Reservatório

Para o reservatório será utilizada uma caixa de isopor, conforme figura ilustrada mais a baixo. Mais um dos acessórios que não foi necessário fazer a compra. Esse material é bem apropriado para o experimento, pois o isopor age como um bom isolante, e reduzirá as perdas de calor da água aquecida para o meio ambiente.



**Fig.14. 20** – Reservatório de isopor.

### 14.5.4. Termômetros

Serão utilizados dois termômetros para monitorar a entrada e a saída da água, sendo um de mercúrio e o outro digital. Esses instrumentos são também de uso para aquários ornamentais, por isso as faixas de medição não são tão amplas sendo que o de mercúrio mede no máximo a temperatura de 50°C. Um terceiro termopar, emprestado pela Escola Politécnica da USP, será colocado dentro do reservatório e esse será o de maior importância para os dados finais e cálculo do rendimento. Por isso deverá apresentar uma faixa maior de medição e precisão de temperatura.

O termômetro de mercúrio foi inserido dentro de um pequeno reservatório transparente acoplado à mangueira, conforme mostra a **Fig. 14.21**. Essa montagem foi feita para que a visualização da medida seja facilitada e também, para que não haja a necessidade de abrir um buraco na mangueira para a medição da temperatura com o termômetro.



**Fig.14. 21** – Termômetro de mercúrio para medição da água de entrada.



**Fig.14. 22** – Termômetro digital para medição da saída de água.

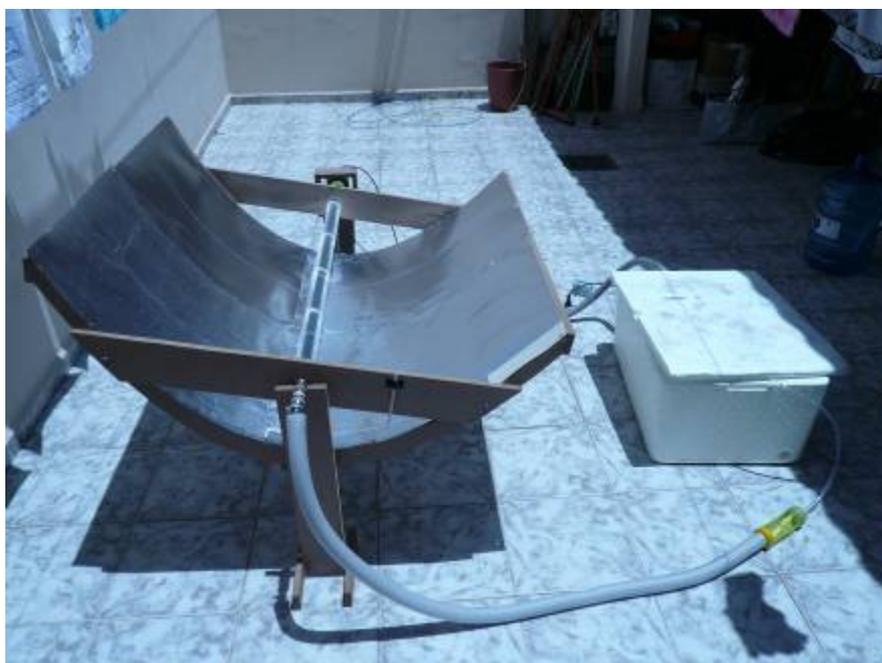


**Fig.14. 23** – Termopar para medição da temperatura do reservatório.

Segue abaixo, a figura do protótipo de concentrador de calha parabólica completo.



**Fig.14. 24 – Protótipo montado.**



**Fig.14. 25 – Vista lateral do protótipo completo.**

## 15. APLICAÇÕES

Os grandes sistemas de energia solar para aquecimento de água podem ser usados numa grande variedade de edifícios, que têm uma necessidade correspondente de água quente ou uma necessidade de aquecimento durante todo o ano, conforme mostra a tabela abaixo.

**Tabela 15. 1** – Potenciais utilizadores de aquecedores solares

Hospitais	Cabeleireiros
Lares de terceira idade	Ginásios
Complexos turísticos	Lavandarias
Parques de campismo	Padarias
Alojamento de estudantes	Hotéis
Apartamentos	Complexos esportivos
Escolas	Piscinas internas
Quartéis	Aquecimento de pavimento em estábulos
Edifícios de escritórios	Sistemas de lavagem de caminhões
Lavagem de carros	Agricultura
Indústrias	Frigorífico

Vamos enfatizar aplicações do concentrador de calha parabólica em processos industriais, de fabricação e de beneficiamento, onde o vapor gerado é empregado.

- Indústria de bebidas e conexos: nas lavadoras de garrafas, tanques de xarope, pasteurizadoras.
- Indústrias madeireiras: no cozimento de toras, secagem de tábuas ou lâminas em estufas, em prensas para compensados.
- Indústria de papel e celulose: no cozimento de madeira nos digestores, na secagem com cilindros rotativos, na secagem de cola, na fabricação de papelão corrugado.
- Curtumes: no aquecimento de tanques de água, secagem de couros, estufas, prensas e prensas a vácuo.

- Indústrias de laticínios: na pasteurização, na esterilização de recipientes, na fabricação de creme de leite, no aquecimento de tanques de água, na produção de queijos, iogurtes e requeijões (fermentação).
- Frigoríficos: nas estufas para cozimento, nos digestores, nas prensas para extração de óleo.
- Indústria de doces em geral: no aquecimento do tanque de glicose, no cozimento de massa em panelas sob pressão, em mesas para o preparo de massa, em estufas.
- Indústria de vulcanização e recauchutagem: na vulcanização, nas prensas.
- Indústrias químicas: nas autoclaves, nos tanques de armazenamento, nos reatores, nos vasos de pressão, nos trocadores de calor.
- Indústria têxtil: utiliza vapor no aquecimento de grandes quantidades de água para alvejar e tingir tecidos, bem como para realizar a secagem em estufas.
- Indústria de petróleo e seus derivados: nos refeedores, nos trocadores de calor, nas torres de fracionamento e destilação, nos fornos, nos vasos de pressão, nos reatores e turbinas.
- Indústria metalúrgica: nos banhos químicos, na secagem e pintura.

## **16. EXPERIMENTO DO PROTÓTIPO**

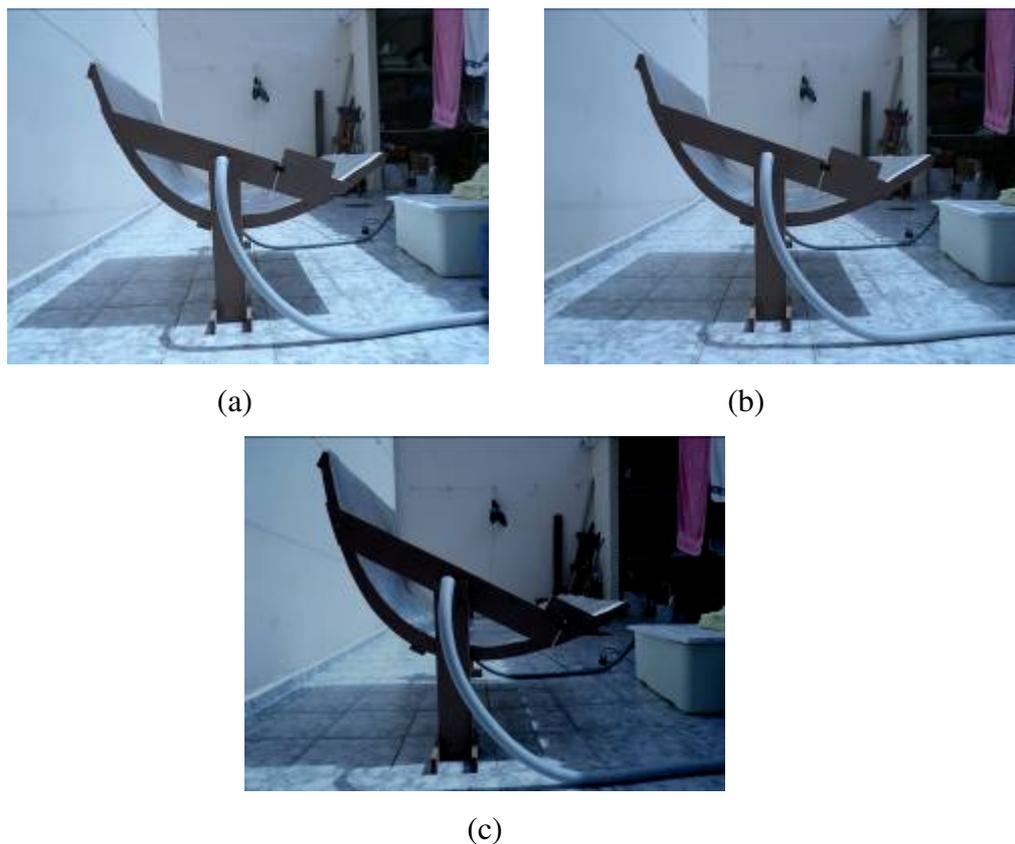
Os cálculos dos rendimentos para os dois experimentos foram feitos descontando a parcela de energia gerada pela bomba e pelo timer, que eram alimentados pela rede elétrica. O mais importante para o projeto é analisar apenas o comportamento do concentrador. O intuito dos cálculos é de se obter uma ordem de grandeza relacionada ao rendimento de um protótipo de concentrador solar caseiro. Isso porque, o termômetro de mercúrio apresentava dificuldade em uma leitura precisa de sua temperatura e ainda os locais de onde foram tomadas as medidas das temperaturas no reservatório poderiam não estar apropriadas, resultando em um rendimento que pode não representar o seu valor real.

### **16.1. Primeiro experimento**

A primeira experiência real do protótipo foi realizada no dia 18/11/07, em um dia ensolarado, mas com presença de algumas nuvens que se intensificaram ao longo do experimento impedindo o prosseguimento do mesmo por mais tempo.



**Fig. 16.1** – Protótipo de concentrador parabólico de foco linear em experimento.



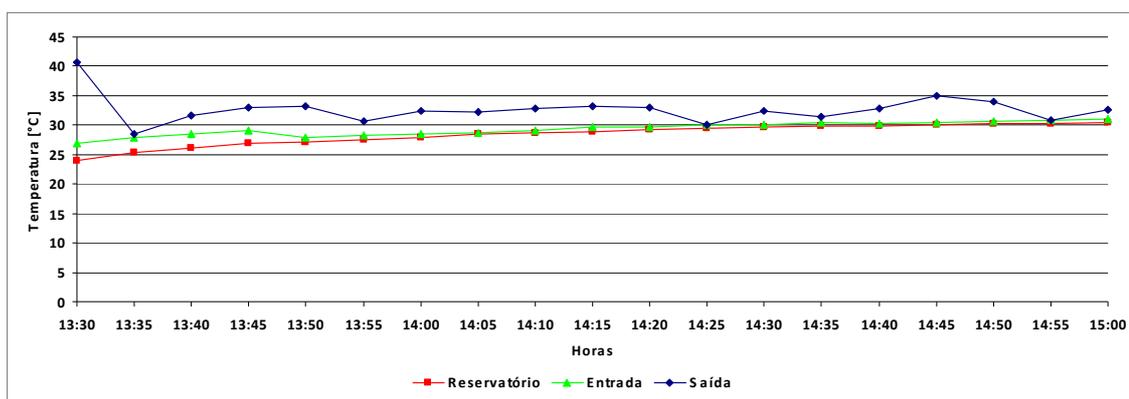
**Fig. 16.2** – Visualização do movimento do protótipo durante o intervalo de experimento. (a) estágio inicial. (b) estágio intermediário. (c) estágio final.

O teste foi realizado no período de 1 hora e meia, começando às 13h30min e terminando às 15h00min. As tomadas de medidas das temperaturas foram feitas no intervalo de 5 minutos. A primeira medida representa a temperatura de entrada da água no tubo receptor. A segunda corresponde a da saída e a terceira, a da entrada. Abaixo segue os resultados obtidos em °C.

**Tabela 16. 1** – Temperaturas da água medidas no experimento

	Reservatório	Saída	Entrada
13:30	29,0	40,7	27,0
13:35	30,3	28,5	28,0
13:40	31,2	31,7	28,5
13:45	31,9	33,0	29,0
13:50	32,2	33,3	28,0
13:55	32,6	30,7	28,2
14:00	33,0	32,5	28,4
14:05	33,4	32,3	28,6
14:10	33,7	32,8	29,1
14:15	33,9	33,3	29,6
14:20	34,2	33,0	29,7
14:25	34,5	30,1	30,0
14:30	34,6	32,5	30,1
14:35	34,8	31,5	30,4
14:40	34,9	32,9	30,2
14:45	35,1	35,0	30,5
14:50	35,3	33,9	30,6
14:55	35,3	30,9	30,9
15:00	35,4	32,7	31

A seguir é mostrado o gráfico obtido com os resultados das temperaturas ao longo do tempo. Observa-se que existem quedas de temperatura em alguns pontos. Isso se deve a passagem de nuvem no momento, interferindo no resultado. Outro ponto que vale ressaltar são as primeiras medidas da temperatura de saída da água que possuem uma variação de temperatura muito alta. Isso porque, ao preparar os equipamentos de medição para o experimento, deixou-se a calha parabólica no Sol, esquentando a água no tubo interno. Ao se fazer a primeira medida da temperatura de saída, mediu-se a temperatura dessa água aquecida.



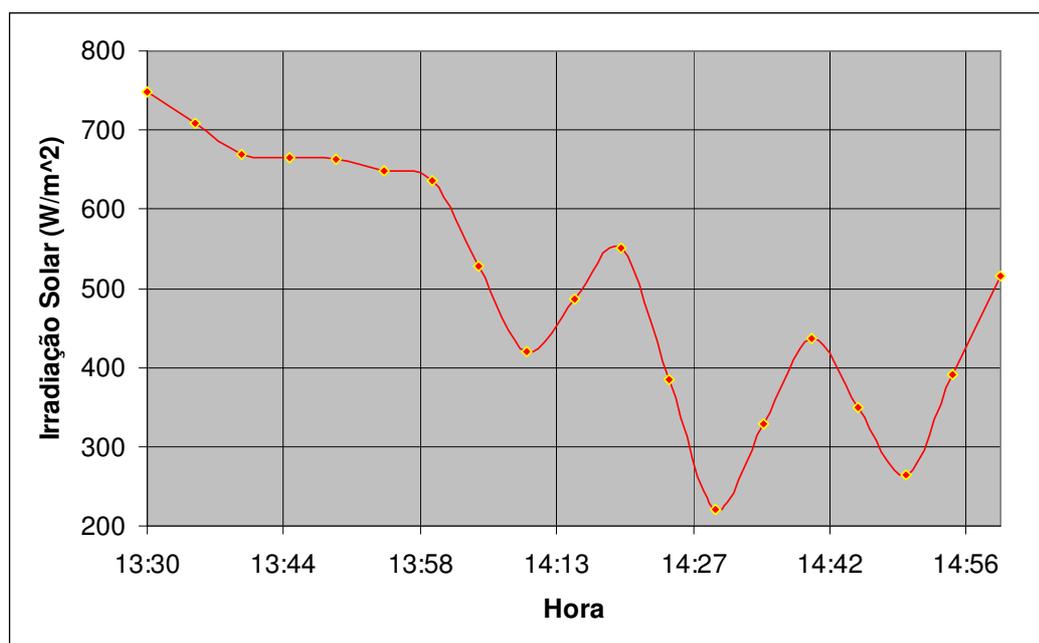
**Fig. 16. 3** – Gráfico das temperaturas da água no reservatório, na entrada e na saída do tubo ao longo do tempo.

Para o cálculo do rendimento, foram utilizadas as eqs. (10.28) e (10.29). A vazão da água, de aproximadamente 0,0022 L/s, foi obtida através de um vasilhame com medida de volume e um relógio. Adotando a densidade da água como sendo 1 kg/L, podemos assumir o mesmo valor em sua vazão mássica.

Os dados da irradiação solar incidente foram fornecidos pelo Laboratório de Automação Agrícola do Departamento de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da USP. As tomadas de medição da irradiação solar feita pelo laboratório são realizadas a cada 10 minutos. Abaixo seguem os valores da irradiação solar no intervalo do tempo em que o experimento foi realizado.

**Tabela 16. 2** – Irradiação Solar do dia 18/11/07.

Hora	12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50	14:00	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50	15:00
Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )	701	407	916	837	578	636	749	669	662	635	421	550	221	436	264	516



**Fig. 16. 4** – Gráfico da irradiação Solar do dia 18/11/07.

O grande problema na ocorrência de nuvens é que as penumbras ocorrem de formas irregulares entre dois locais diferentes. A estação em que os dados foram obtidos e o local onde foi realizado o experimento estão distantes de aproximadamente 20 km. Ou seja, os valores da irradiação que serão utilizados para o cálculo podem não representar exatamente o que realmente incidiu no local do experimento. Mesmo assim eles serão utilizados para se ter uma base dos valores reais da irradiação frente à presença de nuvens.

**Tabela 16. 3** – Valores dos parâmetros utilizados

	Valor	Unidade
Massa de água	20	kg
Calor específico	4180	J/kg.°C
Área projetada	1	m <sup>2</sup>
Vazão mássica	0,0022	kg/s

Para o primeiro método, o rendimento obtido utilizando a eq.(10.28) para a experiência foi de 4,35%. Para cada tomada de valor foi feito o cálculo do rendimento e por fim foi feita uma média obtendo-se tal valor, conforme mostra a tabela 16.4. O resultado mostrou-se bem impreciso, já que a equação utiliza a variação da temperatura da água de entrada e saída do tubo. Como o dia teve a presença de muitas nuvens, quando uma tomada de temperatura era feita, a nuvem não demorava a interferir na temperatura de saída da água. Dessa forma, o mais adequado seria fazer uma tomada de temperatura em um intervalo de tempo bem menor, por exemplo, de um em um segundo e sem contar com a presença de nuvens.

Para o segundo método, o rendimento calculado pela eq.(10.29) foi de 14,45%. Percebe-se uma grande diferença nos valores entre os dois resultados. Porém, este último método, que relaciona o quanto de energia que a água do reservatório absorveu com o quanto que o Sol dispunha na área projetada, oferece um resultado mais confiável e preciso. Isso porque, a presença de nuvens não interferiu instantaneamente na temperatura do reservatório. Novamente o rendimento foi calculado para cada tomada de medida, desconsiderando as três primeiras medições e assim foi feita uma média dos resultados, conforme mostra a tabela 16.4. Na realidade, para este último método de cálculo de rendimento, seria suficiente a tomada de medição apenas da temperatura inicial e final do reservatório em um determinado intervalo de tempo.

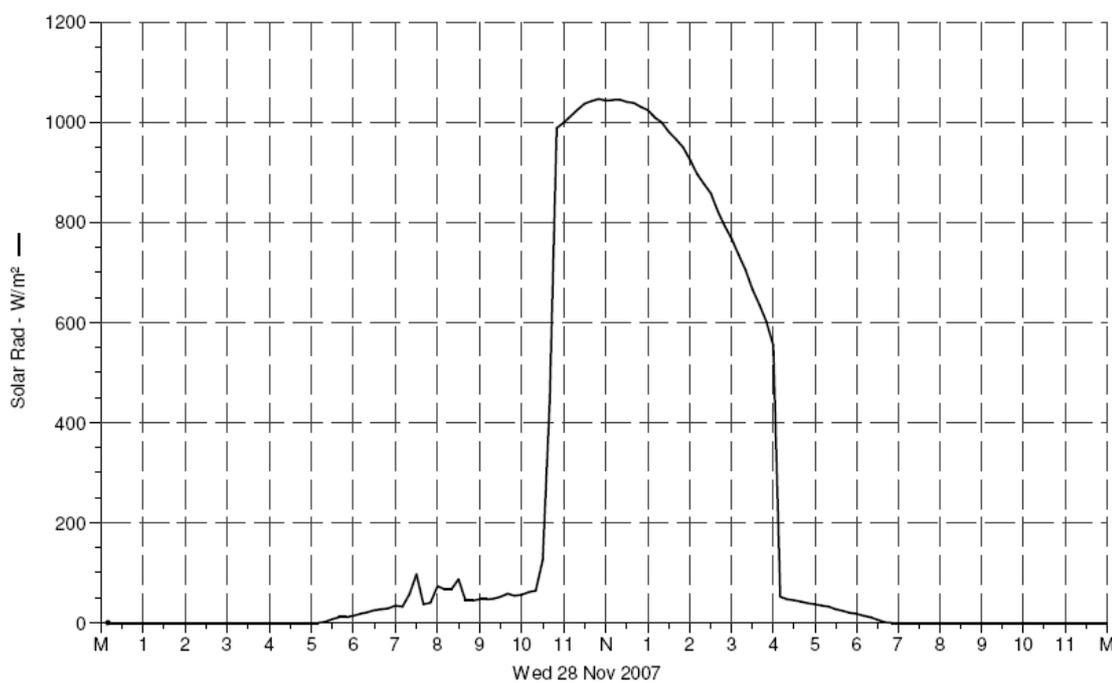
**Tabela 16.4** – Cálculo dos rendimentos.

Horas	Temperatura (°C)			Rendimento (%)		Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )	Média da radiação
	Saída	Entrada	Reservatório	1º método	2º método		
13:30	40,7	27,0	29,0	-	-	749	0,00
13:35	28,5	28,0	30,3	-	-	709	729,00
13:40	31,7	28,5	31,2	-	-	669	709,00
13:45	33,0	29,0	31,9	5,27	0,00	665,5	698,13
13:50	33,3	28,0	32,2	7,05	12,10	662	690,90
13:55	30,7	28,2	32,6	3,36	14,26	648,5	683,83
14:00	32,5	28,4	33,0	5,57	15,10	635	676,86
14:05	32,3	28,6	33,4	5,17	15,88	528	658,25
14:10	32,8	29,1	33,7	5,38	15,88	421	631,89
14:15	33,3	29,6	33,9	5,51	15,05	485,5	617,25
14:20	33,0	29,7	34,2	4,97	14,98	550	611,14
14:25	30,1	30,0	34,5	0,16	15,29	385,5	592,33
14:30	32,5	30,1	34,6	3,91	14,83	221	563,77
14:35	31,5	30,4	34,8	1,85	14,77	328,5	546,96
14:40	32,9	30,2	34,9	4,60	14,09	436	539,57
14:45	35,0	30,5	35,1	7,84	14,08	350	527,72
14:50	33,9	30,6	35,3	5,92	14,23	264	512,21
14:55	30,9	30,9	35,3	0,00	13,39	390	505,42
15:00	32,7	31	35,4	3,09	12,85	516	505,97
				4,35	14,45		

Os três primeiros valores de temperatura foram desconsiderados a grande variação de temperatura, conforme citado anteriormente. Assim os cálculos foram realizados como se o experimento tivesse início às 13:45 hs.

## 16.2. Segundo experimento

O segundo experimento foi realizado em 28/11/07, dia bem propício ao teste, com presença apenas do Sol, durante um período de 3 horas. Essa experiência foi efetuada já que o primeiro experimento se deu em dia com ocorrência de muitas nuvens. Entretanto, alguns problemas decorrentes do primeiro experimento foram prejudiciais à segunda execução. O primeiro, deve-se à danificação das superfícies refletoras, ocorrida após o término do primeiro experimento. Devido ao ocorrido, o rendimento final do concentrador pode ter seu rendimento comprometido. O segundo problema encontrado foi em relação ao dispositivo de rastreamento solar. O “timer” foi danificado após o primeiro ensaio, pois o torque foi excedido quando a estrutura estava inclinada. Por causa disso o rastreamento foi feito manualmente.

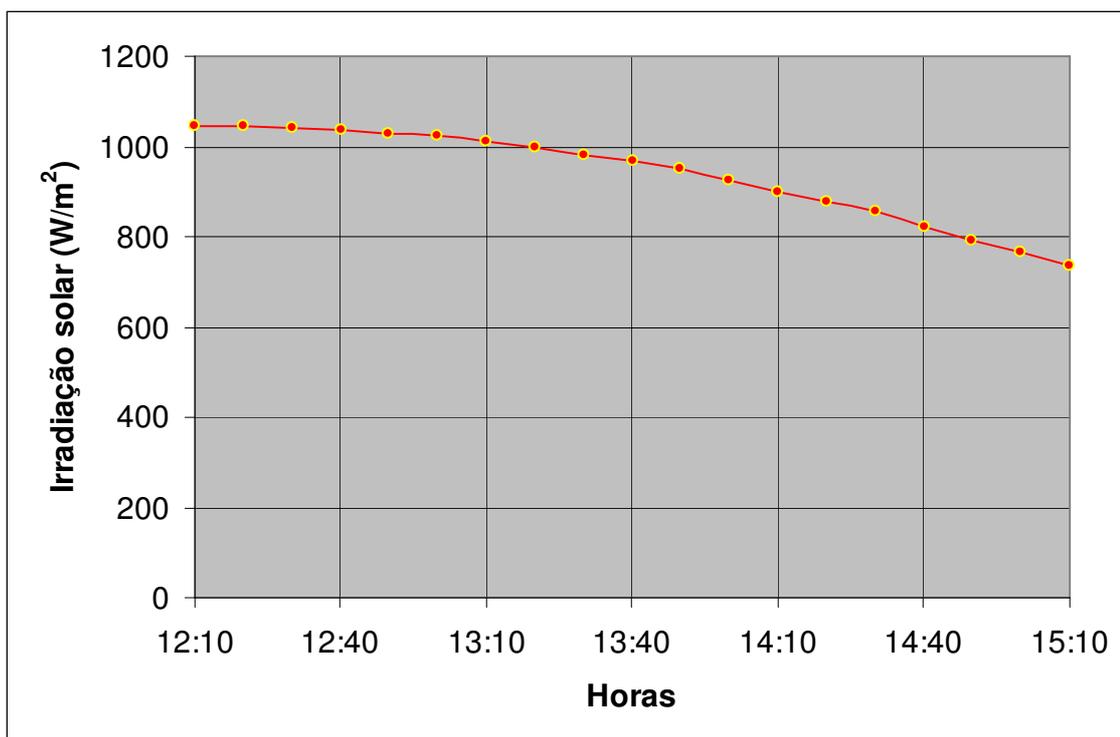


**Fig. 16.5** – Gráfico da irradiância Solar do dia 28/11/07.

**Tabela 16.5** – Valores da Irradiação Solar no período do experimento.

Hora	12:10	12:20	12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50	14:00	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50	15:00	15:10
Irradiação solar ( $W/m^2$ )	1044	1045	1040	1038	1030	1024	1009	999	980	966	950	925	897	877	858	822	793	767	735

Como o tempo estava limpo em toda a cidade esses valores representam bem a incidência da radiação solar no local do experimento.



**Fig. 16. 6** – Gráfico da irradiação Solar do dia 28/11/07 durante o experimento.

Foram utilizados dois termômetros, um digital e o outro de mercúrio, para medir a mesma temperatura da água no reservatório e com intuito apenas de comparação das medidas. Os termômetros usados foram os mesmo do primeiro experimento. As tomadas de medição eram feitas no intervalo de 10 min. No começo do experimento, os dois termômetros apresentavam pouca diferença nos valores coletados. Porém, conforme a temperatura da água ia aumentando ao longo do experimento, começou a ter uma defasagem das temperaturas chegando a 1,7°C de diferença. O problema pode estar relacionado ao posicionamento dos dois termômetros, onde os mesmos se encontravam em lados opostos dentro do reservatório ou pode estar vinculado ao fato da água não atingir uma temperatura homogênea em todo reservatório. O termômetro que registrou temperaturas maiores estava mais próximo de onde era descarregada a água de saída do tubo.

Tabela 16.6 – Valores da temperatura da água no reservatório

Hora	Temperatura da água no reservatório (°C)	
	Termômetro Digital	Termômetro de mercúrio
12:10	21,9	22,2
12:20	23,5	23,8
12:30	25,1	25,3
12:40	26,3	26,7
12:50	27,5	28,0
13:00	28,8	29,4
13:10	30,0	30,9
13:20	31,3	32,0
13:30	32,5	33,7
13:40	33,8	35,0
13:50	34,9	35,9
14:00	36,2	37,1
14:10	37,3	38,5
14:20	38,3	39,8
14:30	39,3	40,9
14:40	40,3	41,8
14:50	41,1	42,8
15:00	41,5	43,2
15:10	42,2	43,9

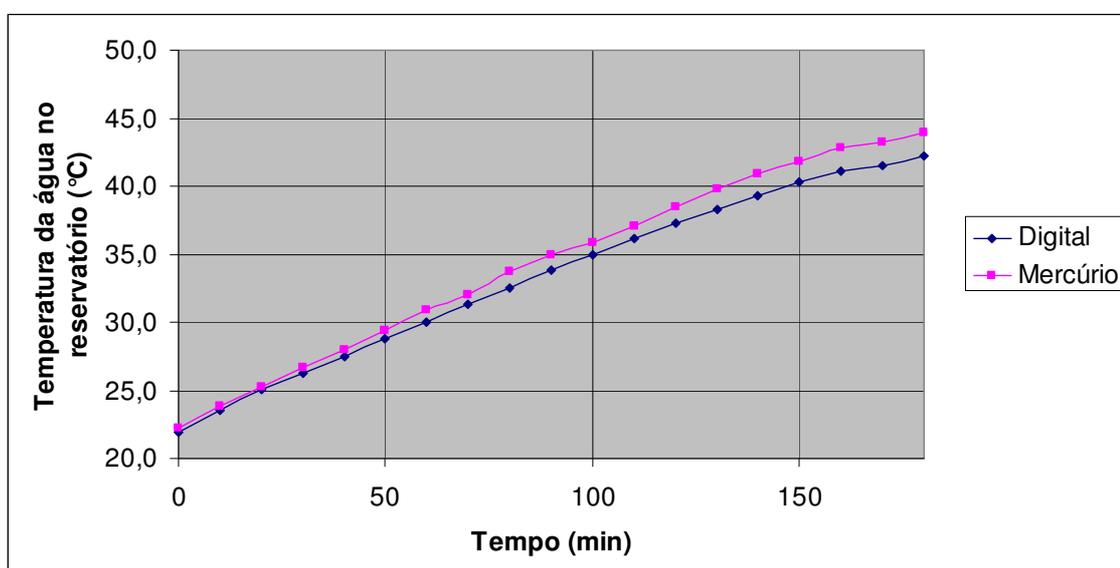


Fig. 16.7 – Gráfico da temperatura da água no reservatório ao longo do experimento medida pelos dois termômetros.

O rendimento calculado pela eq.(10.29) foi de aproximadamente 19%. Para isso, foram feitos os cálculos para cada tomada de medida e para cada tipo de termômetro e assim foi feita uma média dos resultados, conforme mostra a tabela 16.7. Os valores dos parâmetros utilizados para fins de cálculo foram os mesmos apresentados pela tab.16.3 sendo desnecessário a utilização da vazão mássica.

**Tabela 16. 7** – Valores da temperatura da água no reservatório

Hora	Rendimento (%)		Irradiação solar (W/m <sup>2</sup> )	Média da radiação
	Termômetro Digital	Termômetro de mercúrio		
12:10	0,00	0,00	1044	0,00
12:20	21,34	21,34	1045	1044,50
12:30	21,37	20,71	1040	1043,00
12:40	19,62	20,06	1038	1041,75
12:50	18,77	19,44	1030	1039,40
13:00	18,54	19,35	1024	1036,83
13:10	18,21	19,56	1009	1032,86
13:20	18,19	18,96	999	1028,63
13:30	18,04	19,57	980	1023,22
13:40	18,11	19,48	966	1017,50
13:50	17,91	18,87	950	1011,36
14:00	18,04	18,80	925	1004,17
14:10	17,95	19,00	897	995,92
14:20	17,80	19,10	877	987,43
14:30	17,69	19,01	858	978,80
14:40	20,35	21,67	822	840,00
14:50	17,44	18,71	793	958,65
15:00	16,95	18,16	767	948,00
15:10	16,77	17,93	735	936,79
Média	18,51	19,43	936,79	
	18,97			

## 17. CONCLUSÃO

Para a simulação teórica do coletor parabólico de foco linear foi considerado um modelo quase ideal, a única perda que acontece deve-se à reflexão da radiação incidente sobre a superfície externa do tubo receptor. Mesmo assim, para uma tinta preta a qual será utilizada no projeto, a absorvidade é alta, aproximadamente 0,85, ou seja, grande parte da radiação incidente sobre a área projetada será absorvida pela água. A outra simulação realizada foi da temperatura final da água aquecida no reservatório em função de diferentes tempos de execução do experimento e das quantidades do fluido utilizado.

A segunda etapa do projeto consistiu basicamente na construção do protótipo. De acordo com o dimensionamento preliminar feito no primeiro semestre, não foi necessária nenhuma modificação. Assim, foi possível prosseguir o projeto com a construção do protótipo. A estrutura da calha parabólica e os suportes foram feitas de madeira MDF e a superfície refletora, de folha de papel alumínio colado em papel cartão. O tubo interno é de cobre e o externo é feito com papel transparência suportado por anéis de plástico no tubo interno. O custo referente apenas ao material comprado para montagem do protótipo foi de R\$170,00.

Nesta etapa pode-se perceber a grande importância na construção de qualquer tipo de equipamento, isso porque, dificuldades foram encontradas na hora do corte do perfil parabólico e na colagem da folha de alumínio no papel cartão. Durante a execução do corte com o tico tico, a maior dificuldade foi não ter precisão suficiente para efetuar o corte exatamente sobre a linha desenhada. Em relação à folha de alumínio, o grande problema foi a sensibilidade que a mesma apresentava, já que qualquer movimento descuidado durante a colagem no papel cartão acarretava na deformação da superfície da folha.

Após o término da construção, o próximo passo foi a experiência real do concentrador. Foram feitas dois experimentos, o primeiro com presença de nuvens e o segundo com apenas a presença do Sol.

O rendimento do primeiro experimento foi de aproximadamente 14%. O rendimento do segundo foi de aproximadamente 19%.

O resultado do baixo rendimento das duas simulações se deve a inúmeros fatores. Uma delas corresponde à superfície refletora que durante a presença de Sol, enrugou-se pelo aquecimento durante o primeiro experimento, dispersando parte da radiação refletida. Isso provavelmente comprometeu os resultados do segundo experimento. Além disso, a mesma superfície não refletia alguns raios devido à imperfeição da estrutura parabólica. Outro fator se refere à utilização da folha de transparência, cuja função é amenizar as perdas por convecção do tubo de cobre. A transparência utilizada apresentava refletividade significativamente alta e assim não transmitia tão bem a radiação que incidia sobre ela.

Em relação ao procedimento do experimento, fatores como a precisão dos termômetros e a realização das tomadas de temperaturas tiveram grande influência nos resultados finais. O termômetro de mercúrio, que a princípio tem a melhor precisão, não apresentava uma escala precisa, dificultando a leitura do mesmo. Além disso, o termômetro digital que se apresentava na saída não estava calibrado.

O sistema de rastreamento solar teve uma funcionalidade quase perfeita no primeiro experimento. Houve pequenos atrasos na rotação da estrutura que eram corrigidos durante o experimento, através de um canudo colado perpendicularmente ao tubo. Com a sombra do canudo, era possível deixar o concentrador paralelo aos raios solares. Com relação ao dispositivo, provavelmente a estrutura, o mancal e o desbalanceamento da calha fizeram exceder um pouco o limite de torque do timer que se danificou no final do primeiro experimento. Com isso o segundo experimento foi realizado com rastreamento manual. Se a estrutura inteira tivesse sido balanceada com contra pesos o problema do torque excessivo poderia ter sido evitado.

Atualmente, nos projetos, preza-se a melhoria do rendimento e a redução de custos. No projeto apresentado, a prioridade foi reduzir ao máximo os custos, sendo o valor do rendimento, apenas uma consequência do trabalho. Além disso, o intuito de se calcular o rendimento do protótipo foi de se obter uma ordem de grandeza relacionada ao concentrador parabólico. Porém, um resultado baixo no rendimento não era esperado. Isso ocorreu devido a vários fatores e justamente a prioridade de baixar o custo dos

materiais foi um deles. A utilização da folha de alumínio e do papel de transparência foi uma idéia interessante, porém inusitada.

## 18. BIBLIOGRAFIA

KREIDER, J. F.; KREITH, F. **Solar energy handbook**. New York, McGraw Hill, 1981

RAPP, D. **Solar energy**. New Jersey, Prentice Hall, 1981

VEZIROGLU, T. N. – **Solar cooling and heating**. Flórida, Hpc, 1978

REDDY, T. A. **The design and sizing of active solar thermal systems**. Oxford, 1987

SOLARPACES/IEA – [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org), acesso em 13/05/07

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), acesso em 13/05/07

Momoi, A. **Projeto e testes de coletor solar de alta eficiência – Trabalho de formatura**. São Paulo, Politécnica da USP, 2005

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**;

AMBIENTEBRASIL – [www.ambientebrasil.com.br](http://www.ambientebrasil.com.br), acesso 08/04/07

PROCOBRE – [www.procobre.org](http://www.procobre.org), acesso em 23/09/07