

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

**PROJETO E TESTES DE  
COLETOR SOLAR DE ALTA EFICIÊNCIA**

**Alexandre Momoi**

**São Paulo  
2005**

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

**PROJETO E TESTES DE  
COLETOR SOLAR DE ALTA EFICIÊNCIA**

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

**Alexandre Momoi**

**Coordenador:  
Profº Alberto Hernandez Neto**

**Orientador:  
Profº José Roberto Simões Moreira**

**Área de concentração:  
Engenharia Mecânica**

**São Paulo  
2005**

TE 05  
M 317p

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011815

### FICHA CATALOGRÁFICA

Momoi, Alexandre  
Projeto e testes de coletor solar de alta eficiência  
/ A. Momoi. -- São Paulo, 2005.  
94 p.

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

1.Transferência de calor 2.Termodinâmica 3.Energia solar  
4.Fontes alternativas de energia I.Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

## RESUMO

O presente trabalho objetiva apresentar um coletor solar com uma eficiência maior do que os existentes atualmente. A busca do aproveitamento das energias renováveis destaca-se cada vez atualmente em um cenário de valorização do meio ambiente. Inicialmente, um estudo de viabilidade técnica-econômica foi realizado e posteriormente pesquisou-se o estado-da-arte dos coletores. O tipo de coletor escolhido foi o parabólico de foco linear. Este coletor foi dimensionado, escolhendo-se os materiais e resultando em aço inox polido para a superfície refletora pois apresenta um alto índice de refletividade, estrutura de madeira MDF para os perfis de sustentação das chapas refletoras para evitar a dilatação relativa e a deformação das chapas, perfil U de alumínio para o quadro de sustentação do coletor, e vidro temperado de borosilicato para o tubo coletor para suportar temperaturas elevadas. Este tubo é constituído de dois tubos de vidros concêntricos e evacuado entre eles para evitar perdas por convecção, sendo esta característica a principal tecnologia e proposta deste trabalho. Foi montado um protótipo com área de abertura projetada de 1 m<sup>2</sup>, cujo resultado foi um aumento do rendimento de pico da ordem de 7% em relação aos citados em literatura.

## ABSTRACT

This work objective presents a solar collector with a bigger efficiency of the one than the existing ones currently. The search of the exploitation of the energies you renewed is detached more and more in a scene of valuation of the environment. Initially, the state-of-art of the collectors was searched and later a technique-economic feasibility study it was done. The kind of chosen collector was the parabolic trough of linear focus. This collector was calculated, choosing the materials and resulting in polishing stainless steel for the reflecting surface therefore it presents one high index of reflection, wooden structure MDF for the profiles of sustentation of reflecting plates to prevent the relative expansion and the deformation of plates, aluminum profile U for the base of sustentation of the collector, and tempering glass of boron-silicate for the collecting pipe to support high temperatures. This pipe is constituted of two centered glass pipes and it was gotten vacuum between them to prevent losses for convection, being this characteristic the main technology and proposal of this work. It was built an archetype with area of projected opening of  $1 \text{ m}^2$ , whose resulted it was an increase of the performance of peak of the order of 7% in relation to the cites ones in literature.

#### Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus e Nossa Senhora. Agradeço aos meus pais, meu irmão, meus avós, tio Hissao, tios Paulo e Eneida . Ao Toninho pela força inicial, aos professores pela condução e formação, e ao Aldo e Marcus pelas oportunidades. A todos minha eterna gratidão.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABELAS .....	10
1 – INTRODUÇÃO .....	11
1.1 – Objetivo .....	11
1.2 – Cronograma.....	11
1.3 – Considerações gerais.....	12
1.4 – Motivação .....	12
2 – HISTÓRICO .....	16
2.1 – Histórico da utilização de coletores de energia solar para aplicações...	16
2.2 – Atualidade e programas mundiais para uso eficiente da energia solar .	19
3 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....	21
3.1 – Classificação da energia .....	21
3.1.1 – Qualidade da energia:.....	21
3.1.2 – Tipo de fonte de energia: .....	22
3.1.3 – Tipo de captação de energia solar:.....	26
3.2 – Contexto energético nacional e mundial.....	27
3.3 – Custo da energia .....	30
3.4 – Alternativas selecionadas .....	36
4. ALTERNATIVAS ESCOLHIDAS .....	38
4.1 – Coletores solares com concentrador de raios solares.....	38
4.2 – Projeções de estudos de mercado para coletores solar.....	38
4.3 - Tecnologias.....	39
4.3.1 – Torres centrais.....	39
4.3.2 – Coletor parabólico de foco pontual .....	40
4.3.3 – Coletor parabólico de foco linear .....	41
4.4 – Plantas de sistemas solar instaladas e evolução dos custos .....	42
4.5 – Argumentos para investimentos em coletores solar .....	43

4.6 – Energia solar no Brasil .....	46
5 – ESCOLHA DA MELHOR ALTERNATIVA .....	48
5.1 – Melhor alternativa .....	48
5.2 – Componentes de coletores solar parabólico .....	49
5.2.1 – Refletor .....	50
5.2.2 – Tubo coletor .....	50
5.2.3 – Estrutura .....	50
5.3 – Oportunidades para redução de custos .....	51
5.3.1 - Tamanho da planta instalada .....	51
5.3.2 - Tecnologia do coletor .....	51
5.3.3 - Geração direta de vapor (GDV) .....	51
5.4 – Outras tecnologias .....	52
5.4.1 - Coletor Solar Tipo Parabólico Utilizando Tubos de Calor com Telas Sintetizadas como Absorvedor .....	52
5.4.2 - Coletor com dois estágios de concentradores .....	52
6 – DESENVOLVIMENTO .....	56
6.1 - Levantamento da irradiação solar .....	56
6.2 – Distribuição da irradiação solar ao longo do dia .....	59
6.2 – Dimensionamento do coletor solar parabólico .....	64
6.2.1 - Utilizando Transferência de Calor – Escoamento interno com fluxo térmico constante .....	64
6.3 - Construção do protótipo .....	66
6.3.1 – Tubo coletor absorvedor da irradiação solar .....	66
6.3.2 – Superfície refletora .....	69
6.3 – Montagem e ajustes. ....	76
6.4 – Orçamento e custos .....	78
6.5 – Montagem final e coleta de dados .....	79
6.6 – Resultados, tratamento de dados e análises .....	81
7 - CONCLUSÃO .....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88
APÊNDICE 1 – Protocolo de Kyoto .....	91



## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1** – Máquina solar de Mouchot 1878 (Fonte: Escola Técnica Superior de Madri)
- Figura 3.1** – Coletor solar fotovoltaico (Fonte: Guerrini – 2001)
- Figura 3.2** – Gêiser, Islândia (Fonte: Guerrini – 2001)
- Figura 3.3** – Usina hidrelétrica de Itaipu (Fonte: Guerrini – 2001)
- Figura 3.4** – Turbina eólica (Fonte: Guerrini – 2001)
- Figura 3.5** – Usina nuclear Angra 1 (Fonte: Eletronuclear)
- Figura 3.6** – Mecanismo para geração de energia a partir das ondas (Fonte: Guerrini – 2001)
- Figura 3.7** – Processos de conversão energética (Fonte: Eletrobras / Procel – Conservação de energia – 2001)
- Figura 3.8** – Geração de energia mundial (Fonte: Exxon Mobil Corp. 2005)
- Figura 3.9** – Distribuição do consumo de energia elétrica no Brasil (Fonte: ANEEL 2004)
- Figura 4.1** – Coletor solar parabólico de foco linear (Price – 1999)
- Figura 4.2** – Esquema de coletor solar tipo torre central (Fonte: SolarPACES)
- Figura 4.3** – Esquema de coletor solar parabólico de foco pontual (Fonte: SolarPACES)
- Figura 4.4** – Esquema de coletor solar parabólico de foco linear (Fonte: SolarPACES)
- Figura 4.5** – Coletor solar parabólico em ciclo Rankine (Fonte: SolarPACES)
- Figura 5.1** – Estrutura de custos de um coletor solar parabólico (Fonte: SolarPACES)
- Figura 5.2** – Coletor Fresnel (Fonte: SolarPACES)
- Figura 5.3** – Planta de um campo de coletores para geração de 50 MW (Fonte: SolarPACES)
- Figura 5.4** – Eficiência de um coletor de dois estágios (Fonte: SolarPACES)
- Figura 6.1** – Mapa da média de radiação diária solar na América do Sul (Fonte: CPTEC / INPE)
- Figura 6.2** – Distribuição ao longo do dia (Fonte: SolarPACES)
- Figura 6.3** – Variação média da radiação ao longo do ano para a região da Mata Atlântica do Estado de São Paulo (Fonte: CPTEC / INPE)
- Figura 6.4** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de janeiro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.5** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de fevereiro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.6** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de março na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.7** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de abril na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.8** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de julho na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.9** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de agosto na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)
- Figura 6.10** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de setembro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)

**Figura 6.11** – Croqui do tubo coletor – versão 1

**Figura 6.12** – Croqui do tubo coletor – versão 2

**Figura 6.13** – Croqui do tubo coletor – FGG

**Figura 6.14** – Tubo coletor AM-1

**Figura 6.15** – Parábolas e seus respectivos focos

**Figura 6.16** – Comportamento dos perfis de parábolas

**Figura 6.17** – Materiais para confecção do perfil parabólico

**Figura 6.18** – Serra circular

**Figura 6.19** – Serra tico-tico

**Figura 6.20** – Perfil acabado

**Figura 6.21** – Dispositivo 1 de fixação do coletor

**Figura 6.22** – Dispositivo de fixação do coletor

**Figura 6.23** – Montagem do quadro de sustentação da estrutura do coletor

**Figura 6.24** – Montagem da estrutura do coletor

**Figura 6.25** – Fixação da superfície refletora

**Figura 6.26** – Montagem do tubo coletor e ajuste do foco

**Figura 6.27** – Coletor solar parabólico em teste

**Figura 6.28** – Coletor solar parabólico, em perfil

**Figura 6.29** – Termômetro digital com termopar

**Figura 6.30** – Gráfico da coleta de dados do coletor parabólico

**Figura 6.31** – Gráfico da coleta de dados do coletor parabólico

**Figura 6.32** – Ebulição sobre o tubo coletor

**Figura 6.33** – Entrada do tubo coletor

**Figura 6.34** – Saída do tubo coletor

**Figura 6.35** – Problema na focalização

**Figura 6.36** – Condição totalmente turbulenta

## ÍNDICE DE TABELAS

**Tabela 1.1** – Cronograma 1º e 2º semestre de 2005

**Tabela 1.2** – Comparação de energia gerada ou gasta (Fonte: Eletrobras / Procel – Conservação de energia – 2001)

**Tabela 3.1** – Características principais das fontes-renováveis (fonte: WCE)

**Tabela 3.2** – Estabelecimento das Necessidades

**Tabela 3.3** – Projeção do custo da energia elétrica (Fonte: DOE 2003)

**Tabela 3.4** – Redução de custos verificados e esperados para fontes alternativas de geração de energia elétrica (Fonte: AIE 2002)

**Tabela 3.5** – Redução de custos verificados e esperados para fontes alternativas de geração de energia elétrica (Fonte: AIE 2000)

**Tabela 4.1** – Evolução dos Sistemas Solar de Geração Elétrica (Fonte: SolaPACES)

**Tabela 4.2** – Oferta de energia elétrica no Brasil (Fonte: Salles 2004)

**Tabela 4.3** – Taxa de crescimento projetada (Fonte: Salles 2004)

**Tabela 5.1** – Características das principais fontes heliotérmicas (Fonte: Cavalcanti et al 2004)

**Tabela 6.1** – Registros diários de irradiação solar (Fonte: Webbee)

**Tabela 6.2** – Cálculo de dimensionamento do coletor solar

**Tabela 6.3** – Comparativo de materiais para superfícies refletoras

**Tabela 6.4** – Equacionamento da parábola

**Tabela 6.5** – Custos do coletor

**Tabela 6.6** – Dados coletados

[illegible]

Houve atrasos nos itens 15 e 16 devido ao fornecimento dos materiais para montagem do protótipo. A efetivação da construção e dos testes foi realizada no final de novembro.

### 1.3 – Considerações gerais

Este trabalho iniciou-se com o levantamento do estado-da-arte de coletores solar de elevada eficiência a partir de pesquisas em literatura disponível (livros, artigos, publicações, internet, folders, etc). Baseado neste estudo preliminar, um tipo de coletor foi selecionado para produção de vapor de água à elevada temperatura para aplicações diversas, das quais, uma em particular será selecionada. Foi desenvolvido, também, um projeto conceitual com seu respectivo memorial de cálculos. Posteriormente, o protótipo foi construído com a realização de testes e obtenção de resultados para comparações com outros sistemas existentes.

### 1.4 – Motivação

O Sol é a energia primária das energias disponíveis na Terra, incluindo a energia para aquecimento direto, assim como a energia do vento, hidroelétricas e a energia derivada de combustíveis fósseis.

Combustíveis fósseis existem como consequência da fotossíntese, processo pelo qual as plantas convertem energia solar em energia química. O completo entendimento da energia solar para aplicações somente é possível através da análise e estudo da radiação solar.

Uma das principais características de nossa sociedade, ao menos sob um ponto de vista prático e material, é o aumento cada vez maior da demanda

por abastecimento energético. Esta é a condição para a existência de nossa indústria, nossos meios de transporte e até mesmo a agricultura e a vida urbana. Enfim, é a condição para a existência de nossa sociedade como a conhecemos.

Observe na Tabela 1.2, o comparativo de grandezas de alguns processos/geradores de potência bastante comuns:

**Tabela 1.2** – Comparação de energia gerada ou gasta (Fonte: Eletrobras / Procel – Conservação de energia – 2001)

Processo ou fenômeno	Potência (W)
Potência liberada pelo Sol	$3,4 \times 10^{27}$
Radiação solar interceptada pela Terra	$1,7 \times 10^{17}$
Produção fotossintética primária média na Terra	$1,0 \times 10^{14}$
Tornado de médio porte	$1,7 \times 10^9$
Turbogerador a vapor de grande porte	$1,0 \times 10^9$
Caminhão de grande porte	$3,0 \times 10^5$
Motor de 1000 cc	$5,5 \times 10^4$
Máquina a vapor	$6,0 \times 10^3$
Moinho de vento	$3,0 \times 10^3$
Moinho de água	$1,6 \times 10^3$
Ciclo simples em uma máquina de lavar	$5,0 \times 10^2$
Tração animal	$4,0 \times 10^2$
Homem	$8,0 \times 10^1$
Vela quimando até o final	$3,0 \times 10^0$
Vôo de um beija-flor	$7,0 \times 10^{-1}$
Coração de um recém-nascido	$4,0 \times 10^{-1}$
Calculadora	$1,0 \times 10^{-1}$

O desenvolvimento do motor de combustão interna e de diversas turbinas incrementaram tanto a potência das diversas unidades de produção como o número total de unidades existentes e, portanto, aumentaram a capacidade de produção do homem e seu consumo de combustível. O crescimento exponencial desse consumo se iniciou com a Revolução Industrial do século XVIII.

Frente a esta realidade, seria irracional não buscar, por todos os meios tecnicamente possíveis, aproveitar esta fonte de energia limpa, inesgotável e gratuita: a energia solar.

Portanto, a energia solar, além de fonte de vida, é a origem de toda as formas de energia que o homem vem utilizando durante sua história e pode ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro, uma vez que aprendamos a aproveitar de maneira racional a luz que esta estrela constantemente derrama sobre nosso planeta. Brilhando a mais de 5 bilhões de anos, calcula-se que o Sol ainda nos privilegiará por outros 6 bilhões de anos, ou seja, ele está apenas na metade de sua existência e lançará sobre a Terra, só neste ano, 4.000 vezes mais energia que consumiremos.

Fernandes (2005), cita em seu estudo que a Terra recebe energia radiante do Sol a um regime de  $173 \times 10^{15} \text{ W}$  (\*), emitindo uma quantidade idêntica. Esta é uma condição do equilíbrio. A emissão depende da temperatura da Terra, ou seja, a temperatura do planeta tal qual o conhecemos é a temperatura de equilíbrio na qual a admissão é igual à emissão de radiação. Assim, se a admissão mudasse por qualquer razão, a temperatura de equilíbrio também se modificaria.

---

(\*) Área projetada da Terra =  $(6.3 \times 10^6)^2 \times 3,14 = 124 \times 10^{12} \text{ m}^2$ ;  
Constante Solar =  $1395 \text{ W/m}^2$ ;  
Energia recebida =  $124 \times 10^{12} \times 1395 = 173 \times 10^{15} \text{ W}$

Aproximadamente 30% da radiação incidente se reflete sem mudança na amplitude de onda. Cerca de 47% é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, provoca um aumento de temperatura e, em seguida, irradia-se novamente para o espaço. Apenas os 23% restantes penetram no sistema terrestre e passam a ser a força motriz de ventos, correntes, ondas, modela nosso clima e proporciona o ciclo da água. Em última instância, também será re-irradiado ao espaço.

Somente 0,02% do total, ou seja  $40 \times 10^{12}$  W penetra no sistema biológico, por fotossíntese, nas plantas e em outros organismos "produtores". Uma pequena proporção da energia armazenada como energia química em plantas e tecidos de corpos animais se acumularam durante milhões de anos, sob condições geológicas favoráveis na forma de carvão e óleos minerais, convertendo-se em nossas reservas de combustíveis fósseis. Isto é um fato: o ritmo de formação de combustíveis fósseis (se existe) é mínimo em comparação com o ritmo de consumo. Se desejamos evitar um esgotamento de nossas reservas de combustíveis fósseis, devemos desviar o fluxo destas importantes quantidades de energia provenientes do Sol e rediregi-las para que trabalhem para nós, antes que se dissipem e sejam re-irradiadas ao espaço.

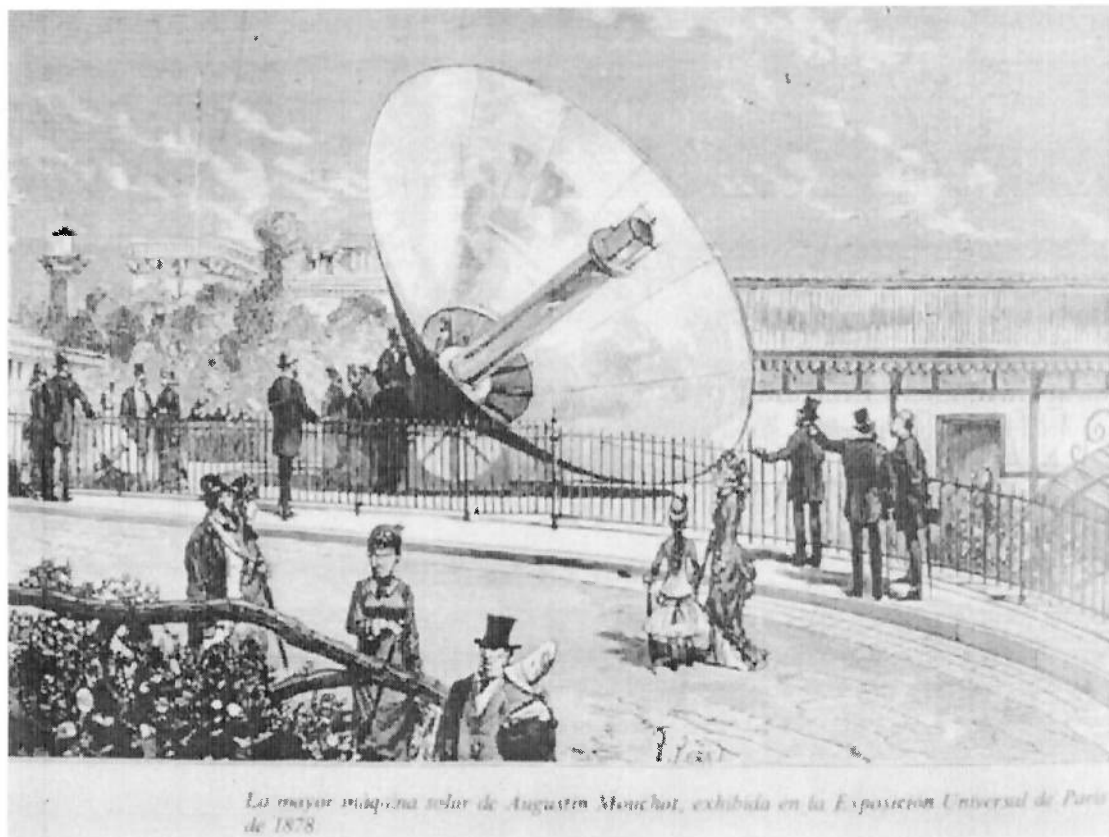


## 2 – HISTÓRICO

### 2.1 – Histórico da utilização de coletores de energia solar para aplicações

- Império egípcio: acendimento do fogo sagrada nos obeliscos;
- Século III a.C.: Arquimedes – um dos primeiros coletores solares e aplicação bélica;
- Século I: Herão, de Alexandria – dispositivo solar para bombeamento de água;
- 1560: o cirurgião francês, Ambroise Paré ,construiu um alambique solar;
- 1615: Salomon de Caux, engenheiro francês, construiu uma caldeira solar, sendo esta a primeira notícia escrita da conversão da energia solar em energia mecânica;
- 1774: Antoine Laurent Lavoisier, astrônomo, botânico e químico, construiu o primeiro forno solar. Obteve neste forno temperaturas da ordem de 1750°C e realizou a conhecida experiência que marcou época, queimando diamante em presença do oxigênio, obtendo o dióxido de carbono, demonstrando assim que o diamante é uma variedade cristalina e puríssima do carbono;
- 1854 e 1873 foram realizadas experiências visando a produção de vapor via energia solar. Segundo consta dos dados históricos, deve-se a C. Gunter o pioneirismo de tais experiências. Montou ele um sistema de espelhos de forma parabólica cuja radiação solar incidente dava origem a um foco linear no qual se encontrava uma caldeira rudimentar formada por um tubo com água. O conjunto era manualmente deslocado para acompanhar o movimento aparente do sol de modo que a posição do foco permanecesse invariável ;

- 1860 a 1878 foi a vez de Auguste B. Mouchot, professor no Liceu de Tours, que construiu diversas caldeiras solares. Foi o pioneiro em refrigeração aplicando energia solar;



**Figura 2.1** – Máquina solar de Mouchot 1878 (Fonte: Escola Técnica Superior de Madri)

- 1878: com o emprego de refletores parabólicos, o inventor A. Pifre construiu caldeiras solares;
- 1870 e 1884: John Ericson, engenheiro de origem sueca, contribuindo na construção de engenhos solares, alguns à vapor e outros à ar quente;
- 1901 a 1911, portanto no início deste século, surgiram efetivamente as primeiras aplicações em grande escala da energia solar. Em 1901 em Pasadena - California, Aubreu G. Eneas desenvolveu sistemas solares para

bombeamento de água. Entre 1906 e 1911, Frank Shuman construiu painéis solares utilizando coletores planos;

- Em 1911 foi fundada em Londres uma empresa denominada SUN POWER COMPANY, que em 1913 inaugurou o primeiro grande sistema solar de irrigação e que funcionou às margens do rio Nilo em Meadi, perto do Cairo;
- Em 1950 surgiu um fato novo e importante para a energia solar. Descobriu-se que certos materiais denominados de semi-condutores tinham a propriedade de gerar eletricidade quando expostos à luz, principalmente a luz solar. Em 1955 teve lugar a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para geração de eletricidade, fato este ocorrido em Phoenix no Arizona;
- (início década 70: crise energética (quadruplicou preço do barril do petróleo, pois estudos afirmavam que enquanto as curvas das reservas estavam caindo, a demanda energética mundial estava em constante crescimento. Resultado: retomou-se os estudos e pesquisas de fontes alternativas de energia);
- A partir de 1979: vários grandes projetos na França, Itália, Estados Unidos, Japão, Espanha, construindo centrais solares com capacidade de geração entre 100 kW a 35 MW;
- (início década 80: previsões sobre o esgotamento das reservas petrolíferas mundiais não se confirmaram, resultando na queda do preço do petróleo. Novamente houve a retomada da busca por otimização e novas fontes alternativas de energia).

## 2.2 – Atualidade e programas mundiais para uso eficiente da energia solar

A partir de meados dos anos 80, com a estabilização do preço do petróleo, diminuiu-se a preocupação com relação à segurança do suprimento de energia. Ela só seria retomada no final dos anos 80, quando o impacto da queima de combustíveis fósseis na variação climática global tornou-se uma questão mundial, culminando com o Protocolo de Kyoto, um acordo internacional em que os países signatários estabeleceram metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Para atingir essas metas, tornou-se imprescindível uma maior eficiência em toda a cadeia energética.

Vários países criaram instituições para fomentar a eficiência energética:

- O Reino Unido fundou o Energy Saving Trust (EST). Os programas se concentram na conscientização sobre as vantagens do uso eficiente da energia e na concessão de incentivos financeiros para produtos energeticamente mais eficientes.
- Na França, a agência encarregada de desenvolver atividades na área foi a ADEME. Sua atuação compreendia campanhas de conscientização e de difusão de informações e a realização de estudos.
- No Japão, o Centro de Conservação de Energia (ECCJ) foi criado em 1978; devem-se ressaltar os esforços de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), além do estabelecimento de normas de eficiência energética para a construção civil.
- Em 1998 o governo canadense criou o Office of Energy Efficiency (OEE), que tem implementado normas de para construção civil, padrões mínimos de eficiência para aparelhos eletrodomésticos, iluminação etc.

- Nos Estados Unidos, o Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) foi criado com o objetivo de desenvolver tecnologias eficientes e fontes renováveis de energia que propiciem oportunidades para aumentar a competitividade do país, com o suporte da agência ambiental EPA.
- No Brasil, foi criado em 1985 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), sob a coordenação da ELETROBRÁS. Na sua primeira fase, até 1989, observou-se uma concentração em promoção de pesquisa e desenvolvimento de equipamentos eficientes; padronização e certificação de equipamentos; e levantamentos e análises de hábitos de consumo e eficiências de uso de equipamentos. Após a crise energética de 2001, o PROCEL vem passando por um processo de revitalização, com várias ações: educação; prédios públicos; setor industrial; etiquetagem; setor de saneamento; iluminação pública; apoio as universidades e centros de pesquisa. Visando à racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural, numa concepção mais abrangente da conservação de energia, foi também instituído, em 1991, o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET), coordenado pela PETROBRAS. A maior parte das iniciativas do CONPET tem se voltado à atividade de refino e ao desperdício de óleo diesel.

### 3 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

#### 3.1 – Classificação da energia

##### 3.1.1 – Qualidade da energia:

A Tabela 3.1 mostra um comparativo entre diversas formas de energia e suas classificações.

- Poluente / não poluente;
- Renovável / não renovável / inesgotável.

**Tabela 3.1 – Características principais das fontes-renováveis (fonte: WCE)**

<b>CARACT. TIPO</b>	<b>SOLAR</b>	<b>EÓLICA</b>	<b>GEOTÉRMICA</b>	<b>BIOMASSA</b>	<b>DOS OCEANOS</b>	<b>PCH</b>
<b>MAGNITUDE</b>	Extremamente grande	Grande	Muito grande	Muito grande	Muito grande	Grande
<b>DISTRIBUIÇÃO</b>	Mundial	Litoral, montanhas, planícies	Fronteiras tectônicas	Mundial	Litoral, trópicos	Mundial, montanhas
<b>VARIAÇÃO</b>	Dependente do tempo, dia e estação do ano	Altamente variável	Constante	Dependente do clima e da estação do ano	Dependente da maré e da estação do ano	Dependente da estação do ano
<b>INTENSIDADE</b>	Baixa (no pico 1 kW/m <sup>2</sup> )	Baixa para média (0,8 MW/km <sup>2</sup> )	Média baixa (até 600 °C)	Moderada para baixa	Baixa	Moderada para baixa
<b>OPÇÕES</b>	Sistemas térmicos, fotovoltaicos, passivos e bioconversão	Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal, bombas eólicas e navegação a vela	Ciclos termodinâmicos a vapor e binários, magma geopressurizada	Combustão, fermentação, digestão, gaseificação e liquefação	Ciclos termonômicos, osciladores de ondas mecânicos, represagem	Represagem e turbinas
<b>ESTADO DA ARTE</b>	Em desenvolvimento, algumas comerciais	Muitas comerciais, mais em desenvolvimento	Muitas comerciais, algumas em desenvolvimento	Algumas comerciais, mais em desenvolvimento	Em desenvolvimento	Maioria comercial
<b>FATOR DE CAPACIDADE</b>	< 25% w/o armazenagem, intermediário	Variável, a maior parte de 15% a 30%	Alta, carga base	Quando necessário com estoque de curto prazo	Intermitente para carga base	Intermediário para carga base
<b>MELHORIAS</b>	Matérias, custo, eficiência, fonte de dados	Matérias, projeto, localização, fonte de dados	Exploração, extração, uso pedra seca / quente	Tecnologia, gerenciamento da agricultura e silvicultura	Tecnologia, materiais e custo	Turbinas, custo, projeto, fonte de dados

### 3.1.2 – Tipo de fonte de energia:

- Solar: a energia solar como o próprio nome já diz, é uma energia que vem do sol, sendo irradiada continuamente por este astro. Para se ter uma idéia, em apenas um segundo o sol produz mais energia (internamente) que toda energia usada pela humanidade desde o começo dos tempos. Uma outra forma de se exprimir esta imensa grandeza energética, basta dizer que a energia que a terra recebe por ano vinda do sol, representa mais que 15000 vezes o consumo mundial anual de energéticos (Estação Ciência – 2005).



**Figura 3.1 – Coletor solar fotovoltaico (Fonte: Guerrini – 2001)**

- Geotérmica: é a energia produzida de rochas derretidas no subsolo (magma) que aquecem a água no subsolo. Na Islândia, que é um país localizado muito ao Norte, próximo do Círculo Polar Ártico, com vulcanismo intenso, onde a água quente e o vapor afloram à superfície (Figura 3.2) ou se encontram em pequena profundidade, tem uma grande quantidade de energia geotérmica aproveitável e a energia elétrica é gerada a partir desta.

As usinas elétricas aproveitam esta energia para produzir água quente e vapor. O vapor aciona as turbinas que geram quase 3 000 000 joules de energia elétrica por segundo e a água quente percorre tubulações até chegar às casas. Nos Estados Unidos da América há usinas deste tipo na Califórnia e em Nevada. Em El Salvador, 30% da energia elétrica consumida provém da energia geotérmica.



**Figura 3.2 – Gêiser, Islândia (Fonte: Guerrini – 2001)**

- **Hidráulica:** nas usinas hidrelétricas, a energia elétrica tem como fonte principal a energia proveniente da queda de água represada a uma certa altura. A energia potencial que a água tem na parte alta da represa é transformada em energia cinética, que faz com que as pás da turbina girem, acionando o eixo do gerador, produzindo energia elétrica. Utiliza-se a energia hídrica no Brasil em grande escala, devido aos grandes mananciais de água existentes. Atualmente estão sendo discutidas fontes alternativas para a produção de energia elétrica, pois a falta de chuvas está causando um grande déficit na oferta de energia elétrica.



A maior usina hidrelétrica do Brasil é a de Itaipu (Foz de Iguaçu) que tem capacidade de 12600 MW (Figura 3.3).



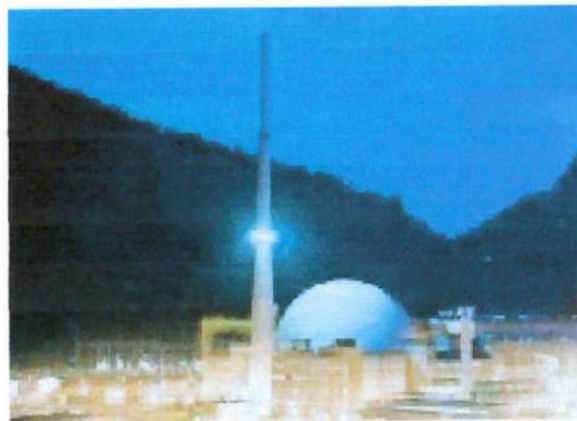
**Figura 3.3 – Usina hidrelétrica de Itaipu (Fonte: Guerrini – 2001)**

- Fóssil: energia concentrada na forma de petróleo formada há milhares de anos atrás;
- Biomassa (vegetal, mineral, álcool, etc);
- Biogás;
- Eólico: os moinhos de ventos são velhos conhecidos nossos, e usam a energia dos ventos, isto é, eólica, não para gerar eletricidade, mas para realizar trabalho, como bombear água e moer grãos. Na Pérsia, no século V, já eram utilizados moinhos de vento para bombear água para irrigação. A energia eólica é produzida pela transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. A conversão de energia é realizada através de um aerogerador que consiste num gerador elétrico acoplado a um eixo que gira através da incidência do vento nas pás da turbina.



**Figura 3.4** – Turbina eólica (Fonte: Guerrini – 2001)

- Nuclear: este tipo de energia é obtido a partir da fissão do núcleo do átomo de urânio enriquecido, liberando uma grande quantidade de energia.



**Figura 3.5** – Usina nuclear Angra 1 (Fonte: Eletronuclear)

- Marés: a energia das marés é obtida de modo semelhante ao da energia hidrelétrica. Constrói-se uma barragem, formando-se um reservatório junto ao mar. Quando a maré é alta, a água enche o reservatório, passando através da turbina e produzindo energia elétrica, e na maré baixa o reservatório é esvaziado e água que sai do reservatório, passa novamente

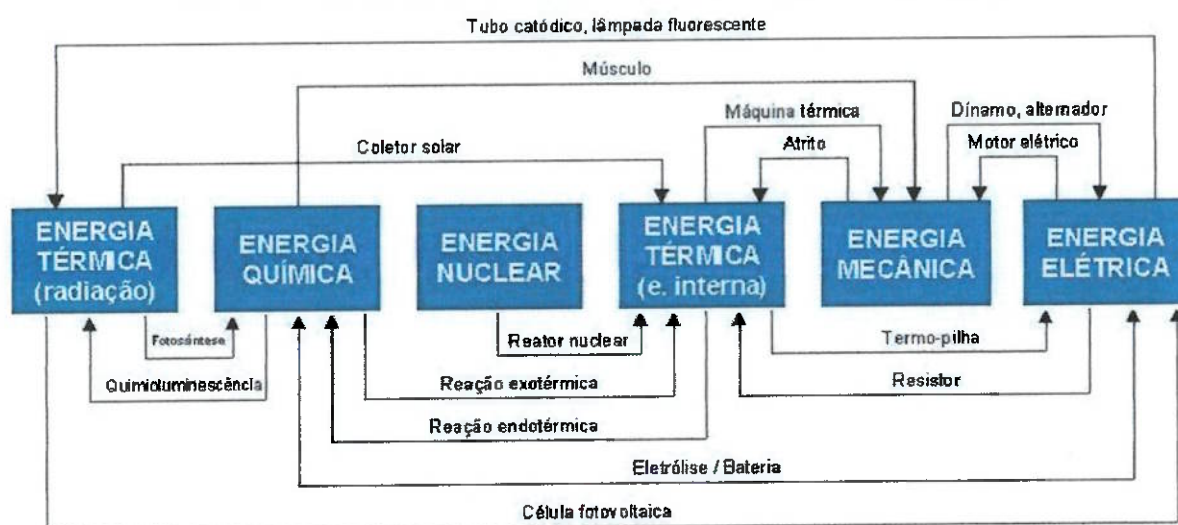
através da turbina, em sentido contrário, produzindo energia elétrica (Figura 3.6). Este tipo de fonte é também usado no Japão e Inglaterra.



**Figura 3.6** – Mecanismo para geração de energia a partir das ondas (Fonte: Guerrini – 2001)

### 3.1.3 – Tipo de captação de energia solar:

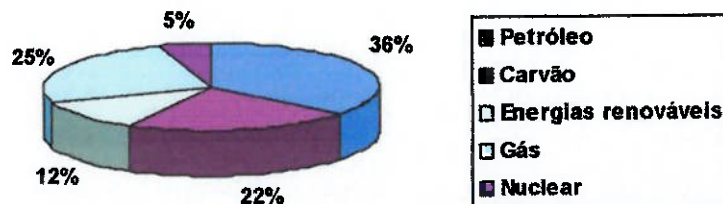
- Térmica;
- Conversação química;
- Conversação elétrica.



**Figura 3.7** – Processos de conversão energética (Fonte: Eletrobras / Procel – Conservação de energia – 2001)

### 3.2 – Contexto energético nacional e mundial

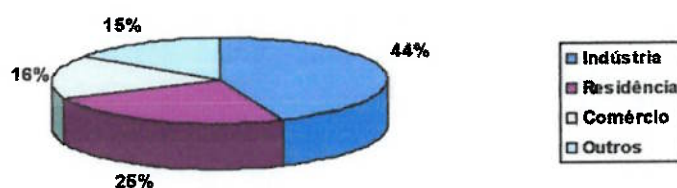
A energia elétrica mundial é gerada por diversas fontes (Fig. 3.8).



**Figura 3.8 – Geração de energia mundial (Fonte: Exxon Mobil Corp. 2005)**

O desenvolvimento do país também demandará um aumento na oferta de energia em taxas percentuais maiores do que a do próprio crescimento do PIB, conforme a distribuição de consumo de energia (Figura 3.9). Mas boa parte dessa demanda adicional pode ser compensada pelo aumento da eficiência energética no sistema, sobretudo pelo aumento da conservação, entendida como o usufruto dos mesmos confortos e a realização do mesmo patamar de atividade econômica com redução do consumo energético. Tradicionalmente, esses ganhos são obtidos por meio de:

- Redução nas perdas técnicas das concessionárias;
- Racionalização do uso da energia elétrica;
- Aumento da eficiência energética em aparelhos elétricos;
- Otimização dos geradores de energia para melhoria da eficiência.



**Figura 3.9 – Distribuição do consumo de energia elétrica no Brasil (Fonte: ANEEL 2004)**

Vários trabalhos demonstram que os investimentos necessários para as ações de eficiência energética são menores do que aqueles necessários à expansão da oferta de energia elétrica. As ações voltadas ao gerenciamento da demanda, seja através de aspectos gerenciais ou produção e uso de equipamentos mais eficientes, representam um investimento menor quando consideramos a vida útil dos equipamentos mesmo que os mesmos possuam inicialmente um custo de aquisição maior. As ações de aumento de geração de energia elétrica por fontes hidrelétricas provocam impactos ambientais e sociais desfavoráveis, sejam nas áreas inundadas e a quebra do equilíbrio ecológico, bem como a transferência de populações para outros lugares que não sejam o habitat original. As usinas termelétricas também provocam impacto ambiental através dos poluentes atmosféricos e da necessidade da utilização intensiva de água para o processo de refrigeração. Assim, reduzir o desperdício de energia no mínimo posterga várias obras de geração e possibilita a transferência dos recursos financeiros públicos, antes empregados na geração de energia elétrica, para investimentos em obras sociais.

Além disso, nas condições atuais de alta emissão de gases do efeito estufa e crescente aquecimento global, faz-se necessário definir como uma medida prioritária da exploração de fontes renováveis de energia para proteger o meio ambiente e prover o desenvolvimento sustentável. Esses investimentos podem reduzir o impacto social e contribuir para atingir a meta estabelecida no Protocolo de Kyoto [Apêndice 1], acertado em 1997. Para a União Européia foi estabelecida uma redução de 8% (355,8 Mt CO<sub>2</sub>) dos gases do efeito estufa entre 2008-2012, em comparação com o nível de emissão de 1990. No

entanto, alguns pontos precisam ser definidos para que cresça o investimento em energias renováveis, tais como, o estabelecimento de metas de crescimento, o aumento dos financiamentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e a definição de regras para acelerar o crescimento do mercado de energias alternativas e políticas estáveis que dêem segurança ao investidor.

Em resumo, pode-se listar as seguintes necessidades para argumentação e prosseguimento no projeto:

**Tabela 3.2 – Estabelecimento das Necessidades**

<b>Declaradas x Reais</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Cumprimento do Protocolo de Kyoto;</li><li>2. Alternativas para substituição de energias não-renováveis;</li><li>3. Crescente demanda energética.</li><li>4. Redução na demanda em horários de pico de consumo.</li></ol>
<b>Culturais</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Conscientização para o uso racional das energias não-renováveis e estímulo ao investimento em fontes alternativas.</li><li>2. Evitar impactos de desapropriações com perdas de culturas regionais em construções de barragens.</li></ol>
<b>Percebidas</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Descentralizar o pólo gerador, causando um impacto menor e menos investimento na transmissão de energia em relação a um pólo concentrado, por exemplo uma usina hidrelétrica;</li><li>2. Otimização das eficiências na geração de energia;</li></ol>
<b>Implícitas</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Desenvolvimento econômico;</li><li>2. Desenvolvimento social.</li></ol>



### 3.3 – Custo da energia

Em geral, as principais variáveis que compõem o custo de geração de energia (US\$/MWh) são os custos de investimento, de combustível e de operação e manutenção (O&M).

Greenpeace publicou em 2002, um comparativo entre os tipos e os custos para instalação de geradoras / coletoras de energia solar:

- **BIOMASSA:** O uso racional das biomassas (bagaço e palha) constitui uma típica solução de geração distribuída. Os locais das usinas de açúcar e álcool são pulverizados e próximos de centros de consumo elétrico, com capacidade para produzir de 20 a 200 MW cada uma, conforme a região, as características de produção e a tecnologia industrial.
- **PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS:** apesar do custo relativamente elevado da energia que produzem, que varia de R\$ 51,22/MWh (PCH de 10-30 MW na região Sul) a R\$ 122,57/MWh (microcentrais até 100 kW no Norte), ficando portanto muitas vezes acima do valor normativo fixado em R\$ 72,45/MWh pela ANEEL, as PCHs se apresentam como uma alternativa atraente para suprimento da demanda por energia, seja na forma de cooperativas para construir microcentrais e atender comunidades isoladas na área rural, seja na forma de pequenas centrais (acima de 10 MW) para comercialização.
- **BIOGÁS:** O sistema de geração de energia utiliza o biogás da estação e pode empregar três formas básicas de geração de energia: o ciclo Otto (motores de combustão interna), o ciclo Rankine (caldeira com turbina a vapor) e a turbina a gás. Esta última não tem viabilidade no Brasil, por se tratar de um equipamento importado e de baixa eficiência. Existem ainda as tecnologias

de ciclo combinado (para grandes potências, acima de 15 MW) e microturbina (para pequenos aterros, com 100 kW de potencial), mas que não têm larga escala de utilização na área de lixo. Os motores de combustão interna de queima pobre (conhecidos como Lean Burn Engine) utilizam o biogás diretamente, não necessitando de um tratamento sofisticado do combustível, apenas secagem e filtragem são suficientes. Esses motores têm o inconveniente de serem importados, com custos de investimento e manutenção mais elevados para o Brasil, porém são largamente utilizados nos EUA e na Europa. A geração de energia elétrica é realizada pelo gerador acoplado diretamente ao motor. Para motores grandes ciclo Otto (importados), o custo de investimento do sistema de captação de biogás e geração de energia é de cerca de 1.200 U\$/kW instalado. O ciclo Rankine é composto por caldeira para gerar vapor de alta pressão e temperatura, turbina a vapor, condensador e bombas. É o mais antigo sistema de geração de energia e está muito presente com equipamentos e fornecedores no Brasil, devido ao setor sucroalcooleiro, que utiliza esses equipamentos inclusive para autoprodução de energia elétrica. A região de Sertãozinho, no Estado de São Paulo, destaca-se como centro dessas tecnologias, concentrando empresas de engenharia, fabricantes de caldeiras e turbinas, entre outros equipamentos, com custos de investimento cerca de 10% inferior ao de motores. Já nos casos de biogás de esterco a tecnologia é restrita a motores de combustão interna de pequeno porte (50 a 100 kW), suficientes para abastecer as fazendas com geração de energia elétrica ou até mesmo acionamento de bombas de irrigação. As esterqueiras são adaptadas com drenos que captam o biogás e geram energia em motores



pequenos. Por se tratar de pequenas quantidades de esterco (em relação a aterros), é comum a utilização de gasômetros para armazenar o biogás quando a demanda por energia não é grande. Os equipamentos são na maioria das vezes de tecnologia nacional, utilizando-se motores de veículos adaptados, ou até mesmo novos, como é o caso da Mercedes Benz, que possui uma linha especial para biogás. O cenário futuro para a opção tecnológica ou do combustível. O biogás é um combustível com todas as condições técnicas e econômicas para ser explorado no Brasil. Está inserido no programa do governo de incentivo às fontes alternativas de energia (PROINFA), segundo o qual o biogás se viabiliza com um preço de cerca de 170 R\$/MWh e com os créditos de carbono (do Protocolo de Kyoto), essenciais para os investidores e para a viabilização de projetos de UTE a biogás em aterros.

- **EÓLICO:** Do ponto de vista econômico, embora a geração eólica seja hoje cara em relação as fontes convencionais, há uma tendência de apresentar curva de aprendizado declinante, devido à ampliação do uso da tecnologia eólica. Além disso, os avanços obtidos com os novos materiais contribuem para reduzir a fadiga e o stress dos componentes das turbinas (rotor, transmissões, gerador e torre) com reflexo nos custos de manutenção. Hoje, o custo da geração se situa entre US\$ 70 e US\$ 80 por MWh, um valor que se aproxima dos custos das novas plantas de geração de energia convencional, no caso brasileiro. A energia eólica pode ser favorecida pelas pressões de natureza ambiental e geopolítica sobre as fontes fósseis, tornando-a cada vez mais competitiva. Apesar do crescimento acelerado e

da redução acentuada do custo –de US\$ 120/Wp em 1970 para cerca de US\$ 3,5/Wp em 2001.

- **HELIÓTERMICO:** Outra forma de coletar a energia solar são as usinas heliotérmicas, em que não se utiliza o efeito fotovoltaico para converter a radiação emanada do Sol em eletricidade. Neste caso, o fator central é o calor, e a usina opera coletando, transportando, armazenando e convertendo calor em eletricidade. Existem três tecnologias principais para essa tarefa: cilindro parabólico, torre central e disco parabólico. Várias plantas-piloto de usinas heliotérmicas foram construídas nos anos 1980, que permitiram o avanço das tecnologias e a redução do custo da energia produzida a 1/5 do custo inicial. Hoje, 350 MW são produzidos nos Estados Unidos por plantas heliotérmicas comerciais. Além dos EUA, Espanha, Israel e Austrália também estão avançados nesses projetos. A pesquisa sobre essa modalidade energética ainda é incipiente no país, tendo sido objeto por ora apenas de um estudo preliminar do CEPEL/ELETROBRÁS, para avaliação de mercado e identificação de sítios adequados no Nordeste. Desse estudo originou-se o projeto Gerahélio, que conta com financiamento do Banco Mundial (GEF) para lançar as bases da primeira usina do gênero no país. Modelos matemáticos indicam que a região recebe cerca de 2,1 MW/m<sup>2</sup>, valor próximo ao observado na Espanha. A grande desvantagem da energia heliotérmica está no custo, que supera os US\$ 1.000/MWh. Para que se tornasse competitiva pelo menos diante dos geradores a diesel nas áreas remotas e distantes da rede de distribuição, precisaria ter seu custo de produção reduzido à faixa de US\$ 150/MWh. Não se descarta que a pesquisa possa um dia alcançar tal objetivo, razão pela qual existe a

proposta de que o Brasil não se mantenha à margem desse desenvolvimento e destine ao menos uma parte dos recursos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) previstos na Lei No. 9.991 para a construção de uma planta de pesquisa.

Abaixo, tabelas da evolução dos custos da energia elétrica (Tabela 3.3) e comparações entre os custos de fontes instaladas (Tabela 3.4):

**Tabela 3.3 – Projeção do custo da energia elétrica (Fonte: DOE 2003)**

Descrição	1980	1997	Após 2000
Custo (US\$ / kWh)	0,35 ~ 0,40	0,05 ~ 0,07	< 0,04
Vida útil (anos)	5 ~ 7	25 ~ 30	> 30
Faixa de pot. (kW)	50 ~ 150	300 ~ 1.000	500 ~ 2.000

**Tabela 3.4 – Redução de custos verificados e esperados para fontes alternativas de geração de energia elétrica (Fonte: AIE 2002)**

Tecnologia	Custo atual da energia (US\$ / kWh)	Queda do custo nos últimos 10 anos (%)	Estimativa de redução para 10 anos (%)
Biomassa	0,02 ~ 0,15	5 ~ 15	10 ~ 50
Biocombustíveis	0,24 ~ 0,52	5 ~ 10	25 ~ 50
Aquecimento solar direto	0,03 ~ 0,20	30 ~ 60	30 ~ 50
Geração heliotérmica	0,10 ~ 0,25	50	25
Fotovoltaica	0,50 ~ 1,50	40	40 ~ 50
Geração eólica	0,04 ~ 0,10	30 ~ 50	20 ~ 25

Verifica-se pela Tabela 3.4, que o custo unitário de geração para a energia solar é maior em relação aos custos da energia gerada por uma PCH ou biomassa. Porém, o desafio é tornar todas estas fontes alternativas viáveis para aplicações e satisfazer àquelas necessidades estabelecidas.

**Tabela 3.5** – Redução de custos verificados e esperados para fontes alternativas de geração de energia elétrica (Fonte: AIE 2000)

Fonte	Custo unitário total de geração (taxa de retorno de 6% e 30 anos) (US\$ / MWh)
Biomassa	35 ~ 60
Eólica	30 ~ 50
PCH	25 ~ 70
Fotovoltaica	220 ~ 650
Heliotérmica	100 ~ 330

A melhor alternativa é aquela que não gera poluição, renovável ou inesgotável e que seja de fácil implantação e de pouco impacto ambiental.

A energia solar qualifica-se dentro destes critérios, bastando apenas baratear os custos ou de outro ponto de vista, aumentar sua eficiência aumentando-se seu fator de capacidade. Uma vantagem é que os geradores solar são modulares, podendo ser instaladas em diversas regiões. Além de que, as aplicações são diversas:

- Ciclos térmicos: secadores e refrigeração;
- Industrial (caldeiras, cozinhas, lavanderia, etc);
- Destiladores;
- Geração de vapor para turbinas ligadas a geradores;

- Bombeamento;
- Energização em locais afastados de linhas eletrificadas (iluminação, telecomunicações, segurança, cercas elétricas, etc);
- Aquecimento de água;
- Irrigação por canais, microaspersão, gotejamento e hidroponia;
- Sinalização de estradas, passeios, pistas e portos;
- Náutica e veículos;
- Outros.

#### 3.4 – Alternativas selecionadas

- Painel solar de baixo custo;
- Painel solar plano (alimentação aberta / realimentação);
- Painel solar cilíndrico-parabólico ou de foco linear(figura);
- Painel solar parabólico ou de foco pontual;
- Lentes convergentes;
- Células foto-voltaicas.

No Brasil, a energia solar e suas aplicações, ainda são pouco difundidas, se comparado com outros países como Estados Unidos, Austrália, Índia, França, Japão, Alemanha e Israel, que trabalham em diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e comercial do aquecedor solar.

Israel, por exemplo, iniciou seu plano ainda na década de 50 e alcança hoje a invejável marca de 70% das residências com aquecimento solar; lá também, a maioria dos prédios dispõe de coletores solares, e recentemente

uma nova legislação determinou que todos os novos edifícios devem ser construídos já com o equipamento ou prevendo sua incorporação.

Nos Estados Unidos a superfície total de coletores instalados passou de 12.000 m<sup>2</sup> em 1974 para 20.000 m<sup>2</sup> em 1988. No início dos anos 80 havia mais de 100.000 instalações equipadas com coletores solares, das quais a grande maioria para água quente sanitária. Na França, a produção total em 1980 foi de 50.000 m<sup>2</sup>. Segundo Tetsuo, no Japão em 1973, já existiam em funcionamento cerca de 2 milhões e meio de coletores solares de diferentes tipos.

60% da eletricidade consumida para aquecimento de água se concentra no chamado período de ponta (entre 18 e 21 horas). A continuar essa tendência será necessário realizar novos investimentos para construir usinas elétricas.

O aquecimento de água através de chuveiros elétricos é responsável por cerca de 7,0 % de todo consumo nacional brasileiro de energia elétrica, o que significa quase o dobro do que se gasta em todo o país com iluminação pública.

Os painéis solares, além de simples aquecimento de fluido, também podem ser utilizados para produção de vapor para movimentação de turbinas com o objetivo de geração de energia elétrica.

Portanto, percebe-se nitidamente a necessidade de busca por fontes alternativas com apelo econômico e ambiental, encontrados na energia solar estas qualificações cuja captação é realizada através dos diversos tipos de coletores solar das alternativas selecionadas.

## 4. ALTERNATIVAS ESCOLHIDAS

### 4.1 – Coletores solares com concentrador de raios solares

PRICE et al. (1999), citou que a tecnologia do foco linear foi reconhecida por ser comercialmente disponível, mas acreditava-se que o potencial futuro de redução de custo era limitado. Tecnologias como as torres centrais de potência e os coletores parabólicos de foco pontual ou prato tinham um maior potencial de oportunidade para melhorar as suas características e reduzir os custos. Entretanto, muitos estudos pelo DOE (Departamento of Energy) tem reavaliado o potencial tecnológico nos coletores parabólicos de foco linear.



**Figura 4.1** – *Coletor solar parabólico de foco linear (Price – 1999)*

### 4.2 – Projeções de estudos de mercado para coletores solar

As perspectivas de desenvolvimento para a tecnologia do coletor parabólico são (Price, 1999):

- Curto prazo

Os financiamentos estarão focados em estudos e pesquisas onde a energia solar está disponível, visando-se atingir a paridade de custo com a geração convencional de energia e integrar a geração com outras plantas para atender à demanda nos horários de pico de consumo.

- Médio prazo

Oportunidades surgirão devido à necessidade da aplicação relacionada à preservação do meio ambiente. Sem especiais incentivos de financiamento, esta tecnologia atingirá o custo de U\$0,06 ~ \$0,08 / kWh.

- Longo prazo

Coletores parabólicos tornarão competitivos com outras alternativas convencionais de geração de energia, prevendo-se atingir o custo de U\$0,04 \$0,05/ kWh.

#### 4.3 - Tecnologias

##### 4.3.1 – Torres centrais

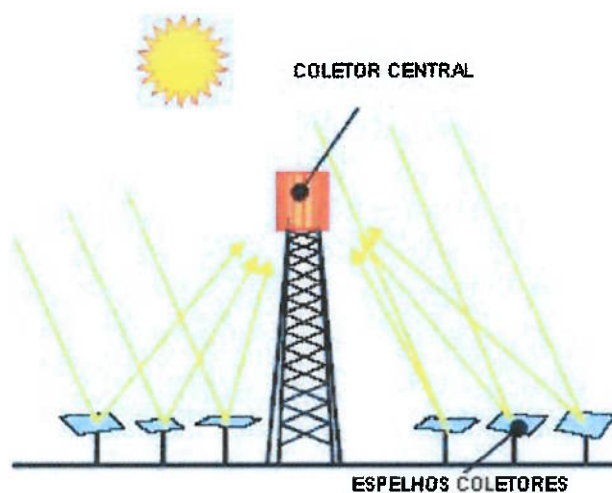
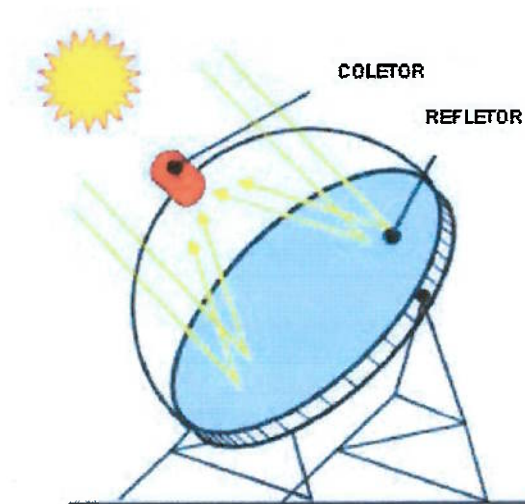


Figura 4.2 – Esquema de coletor solar tipo torre central (Fonte: SolarPACES)



Uma torre central converte a luz do sol em eletricidade limpa. A tecnologia utiliza grandes espelhos para focalizar a luz solar em um receptor no alto de uma torre. Um líquido de transferência de calor aquecido no receptor é usado para gerar o vapor, que por sua vez é usado em uma turbina convencional para produzir a eletricidade. As plantas de torres centrais atuais utilizaram utilizam sal derretido de nitrato devido às suas propriedades de transferência de calor e capacidade térmica do material para armazenamento de energia. Os projetos europeus atuais usam o ar como o meio de transferência de calor por causa de sua alta temperatura. As plantas comerciais individuais serão feitas sob medida para produzir em qualquer lugar uma faixa de 50 a 200 MW.

#### 4.3.2 – Coletor parabólico de foco pontual

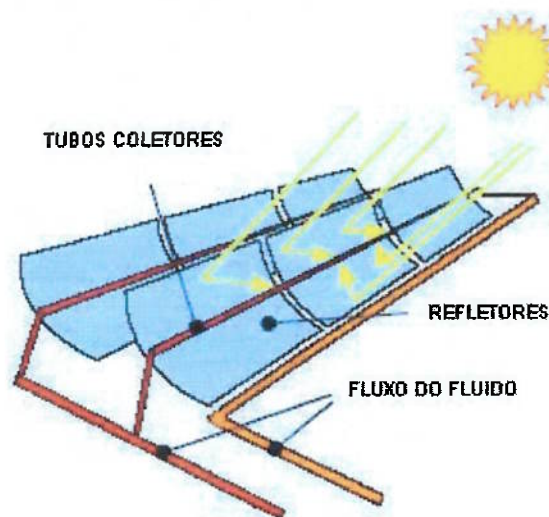


**Figura 4.3 – Esquema de coletor solar parabólico de foco pontual (Fonte: SolarPACES)**

O coletor parabólico de foco pontual (tipo prato) consiste em um refletor que concentra os raios solares em um foco pontual montado em uma estrutura

com sistema de rastreamento biaxial para seguir o sol. O calor coletado é utilizado, normalmente, por um motor de calor montado no receptor que move-se com a estrutura do prato. Os motores de ciclo Stirling e de Brayton são os mais utilizados atualmente. Os projetos de sistemas modulares tem capacidade de gerar até 5 MW, sendo que cada módulo corresponde a aproximadamente 50 kW. Consegue-se pico de eficiência de até 30%.

#### 4.3.3 – Coletor parabólico de foco linear



**Figura 4.4 – Esquema de coletor solar parabólico de foco linear (Fonte: SolarPACES)**

Concentradores parabólicos cilíndricos foram talvez os mais estudados experimentalmente, e há várias instalações no mundo. Atualmente, esta tecnologia também é a mais validada devido a nove plantas comerciais de grande escala, sendo as primeiras em operação no deserto da Califórnia desde 1984. Estas plantas continuam a operar sobre uma base diária que varia de 14 MW a 80 MW, representando um total de 354 MW de capacidade elétrica

instalada. Fornecem energia térmica para produção de vapor para um ciclo turbina/gerador Rankine.

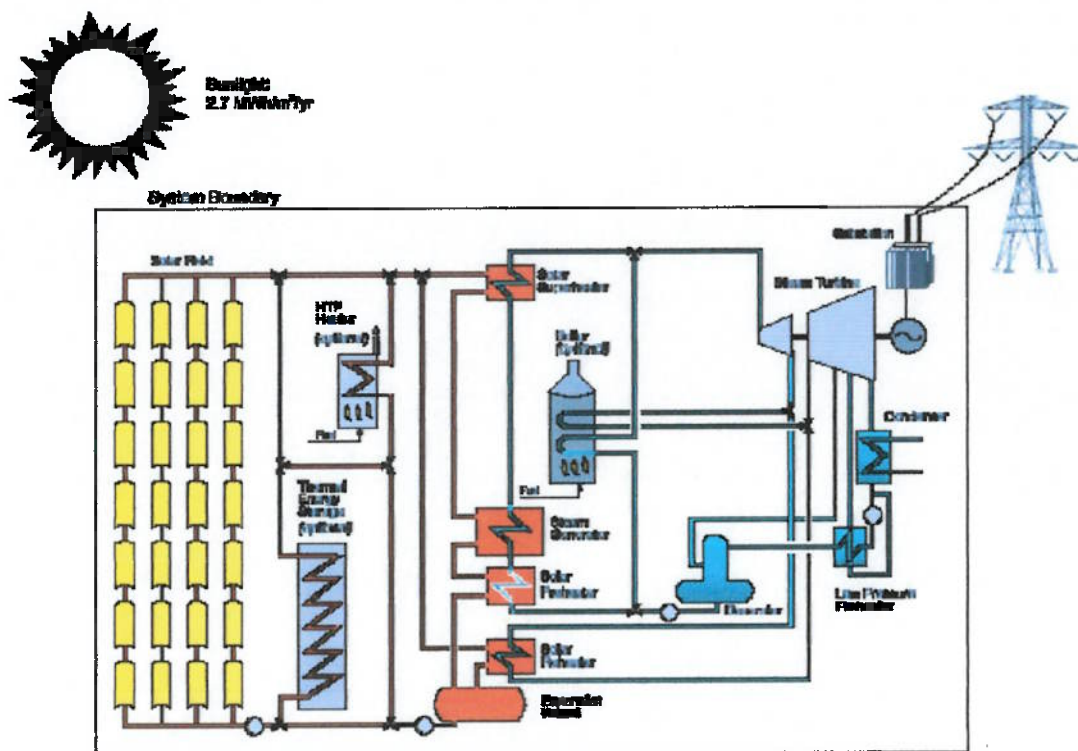


Figura 4.5 – Coletor solar parabólico em ciclo Rankine (Fonte: SolarPACES)

#### 4.4 – Plantas de sistemas solar instaladas e evolução dos custos

Apesar de todas as novas plantas SSGE (Sistemas Solar de Geração Elétrica) continuem a operar, nenhuma outra foi construída desde 1991 (SolarPACES, 2005). Durante a construção destas plantas, reduções significativas de custos da eletricidade gerada foram atingidas satisfatoriamente (de U\$0,24 para U\$0,08).

A evolução dos coletores parabólicos mais representativos e das maiores plantas de Sistema Solar de Geração Elétrica (SSGE) estão dispostas a seguir:

**Tabela 4.1 – Evolução dos Sistemas Solar de Geração Elétrica (Fonte: SolaPACES)**

Coletor	Ano	Área (m²)	Temperatura de operação (°C)	Potência (MW)
Acurex 3001	1981	34	295	
M.A.N. M480	1984	80	307	
Luz LS-1	1984	128	307	
Luz LS-2	1985 ~ 1988	235	349 ~ 390	
Luz LS-3	1989	545	390	
SSGE Planta I	1985	82.960	307	13,8
SSGE Planta II	1986	190.338	316	30
SSGE Planta III e IV	1987	203.300	349	30
SSGE Planta V	1988	250.500	349	30
SSGE Planta VI	1989	188.000	390	30
SSGE Planta VII	1989	194.280	390	30
SSGE Planta VIII	1990	464.340	390	80
SSGE Planta IX	1991	483.960	390	80

#### 4.5 – Argumentos para investimentos em coletores solar

De um modo geral, o crescimento econômico e a proteção ao meio ambiente serão os principais motivadores de mudanças/crescimento no setor energético; um fato que aparece com grande importância, manter a concentração de carbono na atmosfera, por exemplo, em 550 ppm, exigirá que grande parte da “nova” geração seja livre de Carbono, e que haja um forte aumento na eficiência de uso de combustíveis fósseis. Embora o caminho até 2020 seja essencialmente evolucionário (GN e Carvão), a partir daí a participação de novas tecnologias deverá crescer significativamente.

Sustentabilidade será o conceito mais utilizado nestas mudanças; a sugestão é que sejam buscados aumentos de produtividade e redução de emissões e 2% ao ano, globalmente, em todas as áreas. Isto já exigiria um grande esforço de inovação e difusão tecnológica. Por exemplo, na área de energia elétrica, os maiores desafios (globais) a curto prazo são: o uso mais eficiente de carvão e a disseminação de geração distribuída e armazenamento. Ainda na área de transmissão e distribuição de energia, é muito importante considerar os sistemas isolados, onde o desenvolvimento deve ser empreendido usando tecnologias de geração distribuída, com ênfase em sistemas com potência entre 1kW e 15MW, empregando tecnologias de geração com pequenas turbinas a gás, geração com motores de combustão interna, geração com células a combustível, geração com PCH's, geração eólica, geração solar, geração solar fotovoltaica e geração híbrida (PV ou turbinas a gás mais células a combustível e outros motores).

Muito embora a energia solar termelétrica não tenha tido grandes aplicações, é recomendável manter estudos sobretudo em tecnologias mais promissoras em início de operação na Europa e nos EUA, focalizando materiais (óticos, fluidos de trabalho), sistemas de rastreamento, sistemas de armazenagem térmica e melhoria de aquisição de dados solarimétricos (radiação direta, séries temporais especialmente) para regiões de maior potencial.

O uso de energia solar para aquecimento a baixas temperaturas já é feito com tecnologias comerciais em todo o mundo, especialmente para o aquecimento de água. É também utilizado para processos de secagem e refrigeração (sistemas de absorção). As tecnologias utilizam, em sua maior

parte, coletores solares planos fechados ou abertos dependendo da temperatura desejada.

A oferta interna de energia em 2004 foi de 183 Mtep (com a energia elétrica computada pelo equivalente “calórico”, 1 Kwh = 860 kcal; pela equivalência “térmica”, foi de 253 Mtep), distribuída do seguinte modo:

**Tabela 4.2 – Oferta de energia elétrica no Brasil (Fonte: Salles 2004)**

Energia	Tipo	%
Não-renovável (58,4%)	Petróleo e derivados	46,7
	Gás natural	4,1
	Carvão mineral e derivados	6,9
	Urânio e derivados	0,7
Renovável (41,6%)	Hidráulica e eletricidade	14,6
	Lenha e carvão vegetal	11,6
	Derivados da cana	13,4
	Outras fontes primárias	2,0

A taxa de crescimento da população é inversamente proporcional ao PIB (Tabela 4.3), sendo que a demanda de energia para consumo tende a acompanhar o crescimento do país devido ao crescente aumento de consumo de produtos industrializados, além de maior gasto de energia em facilidades para o bem estar (ar condicionado, eletrodomésticos, entretenimento, luz, etc).

**Tabela 4.3 – Taxa de crescimento projetada (Fonte: Salles 2004)**

Período	PIB (%)	População
2001~2006	4,6	1,3
2006~2010	4,8	1,2
2011~2020	5,1	1,0

A capacidade instalada cresceu 5% ao ano (1993-1998); há cerca de 400MWe instalados, com fator de capacidade 20-35%; investimentos estavam entre US\$ 3 a 4 mil / kW, com custos de energia entre US\$ 0,12 a 0,18/kWh, e a projeção para o futuro era US\$ 0,04 a 0,10/kWh.

Portanto, haverá grande oportunidade para investimentos em plantas híbridas para suprimento principalmente nos picos de consumo. A tendência é que a oferta de energia de fontes renováveis ultrapasse as não-renováveis.

#### 4.6 – Energia solar no Brasil

Cavalcanti et al. (1999) citou que no Brasil não houve instalações experimentais, mas destaca-se um estudo conduzido pelo CEPEL – Eletrobrás (Gera-hélio) analisando condições locais (radiação direta) e tecnologias, buscando obter custos de geração no Brasil.

Resultados indicam investimentos de US\$ 2,6/W (cilindro-parabólicos); US\$ 4,5/W (torre central) e US\$ 12/W (parabólico). Estes valores correspondem a custos de energia muito acima dos valores comerciais hoje.

O Brasil possui cerca de 1,5 milhão de m<sup>2</sup> de coletores solares em 2002. Esse setor possui grande potencial para expansão no país e os principais desenvolvimentos deverão se feitos compreendendo as seguintes áreas:

- Redução de custos: manufatura, materiais, qualidade da automação;
- Aumento da eficiência de conversão: películas, tintas, isolamento, novas coberturas;
- Análise de componentes / sistemas completos;
- Novos tipos de coletores (tubos evacuados, concentradores estáticos);

## 5 – ESCOLHA DA MELHOR ALTERNATIVA

### 5.1 – Melhor alternativa

O coletor cilíndrico parabólico (foco linear) foi escolhido para desenvolvimento e estudo devido ao vasto material disponível. Além disso, oferece a faixa de potência desejada para a aplicação desejada, que é a geração de vapor para turbinas para produção de energia elétrica. Apesar do custo da energia ser a mais baixa entre os sistemas coletores de energia solar (Tabela 5.1), o enfoque é continuar com estudos para propor, estudar e otimizar os atuais sistemas, pois a perspectiva é reduzir os custos na ordem de 30% a 50% num prazo de 10 anos e aumento de eficiência de 10% para 18% neste mesmo período, ou seja, há grande margem para desenvolvimento. A construção de um protótipo fornecerá dados para suporte às pesquisas futuras.

**Tabela 5.1** – Características das principais fontes heliotérmicas (*Fonte: Cavalcanti et al 2004*)

Descrição	Cilíndrico parabólico	Torre central	Parabólico tipo prato
Radiação solar mínima (W/m <sup>2</sup> )	300	300	300
Faixa de potência (MW)	30 ~ 40	30 ~ 200	0,010 ~ 0,050
Temperatura de operação (°C)	200 ~ 500	500 ~ 1.000	500 ~ 1.200
Custo investimento (US\$ / kW)	2.800 ~ 4.500	1.100 ~ 4.800	6.000 ~ 10.000
Custo energia (US\$ / MWh)	60 ~ 130	120 ~ 185	270 ~ 330
Eficiência de pico (%)	21	23	29
Eficiência global (%)	10 ~ 12	14 ~ 19	18 ~ 23



- 
- Suporte de engenharia a projetos: softwares, contratos de desempenho;
  - Demonstração no sistema de habitação; pré-aquecimento industrial, hotéis, escolas, etc;
  - Capacitação de profissionais.

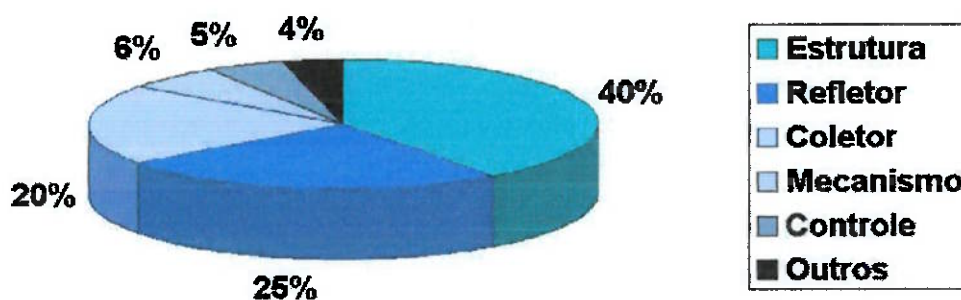
No entanto é recomendável manter os estudos nas tecnologias, principalmente quanto aos sistemas novos em início de operação na Europa e EUA (por exemplo, uma planta de SSGE de 50 MW instalada em Nevada, Estados Unidos, com início da operação em março de 2005). Pontos onde a P&D se faz necessária são os mesmos que no exterior:

- Materiais (óticos; fluidos de trabalho);
- Sistemas de rastreamento;
- Sistemas de armazenagem térmica;
- Complementação dos dados solarimétricos para as regiões de maior interesse: radiação direta, e suas séries temporais.

## 5.2 – Componentes de coletores solar parabólico

SolarPaces (2005) descreve que projeções de custo para coletores parabólicos são baseados nas experiências dos Sistemas Solar de Geração Eletricidade (SSGE) e em função da competitividade do mercado gerador de energia. Recentes pesquisas e estudos desses projetos custam cerca de US\$2.000 / kW (se for o Sistema Solar de Ciclo-Combinado e Integrado, o custo médio é cerca de US\$850 / kW). Particularmente, os custos dos os campos solares nos quais são atualmente implementados, o custo é de aproximadamente US\$215 / m<sup>2</sup> instalados.

Os itens que compõem os custos de um coletor solar são: estrutura, superfície refletora, controles, mecanismos, tubo coletor e outros. Note que 85% do custo é representado pela estrutura, coletor e superfície refletora (Figura 5.1). Portanto, os esforços para redução de custos são concentrados nestes itens.



**Figura 5.1** – Estrutura de custos de um coletor solar parabólico (Fonte: SolarPACES)

### 5.2.1 – Refletor

A face espelhada utilizada atualmente tem uma excelente refletividade. Apesar de apenas significar 1% no custo da manutenção, torna-se relevante por haver um grande número de painéis em um campo solar. A atual refletividade dos espelhos – cerca de 94% - pode ser mantida pela lavagem com água desmineralizada e a corrosão do filme de prata não tem sido crítico em ambientes desérticos. Porém, os métodos de fixar os espelhos nas estruturas não estão bem desenvolvidos, especialmente em condições de ventos fortes.

### 5.2.2 – Tubo coletor

O tubo coletor tem uma grande influência na eficiência do coletor solar parabólico. O mais novo tubo coletor está implementado em uma planta de Sistema de Geração Solar de Eletricidade, denominado Elemento Coletor de Calor (ECC). As superfícies selecionadas e os materiais são excelentes, porém o vácuo nos tubos para minimizar perdas por convecção tem tornando-se crítico devido ao grande período da baixa pressão. A manutenção acaba se elevando para se conseguir monitorar o vácuo através de sistemas indicadores.

### 5.2.3 – Estrutura

A estrutura de sustentação de coletores solar parabólico de foco linear é um item importante pois a sua participação no custo final é relevante. Devido ao peso das superfícies refletoras, normalmente espelhos, e às elevadas

cargas de esforços a que são submetidas (ventos, principalmente), diversos estudos são dedicados para torna-los mais robustos e leves.

### 5.3 – Oportunidades para redução de custos

#### 5.3.1 - Tamanho da planta instalada

Aumentar o tamanho da planta é a forma mais fácil de reduzir custo. Estudos demonstram que dobrando o tamanho da planta, a redução do custo é de aproximadamente 12%~14%. Consegue-se este resultado devido à diluição do custo fixo do processo, manutenção e operação.

#### 5.3.2 - Tecnologia do coletor

A estrutura de um coletor solar parabólico constitui cerca de 40% do custo, enquanto os refletores e coletor custa cada um, 20% e 25% do total, respectivamente. Atualmente, aço fornece a maior rigidez para a estrutura com finos painéis de espelhos para os refletores. Alternativas mais baratas são a possibilidade de se utilizar alumínio na estrutura ou um estrutura integrada com o próprio refletor.

#### 5.3.3 - Geração direta de vapor (GDV)

Vapor é gerado diretamente no coletor parabólico em GDV. Este método otimiza o processo por eliminar a necessidade de transferir o calor do fluido e reduzir a ineficiência da perda envolvendo esta troca de calor para geração de vapor. GDV também pode ser melhorado devido à menor temperatura de operação solicitada e maior temperatura gerada diretamente no coletor. São necessários desenvolver outra estrutura para operar em uma pressão maior.

Há um projeto piloto da tecnologia GVD em andamento na Plataforma Solar de Almeria, Espanha.

#### 5.4 – Outras tecnologias

##### 5.4.1 - Coletor Solar Tipo Parabólico Utilizando Tubos de Calor com Telas Sintetizadas como Absorvedor

Tubos de coletor de calor foram fabricados de acordo com os estudos realizados (Pamieri, 1999) , nos quais a tela foi sintetizada na superfície interior do tubo, fazendo com que a absorção de calor fosse maior do que a captada pelo modelo tradicional.

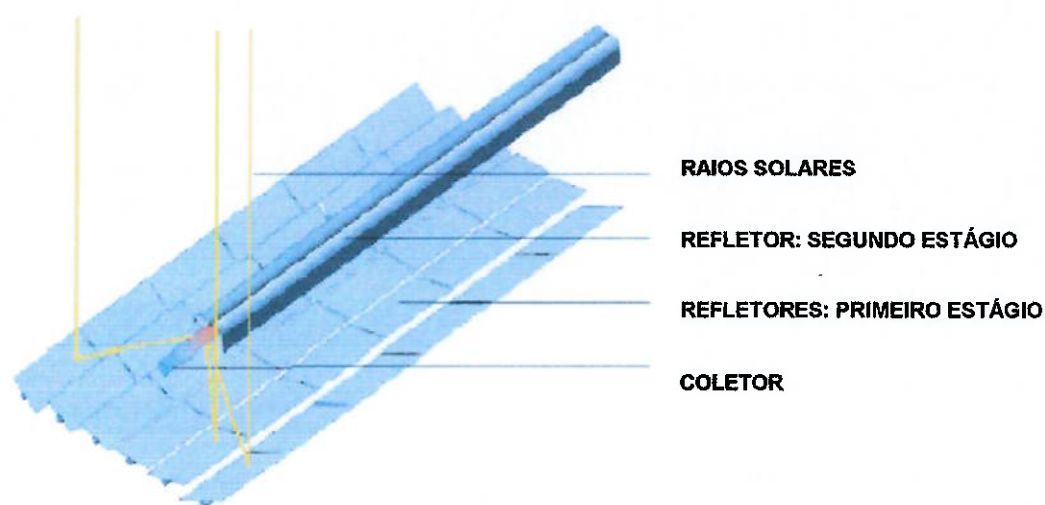
Em um estudo anterior, tubos de calor foram usados como absorvedores de energia solar, construídos utilizando telas metálicas como meio poroso, fixadas em seu interior por ação de molas. Resultados demonstraram um aumento médio de 62% no rendimento global desse tipo de coletor em relação ao tradicional. O trabalho de Palmieri (1999) inovou com a utilização da tela sinterizada (soldada) na superfície interior do tubo, obtendo uma eficiência 20% maior em relação à pesquisa desenvolvida anteriormente.

##### 5.4.2 - Coletor com dois estágios de concentradores

O conceito deste tipo de coletor não é novo, porém estudos e pesquisas estão se intensificando a partir do coletor denominado Solarmundo tipo Fresnel, cujo protótipo de 2.500 m<sup>2</sup> foi construído na Bélgica.

###### a) Princípio dos coletor Fresnel Solarmundo

Harbele (2002) publicou que um campo de vários módulos de refletores concentram o feixe de raios solares para um coletor de vários metros de comprimento. Este coletor contém um segundo estágio de refletor parabólico que por sua vez, concentram a radiação solar proveniente do primeiro estágio, para um coletor tubular.

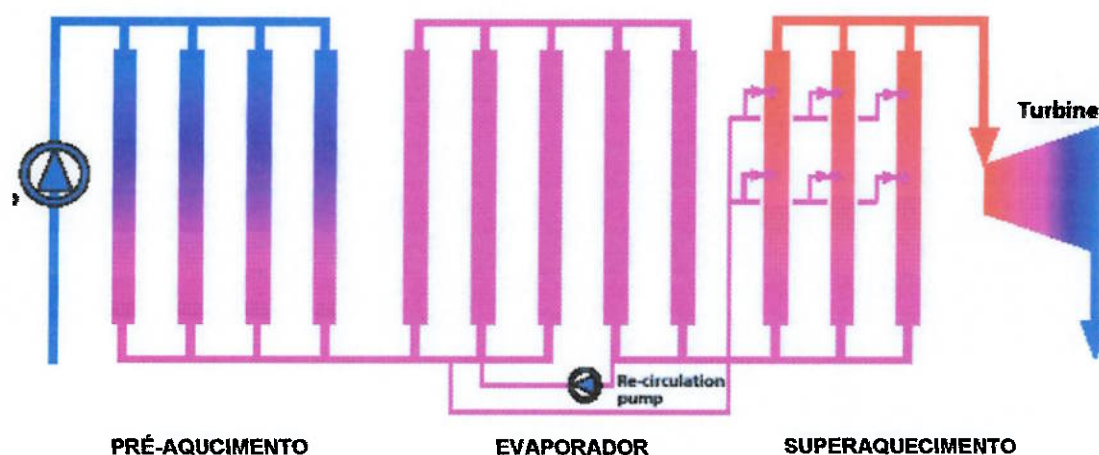


**Figura 5.2 – Coletor Fresnel (Fonte: SolarPACES)**

Cada espelho do refletor do primeiro estágio tem comprimento de 0,5 m e não são completamente planos, ou seja, tem uma pequena curvatura. São constituídos de 48 colunas de espelhos, resultando em um coletor de 24 m de comprimento total.

O concentrador do segundo estágio amplia o alvo, aumentando o campo angular de absorção. Sua parte traseira é revestida por uma cobertura absorvedora opaca e em sua parte posterior, uma placa de vidro reduz perdas de calor por convecção.

Para geração de 50 MW são necessários 12 fileiras de coletores de 1000 m de comprimento cada um, divididos em pré-aquecimento, evaporador e superaquecimento.



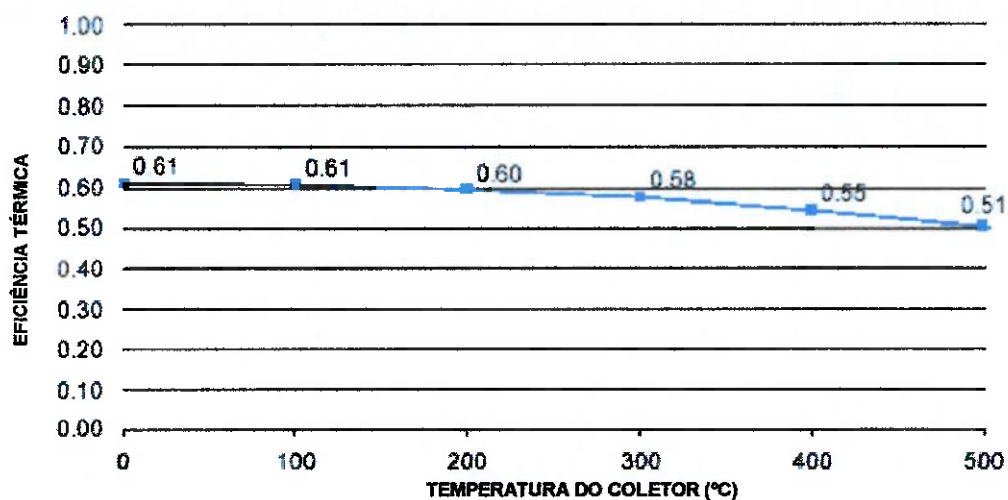
**Figura 5.3 – Planta de um campo de coletores para geração de 50 MW (Fonte: SolarPACES)**

As principais vantagens do coletor Solarmundo, comparadas aos coletores parabólicos cilíndricos, são:

- refletores mais baratos por serem planos;
- sistema de rastreamento simples e mais barato pois os refletores são menores e mais leves;
- tubo coletor sem a necessidade de junções de alta pressão e nenhuma curva para expansão térmica;
- nenhuma tecnologia para geração de vácuo;
- devido à forma plana dos refletores e serem dispostos em módulos de pequenas dimensões, as cargas solicitadas devido ao peso e ao vento são reduzidas, refletindo na redução do custo da estrutura de suporte;
- devido à geração direta de vapor, nenhum trocador de calor é necessário.

De acordo com Harbele (2002), o coletor Solarmundo resulta em uma redução de custo de aproximadamente de 50% em relação aos coletores parabólicos cilíndricos, considerando-se o coletor, sua estrutura e os processos envolvidos como operação e manutenção mais baratas. Não foi considerada a redução em função da economia de escala, ou seja, o barateamento do custo em função da produção em série.

A figura a seguir mostra o resultado da eficiência para uma radiação vertical de  $800 \text{ W/m}^2$  em temperatura ambiente de  $30^\circ \text{C}$ .



**Figura 5.4** – Eficiência de um coletor de dois estágios (Fonte: SolarPACES)

O trabalho conclui que o coletor de dois estágios possui aproximadamente 70% do desempenho térmico de um coletor parabólico cilíndrico para a área de cobertura considerada. Entretanto, este resultado pode ser compensado pelo valor mais baixo de investimento na sua construção, menor custo de operação e manutenção. Os estudos para melhorar a eficiência continuam em andamento.



## 6 – DESENVOLVIMENTO

### 6.1 - Levantamento da irradiação solar

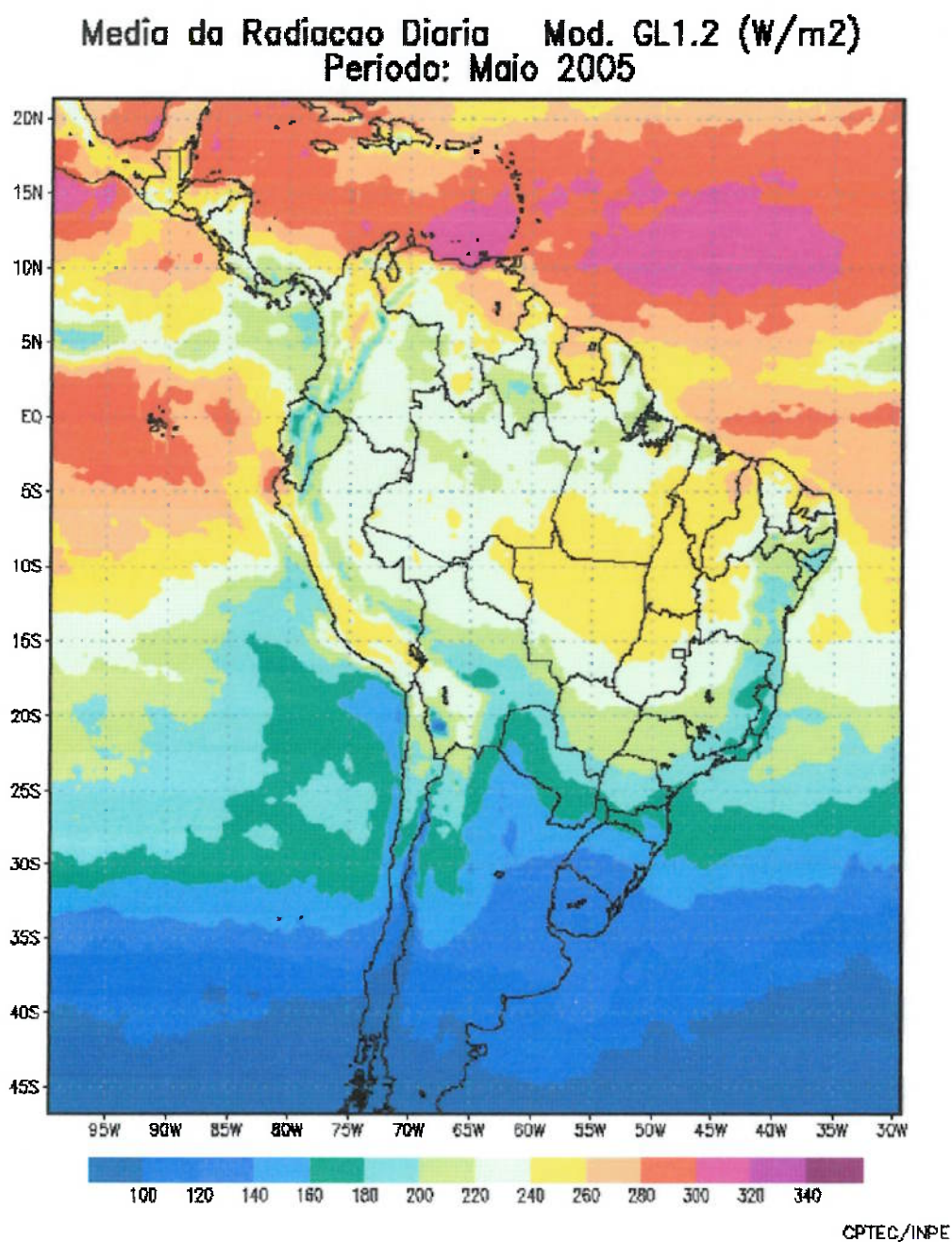
Inicialmente, o conhecimento da radiação solar recebida é necessária para saber o aproveitamento da energia solar envolvida no projeto.

Este estudo é demorado e exige um monitoramento contínuo durante alguns anos a fim de determinar a viabilidade de um projeto de maior envergadura.

Xavier (2003) descreve que a radiação solar global que incide sobre a terra sofre várias reflexões, dispersões e absorções até atingir a superfície terrestre. A radiação global possui uma componente difusa e uma direta, sendo esta última a que mais nos interessa. A componente difusa chega de todos os lados do céu não tendo uma direção definida, e por isso, não chega a ser aproveitada no concentrador. A radiação direta vem direto do sol sofrendo apenas refração atmosférica, portanto, possui uma direção conhecida sendo utilizada no concentrador.

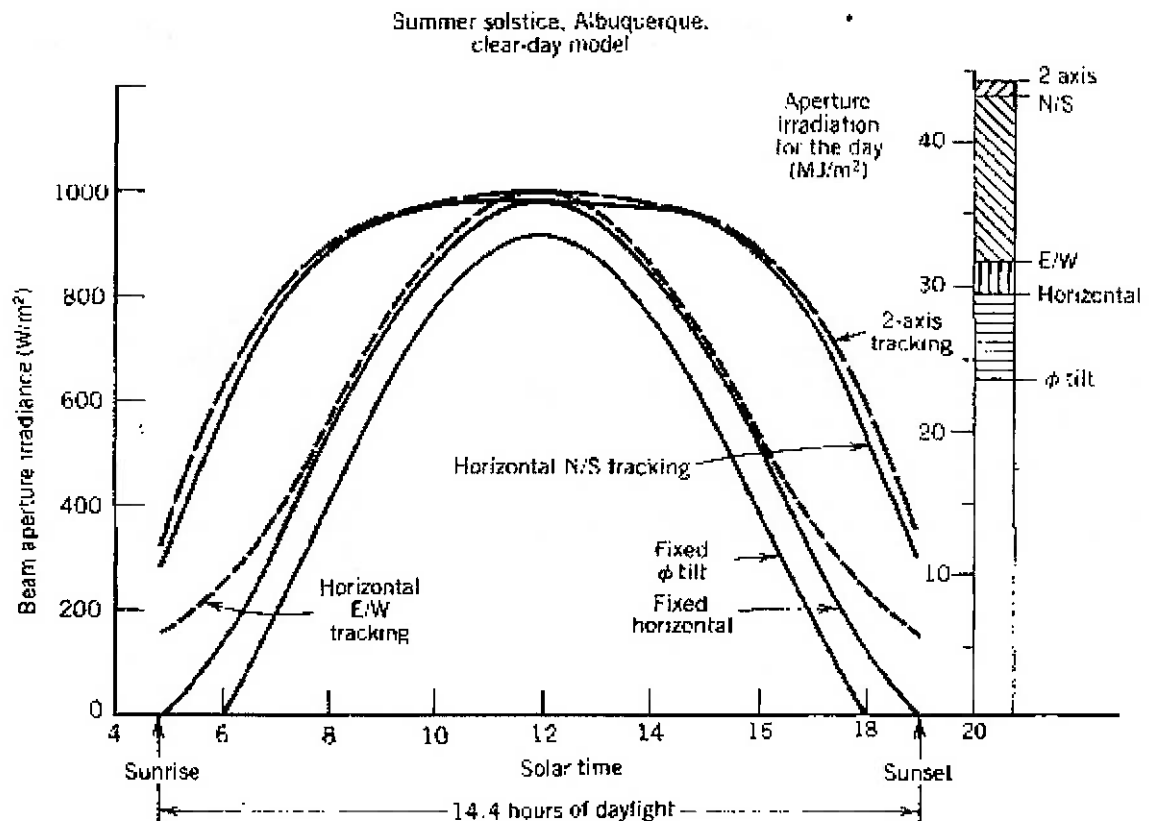
Os dados sobre radiação solar podem ser conseguidos através de medidas diretas por estações radiométricas, através de medições feitas por satélites geoestacionários ou através de equações que relacionam radiação global, difusa e insolação.

A figura 6.1 mostra o mapa da média diária de radiação solar recebida na América do Sul, referente ao mês de maio de 2005.



**Figura 6.1** – Mapa da média de radiação diária solar na América do Sul (Fonte: CPTEC / INPE)

Há uma carência de banco de dados sobre radiação solar no Brasil (encontra-se algumas fontes referentes aos Estados Unidos e Europa). Uma distribuição de irradiação solar encontrado nas pesquisas está na figura a seguir:

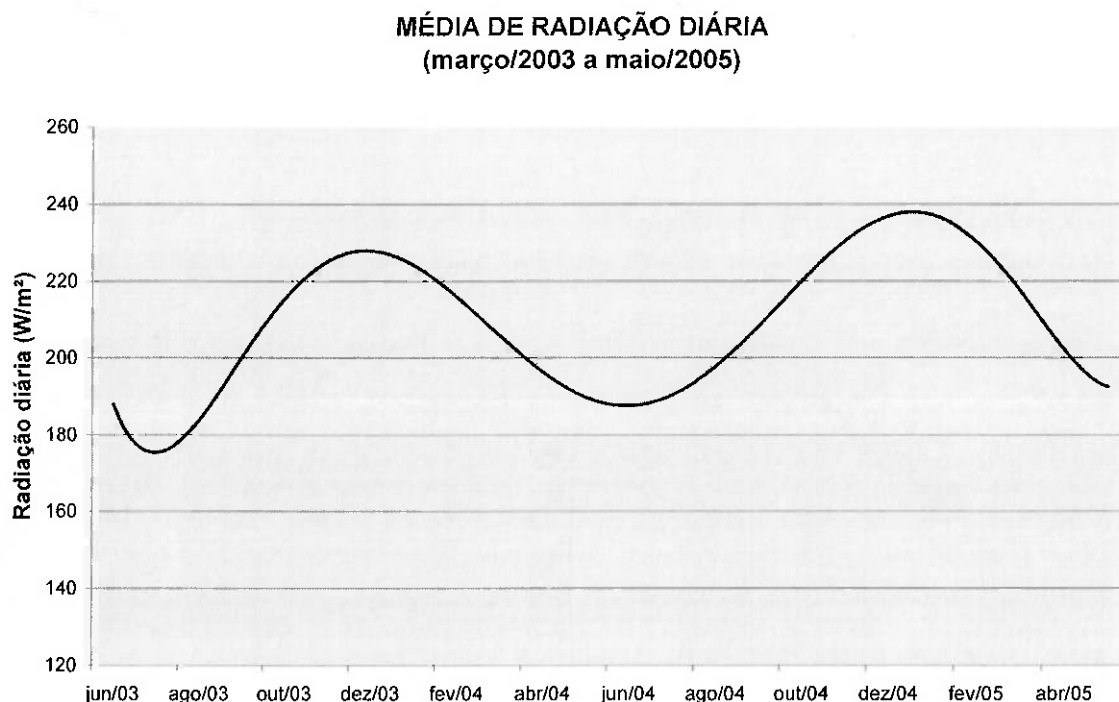


**Figura 6.2** – Distribuição ao longo do dia (Fonte: SolarPACES)

Como as experiências e testes do protótipo serão na cidade de São Paulo, foi levantado a variação da radiação solar da região da Mata Atlântica do Estado de São Paulo do período de junho de 2003 até maio de 2005 (CPTEC / INPE – 2005).

Percebe-se uma variação sazonal da radiação ao longo do ano devido às estações do ano. Nas estações de inverno, a radiação registrada fica em torno de  $170 \sim 190 \text{ W/m}^2$ , e nas estações mais quentes, verão, registrou-se média de  $230 \sim 240 \text{ W/m}^2$ .

Os picos máximos e mínimos deste período são de  $280 \text{ W/m}^2$  (set/04 e fev/05) e  $140 \text{ W/m}^2$  (mai/04), respectivamente.



**Figura 6.3** – Variação média da radiação ao longo do ano para a região da Mata Atlântica do Estado de São Paulo (Fonte: CPTEC / INPE)

Para o dimensionamento do coletor é necessário o valor de irradiação de pico do dia. Desta forma, esse valor deverá ser levantado de maneira indireta com os dados disponíveis até o momento, ou seja, tem-se a média diária do ano e a curva de distribuição ao longo do dia. Com estas informações, um modelo seria criado para calcular a área de uma curva de distribuição diária de modo que o resultado desse a média diária e obtem-se o pico do dia.

Uma outra alternativa foi encontrada nas pesquisas realizadas.

## 6.2 – Distribuição da irradiação solar ao longo do dia

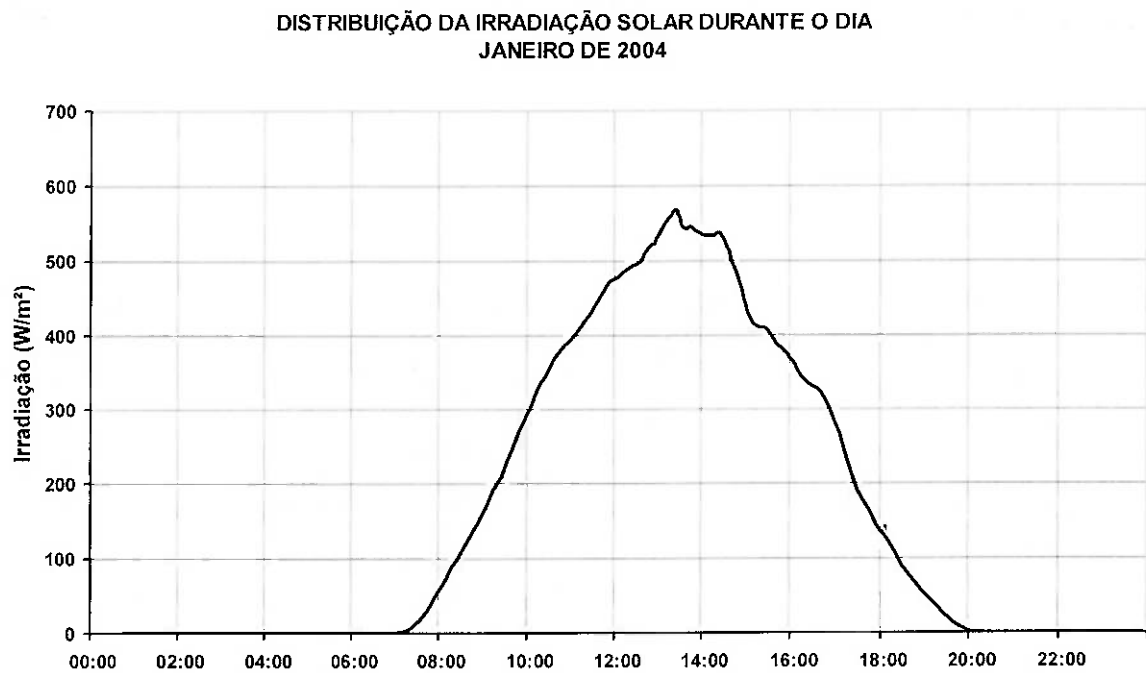
Registros de medições de irradiação diária ( $\text{W/m}^2$ ) coletados em intervalos de 10 minutos foi levantado a partir de um banco de dados disponibilizado no site [www.webbee.com.br](http://www.webbee.com.br). O local das medições foi na

Cidade Universitária – USP – na cidade de São Paulo. Através do site, levantou-se uma listagem dessas medidas referentes ao ano de 2004 com 17.125 registros, conforme exemplo da tabela a seguir:

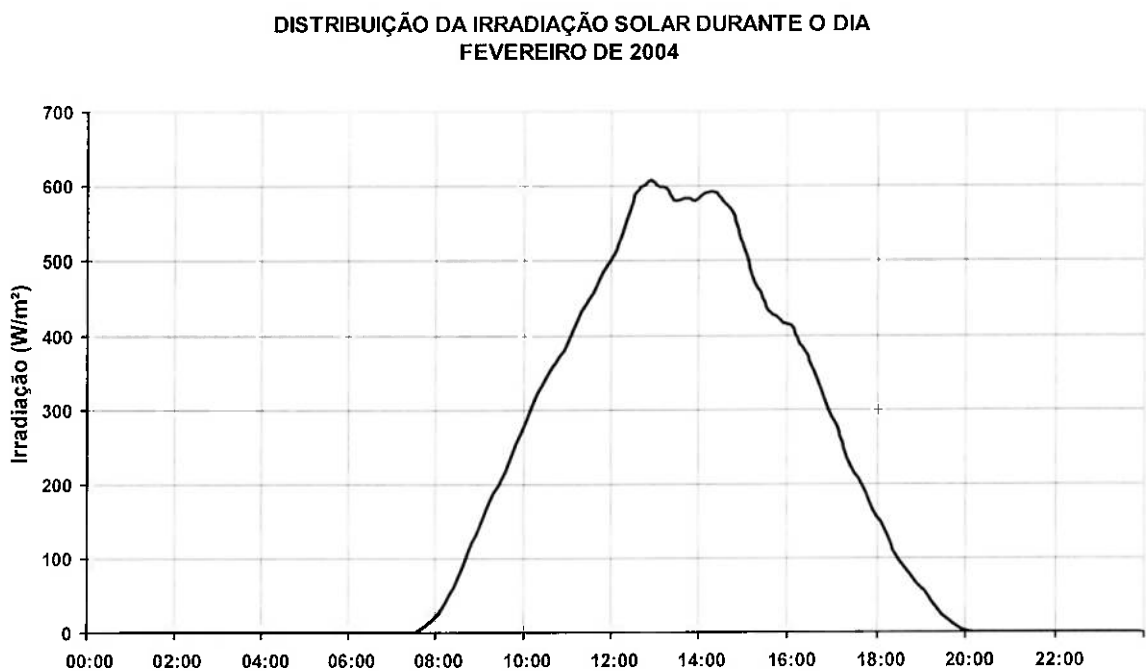
**Tabela 6.1** –Registros diários de irradiação solar(*Fonte: Webbee*)

nº registro	data	intervalo	W / m <sup>2</sup>
1	1-jan-04	00:00	0
2	1-jan-04	00:10	0
3	1-jan-04	00:20	0
4	1-jan-04	00:30	0
5	1-jan-04	00:40	0
6	1-jan-04	00:50	0
7	1-jan-04	01:00	0
8	1-jan-04	01:10	0
11104	24-mar-04	11:20	253
11105	24-mar-04	11:30	448
11106	24-mar-04	11:40	737
11107	24-mar-04	11:50	424
11108	24-mar-04	12:00	218
11109	24-mar-04	12:10	629
11110	24-mar-04	12:20	471
11111	24-mar-04	12:30	222
11112	24-mar-04	12:40	396
11113	24-mar-04	12:50	441
11114	24-mar-04	13:00	548
16514	3-set-04	22:40	0
16515	3-set-04	22:50	0
16516	3-set-04	23:00	0
16517	3-set-04	23:10	0
16518	3-set-04	23:20	0
16519	3-set-04	23:30	0
16520	3-set-04	23:40	0
16521	3-set-04	23:50	0
16522	4-set-04	00:00	0

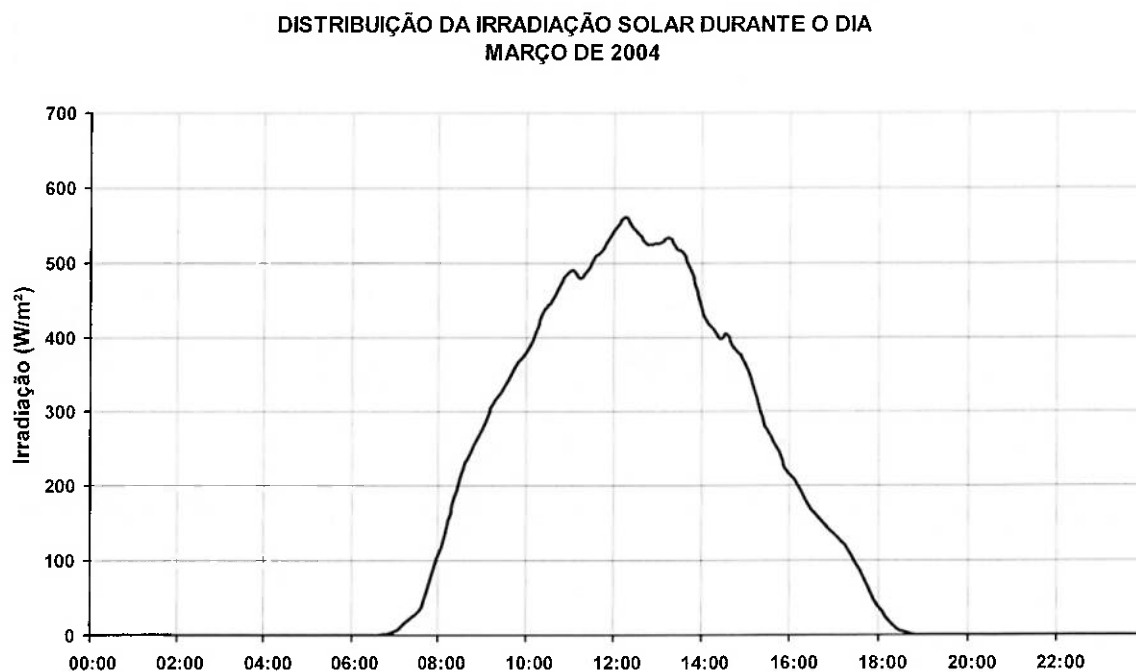
A partir destes dados, fez-se um tratamento de dados em planilha Excel e utilizando macros, os valores coletados foram agrupados no mesmo horário de cada mês para se obter a média ao longo do dia em intervalos de 10 minutos, cujos gráficos estão abaixo:



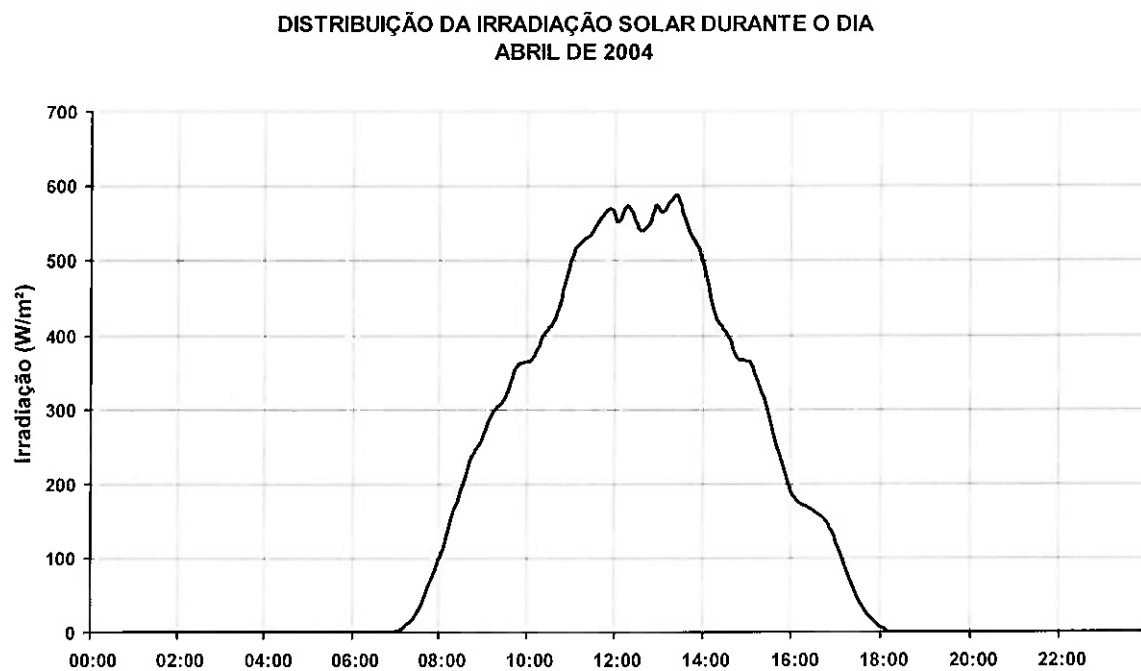
**Figura 6.4** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de janeiro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)



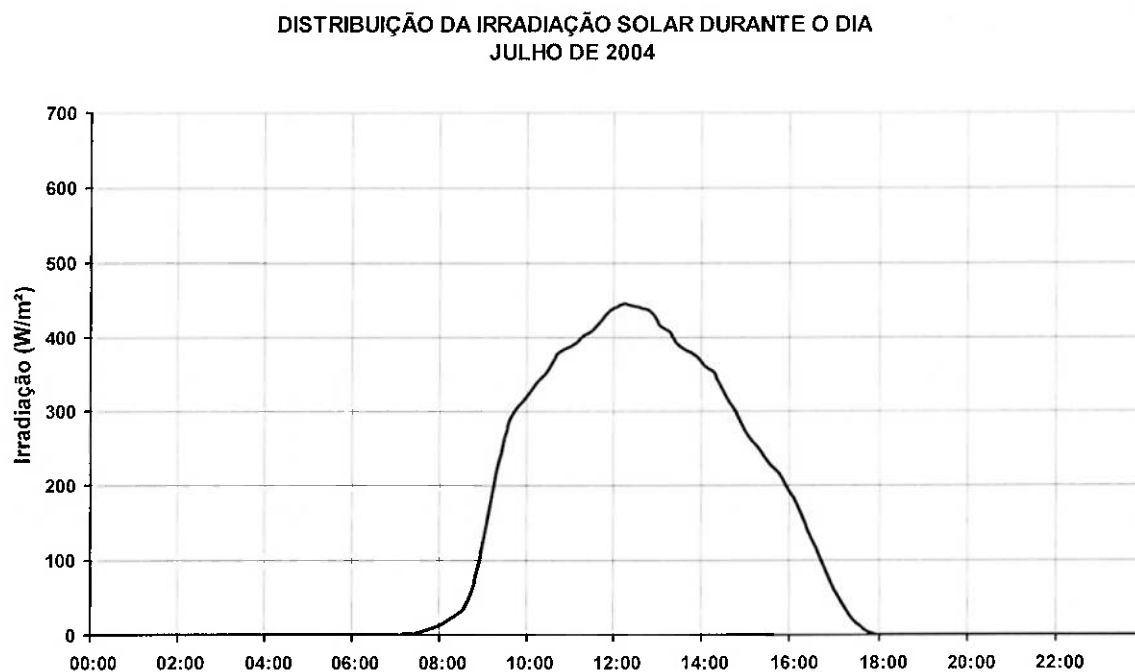
**Figura 6.5** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de fevereiro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)



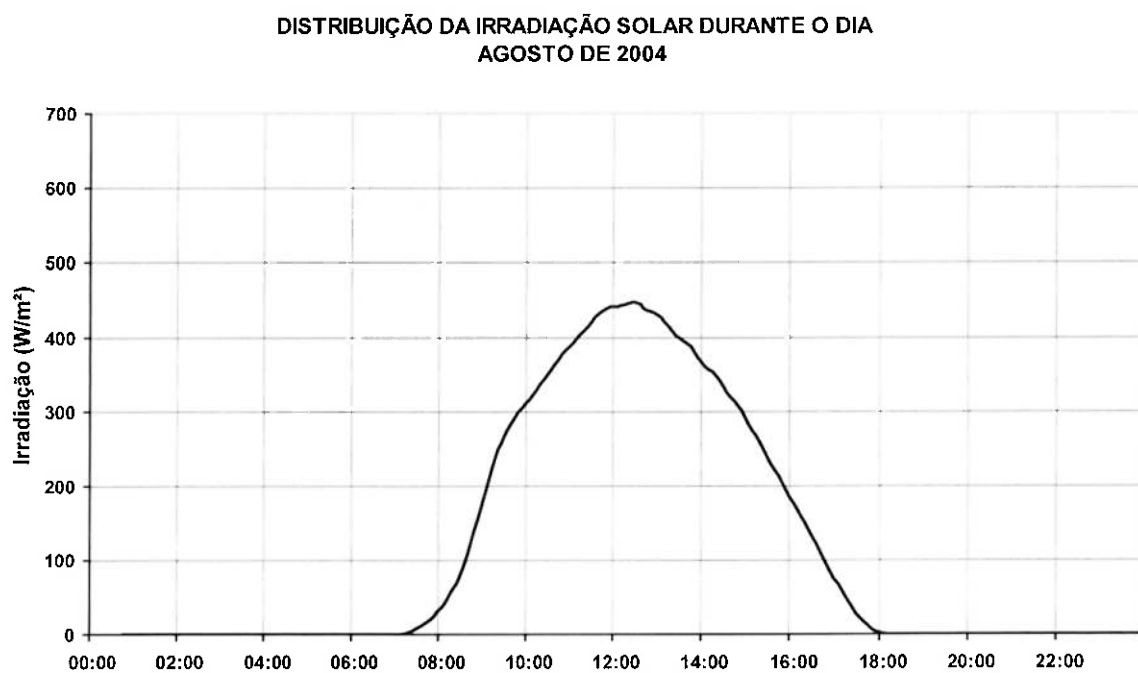
**Figura 6.6** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de março na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)



**Figura 6.7** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de abril na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)

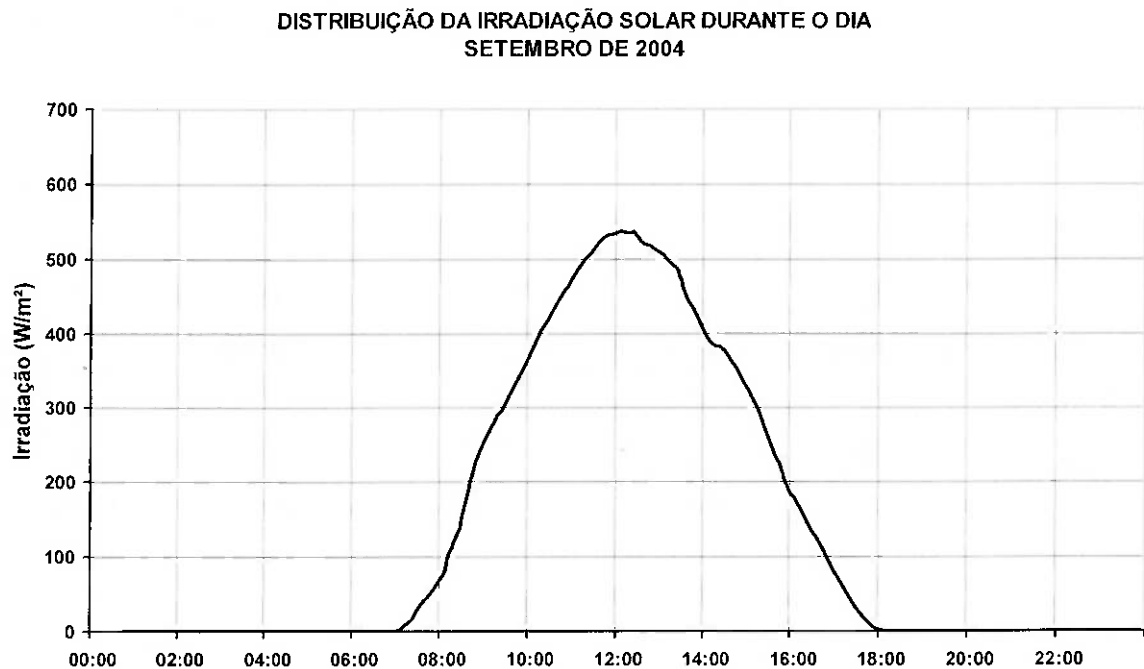


**Figura 6.8** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de julho na cidade de São Paulo  
– 2004 (fonte: Weebbee)



**Figura 6.9** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de agosto na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)





**Figura 6.10** – Média da irradiação solar ao longo do dia no mês de setembro na cidade de São Paulo – 2004 (fonte: Weebbee)

Por algum motivo, as medições coletadas nos meses de outubro a dezembro foram esparsos, cujos picos de valores atingiu valores de  $845 \text{ W} / \text{m}^2$  nos meses de verão. Portanto não foi possível plotar os gráficos com os dados disponíveis.

## 6.2 – Dimensionamento do coletor solar parabólico

### 6.2.1 - Utilizando Transferência de Calor – Escoamento interno com fluxo térmico constante

$$T_{m,s} = T_{m,e} + \frac{q_{tubo}}{m c_p} \quad (1)$$

$$q_{tubo} = \rho \cdot G \cdot A_{abertura \text{ coletor}} \quad (2)$$

Tabela 6.2 – Cálculo de dimensionamento do coletor solar

**COLETOR SOLAR PARABÓLICO - DIMENSIONAMENTO**

Descrição	Variável	Valor	Unidade	Observações
Diâmetro do tubo	D	10	mm	
Comprimento do tubo	L	1	m	
Temperatura entrada	T <sub>m,e</sub>	20	°C	
Temperatura saída	T <sub>m,s</sub>	100	°C	
Irradiação solar	G	600	W/m <sup>2</sup>	Pico médio de verão
Área de abertura	A <sub>abertura</sub>	1	m <sup>2</sup>	
Calor específico	cp	4186	J/kg K	

Vazão (L/h)	Área abertura (m <sup>2</sup> )	Comprimento (m)	Largura (m)
0,50	0,07	1,00	0,07
1,00	0,15	1,00	0,15
1,50	0,22	1,00	0,22
2,00	0,29	1,00	0,29
2,50	0,36	1,00	0,36
3,00	0,44	1,00	0,44
3,50	0,51	1,00	0,51
4,00	0,58	1,00	0,58
4,50	0,65	1,00	0,65
5,00	0,73	1,00	0,73
5,50	0,80	1,00	0,80
6,00	0,87	1,00	0,87
6,50	0,94	1,00	0,94
7,00	1,02	1,00	1,02
7,50	1,09	1,00	1,09
8,00	1,16	1,00	1,16
8,50	1,24	1,00	1,24
9,00	1,31	1,00	1,31
9,50	1,38	1,00	1,38
10,00	1,45	1,00	1,45
2,10	0,31	1,00	0,31
2,20	0,32	1,00	0,32
2,30	0,33	1,00	0,33
2,40	0,35	1,00	0,35
2,50	0,36	1,00	0,36
2,60	0,38	1,00	0,38
2,70	0,39	1,00	0,39
2,80	0,41	1,00	0,41
2,90	0,42	1,00	0,42
3,00	0,44	1,00	0,44
3,10	0,45	1,00	0,45
3,20	0,47	1,00	0,47
3,30	0,48	1,00	0,48
3,40	0,49	1,00	0,49

### 6.3 - Construção do protótipo

#### 6.3.1 – Tubo coletor absorvedor da irradiação solar

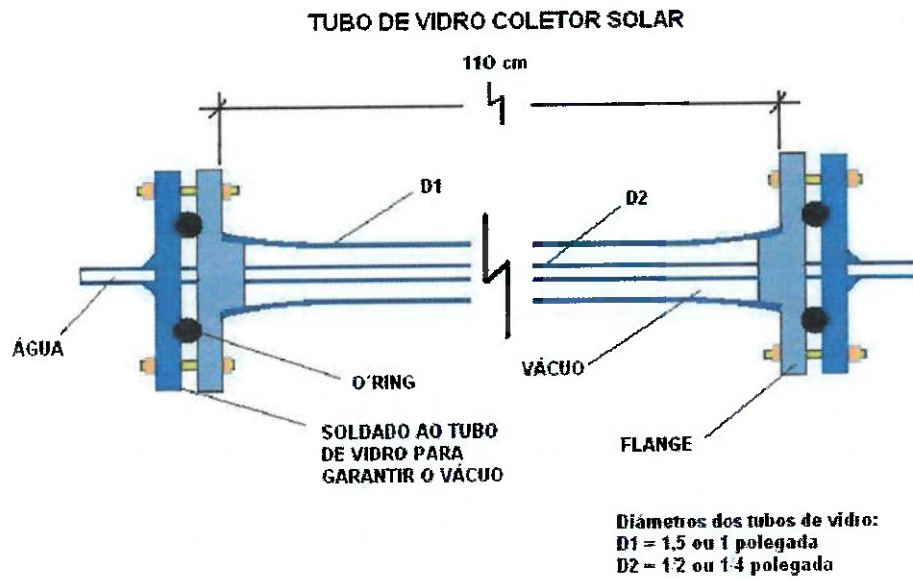
Definições iniciais:

- Comprimento útil = 1,0 m;
- Comprimento total ~ 1,1 m;
- Tubo interno: diâmetro de ~ 10 mm e material cobre;
- Tubo externo: diâmetro de ~ 25 mm e material vidro;

A principal tecnologia do Coletor Solar Parabólico de Alta Eficiência está no tubo coletor com vácuo entre os tubos.

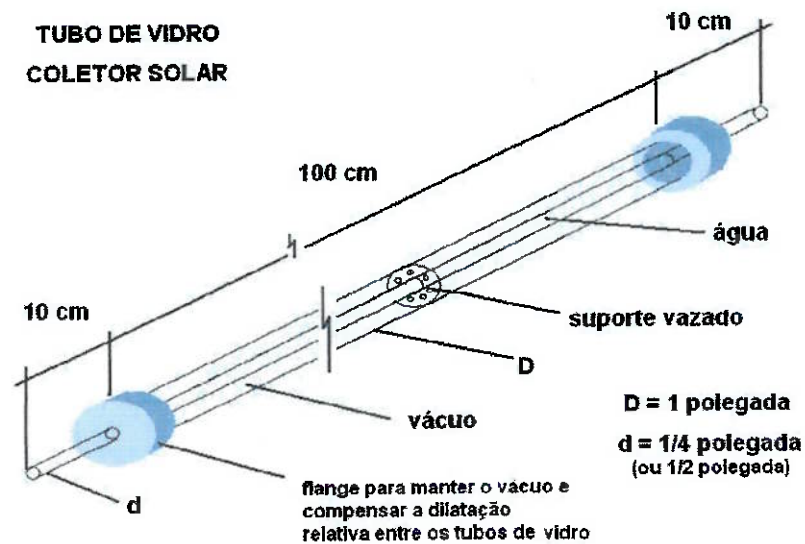
Foi realizado um croqui para envio aos fornecedores ou fabricantes de vidros conforme a Figura 6.11. A criticidade desse sistema do tubo coletor está no fato dos materiais terem coeficientes de dilatação diferentes ( $\text{vidro} = 0,9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\text{Cu} = 15 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\text{Al} = 24 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), portanto o tubo coletor deve ter um sistema de compensação de dilatação. Inicialmente pensou-se em criar um sistema de absorção da dilatação (anel o'ring) e movimentação relativa entre as peças com a utilização de juntas e flanges (duas peças parafusadas com vedação do anel de borracha para garantir o vácuo interno entre os tubos) quando submetido a variações de temperaturas da ordem de 100 °C.

Os fornecedores pesquisados são principalmente artesãos ou fabricantes de instrumentos analíticos de laboratório. Todos eles responderam negativamente à solicitação por não ser um item padrão de mercado.



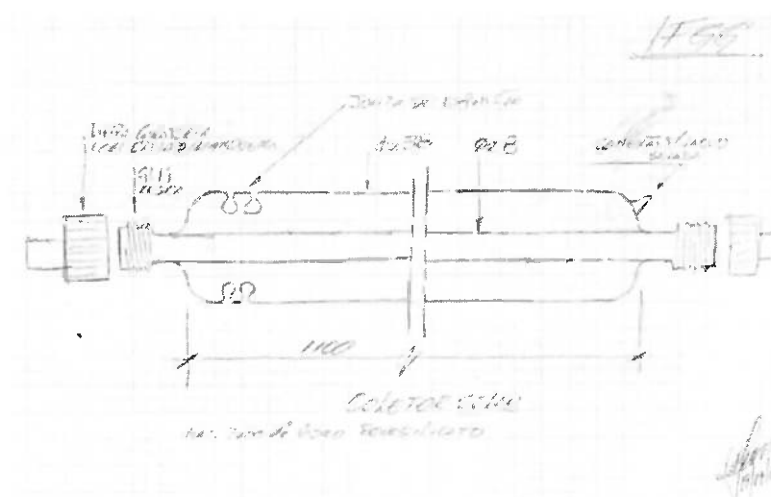
**Figura 6.11 – Croqui do tubo coletor – versão 1**

Uma segunda alternativa foi utilizar os dois tubos do mesmo material para eliminar o problema da dilatação relativa. Novamente foi enviado o croqui, conforme a Figura 6.12, aos fornecedores pesquisados.



**Figura 6.12 – Croqui do tubo coletor – versão 2**

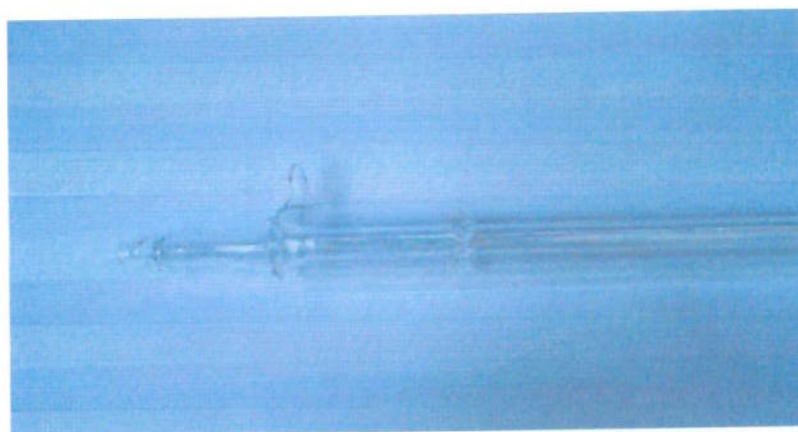
Os fabricantes que se dispuseram a fabricar o tubo sob encomenda foram FGG, Alpax e Laborglas. A FGG sugeriu em fazer a vedação do tubo realizando uma solda com o próprio vidro e como fator de segurança, criar uma junta de expansão no próprio tubo de vidro, como pode ser observado na Figura 6.13 a seguir. Desta forma elimina-se uma peça e garante-se o vácuo interno sem a necessidade da sua manutenção.



**Figura 6.13** – Croqui do tubo coletor – FGG

O valor da cotação da FGG foi o dobro da proposta da Alpax, justificados pela simplificação na conexão das extremidades do tubo (rosca por espinha de peixe) e pela ausência da junta de expansão pois a Alpax garante a eliminação desta parte pela têmpera do vidro a 600 °C.

A Figura 6.14 mostra o tubo coletor modelo AM-1 utilizado na construção do protótipo.



**Figura 6.14** – Tubo coletor de irradiação solar AM-1

### 6.3.2 – Superfície refletora

A superfície do coletor solar deve possuir um índice de refletividade elevada. Foram selecionadas cinco tipos de superfícies: espelho, aço inox polido, alumínio polido, aço carbono cromado ou aço carbono niquelado.

**Tabela 6.3** – Comparativo de materiais para superfícies refletoras

MATERIAL / TIPO	OBSERVAÇÕES
Espelho	Pesado e caro.
Aço inox polido	Manutenção mais trabalhosa em relação ao alumínio e aço com recobrimento.
Alumínio polido	Refletividade menor em relação ao aço inox polido.
Aço carbono cromado	Alta refletividade.
Aço carbono niquelado	Oliveira demonstra em sua tese que com recobrimento de níquel obtém-se resultados satisfatórios.

A melhor opção é o espelho porém é caro e a difícil de manusear em um perfil não plano. A segunda melhor opção é o aço carbono niquelado, porém o processo de recobrimento é caro e também necessita manuseá-lo no formato do perfil parabólico para que a camada de recobrimento não quebre. Foi utilizado na construção do protótipo o aço inox polido, justificado pela facilidade na aquisição e pelo seu preço.

### 6.3.3 – Perfil parabólico da estrutura de sustentação da superfície refletora

Equacionamento da parábola:

$$y = \frac{x^2}{4F} \quad (3)$$

$$a = 4 \cdot F \quad (4)$$

onde:

$y = f(x)$ ;

$F$  = foco;

$a$  = parâmetro de abertura da parábola.

**Tabela 6.4 – Equacionamento da parábola**

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

$$b=0$$

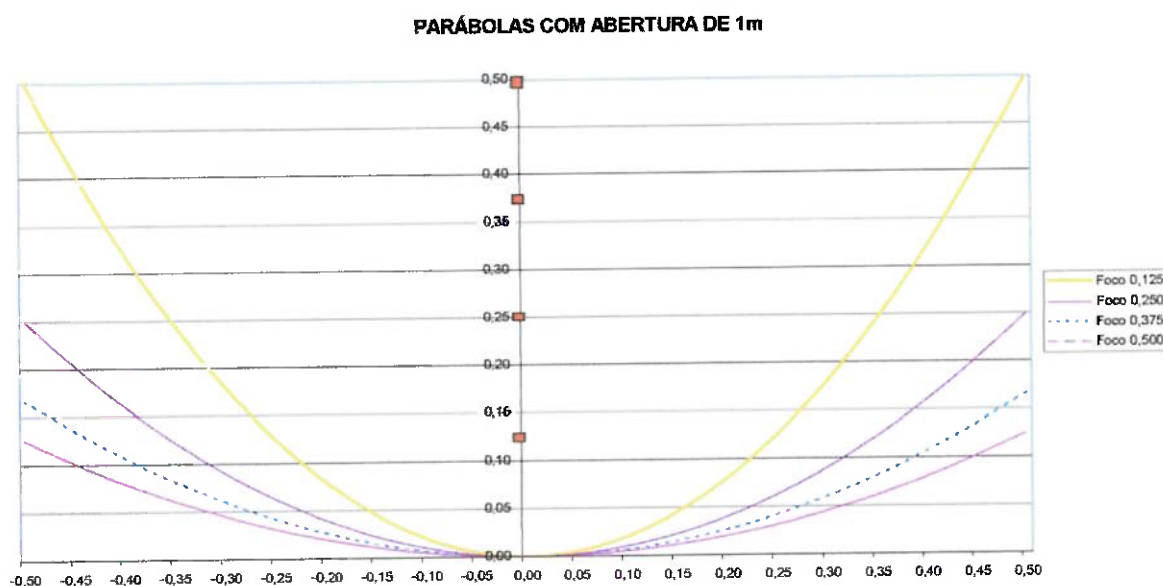
$$c=0$$

<b>a</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>
<b>foco</b>	<b>0,125</b>	<b>0,25</b>	<b>0,375</b>	<b>0,5</b>
<b>x</b>	<b>f(x)</b>	<b>f(x)</b>	<b>f(x)</b>	<b>f(x)</b>
-0,500	0,500	0,250	0,167	0,125
-0,450	0,405	0,203	0,135	0,101
-0,400	0,320	0,160	0,107	0,080
-0,350	0,245	0,123	0,082	0,061
-0,300	0,180	0,090	0,060	0,045
-0,250	0,125	0,063	0,042	0,031
-0,200	0,080	0,040	0,027	0,020
-0,150	0,045	0,023	0,015	0,011
-0,100	0,020	0,010	0,007	0,005
-0,050	0,005	0,003	0,002	0,001

**Tabela 6.4 – Equacionamento da parábola (cont.)**

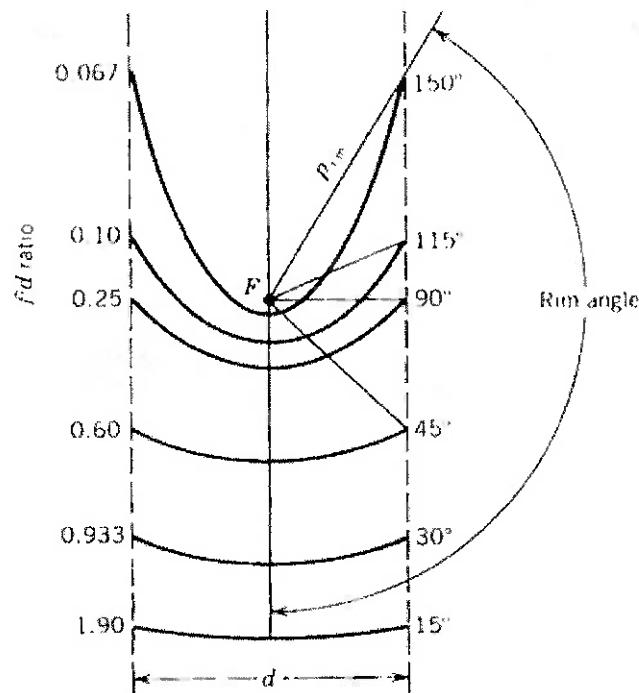
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	0,005	0,003	0,002	0,001
0,100	0,020	0,010	0,007	0,005
0,150	0,045	0,023	0,015	0,011
0,200	0,080	0,040	0,027	0,020
0,250	0,125	0,063	0,042	0,031
0,300	0,180	0,090	0,060	0,045
0,350	0,245	0,123	0,082	0,061
0,400	0,320	0,160	0,107	0,080
0,450	0,405	0,203	0,135	0,101
0,500	0,500	0,250	0,167	0,125

A variável “a” determina a abertura da parábola, ou seja, a parábola se fecha à medida que diminui o valor do parâmetro a. O foco se afasta da superfície à medida que o perfil da parábola se abre, conforme a Figura 6,15.

**Figura 6.15 – Parábolas e seus respectivos focos**

Uma outra maneira interessante de visualizar as aberturas das parábolas e o comportamento dos focos, observa-se na Figura 6.16.





**Figura 6.16** – Comportamento dos perfis de parábolas e seus respectivos focos (Fonte: Solar PACES)

O perfil escolhido foi o de parâmetro  $a = 0,8$  cujo foco é  $F = 0,20$  m, devido à definição da área de abertura do coletor ser de  $1 \text{ m}^2$  e também pela previsão de se utilizar uma superfície transparente para recobrir o coletor para proteção da superfície refletora e facilitar a sua manutenção. Ou seja, a largura do coletor será de 1,0 m e o comprimento projetado também deverá ser de 1,0 m. Logo, as extremidades da parábola devem ter o valor de ordenada necessariamente menor do que o valor do foco. Conclui-se que o valor limite do parâmetro “a” deva ser menor do que 1 para o foco (e também o tubo coletor) fique “dentro” do perfil e seja possível por uma superfície plana de proteção.

Na construção do perfil utilizou-se a plotagem em AutoCAD em escala 1:1 da parábola através do comando SPLINE, para fazer um gabarito em material de plástico rígido e garantir um padrão dimensional para as três peças em

madeira serradas. Foi proposta a construção dessa estrutura parabólica em perfis de alumínio tipo U ou L, porém não foram utilizados para evitar o efeito da dilatação relativa entre esta peça e a superfícies refletora.

O material utilizado foi madeira usada de MDF. Outros materiais e equipamentos auxiliares utilizados: trena, esquadro, régua, furadeira, serra circular, serra em fita, lixa, etc. conforme figuras a seguir.



**Figura 6.17** – Materiais para confecção do perfil parabólico



**Figura 6.18 – Serra circular****Figura 6.19 – Serra tico-tico****Figura 6.20 – Perfil acabado**

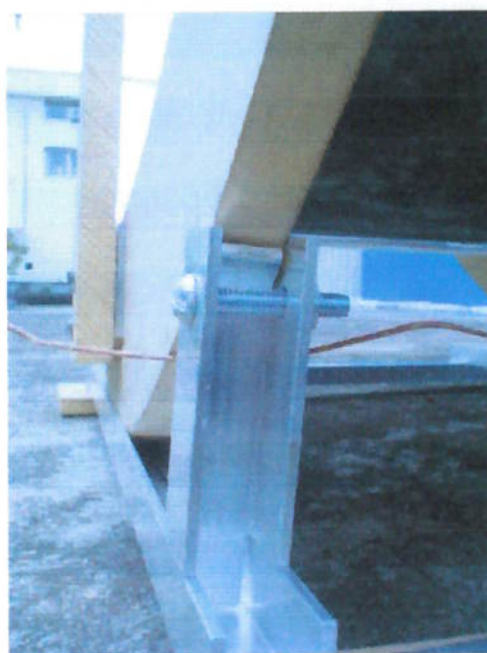
#### 6.3.4 – Estrutura de suporte do coletor

A estrutura de suporte do coletor deve ter um sistema de movimentação relativa do coletor para direcionar o plano normal ao sol e obter a incidência normal da irradiação solar.

A simplificação dessa estrutura obteve-se utilizando perfil U de alumínio de abetura igual à espessura da chapa MDF. Com isso, consegue-se que o coletor deslize sobre o perfil.

O direcionamento será somente pela rotação do coletor ao longo das estações do ano. Não haverá acompanhamento rotacional do coletor ao longo do dia, portanto a maior incidência será obtida quando estiver próximo ao horário do meio-dia.

Foi criado dois dispositivos de fixação do coletor para o ângulo desejado, visualizado nas Figuras 6.21 e 6.22, a seguir.

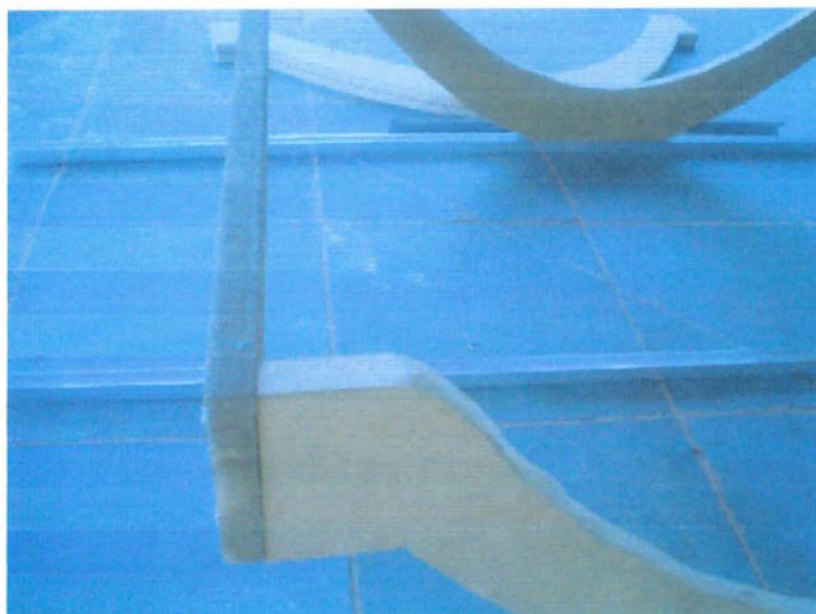


**Figura 6.21** – Dispositivo 1 de fixação do coletor



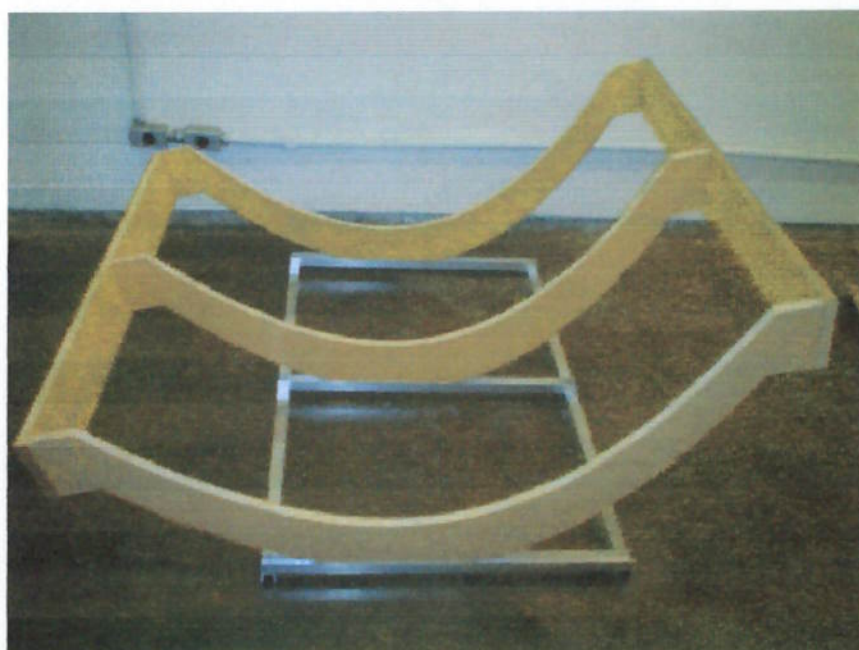
**Figura 6.22** – Dispositivo de fixação do coletor

### 6.3 – Montagem e ajustes.



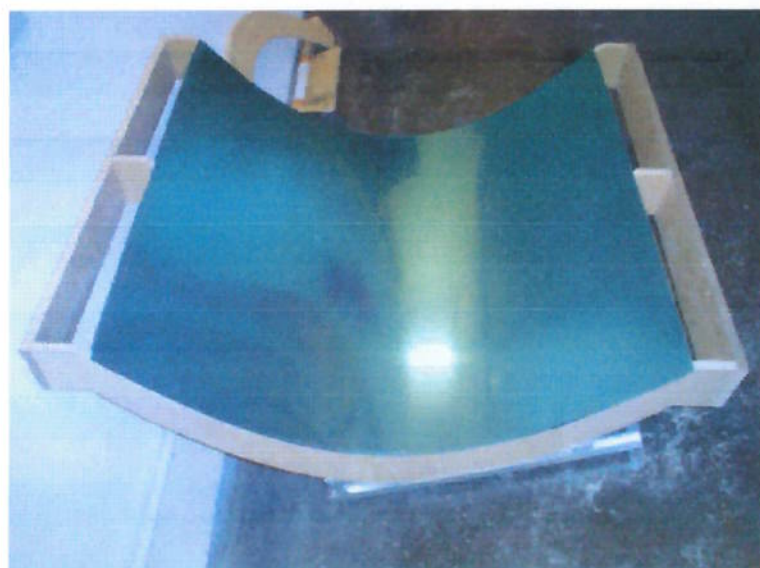
**Figura 6.23** – Montagem do quadro de sustentação da estrutura do coletor





**Figura 6.24** – Montagem da estrutura do coletor

A chapa foi fixada à estrutura através de furos nas chapas e arruelas. Os furos têm diâmetro maior do que os parafusos de fixação para compensar a dilatação da chapa e consequentemente, não deformar seu perfil. Não realiza-se o aperto total dos parafusos para que a superfície refletora possa deslizar sobre as arruelas.



**Figura 6.25** – Fixação da superfície refletora

O tubo coletor foi montado sobre um suporte no qual o tubo é inserido. Este suporte possui movimento relativo em relação à estrutura do coletor para ajuste do tubo sobre o foco da parábola – Figura 6.26.

O foco foi ajustado utilizando-se um laser pointer, direcionando-o de maneira normal à superfície refletora de maneira até que se consiga a visualização da luz ao longo do tubo coletor.



**Figura 6.26** – Montagem do tubo coletor e ajuste do foco

#### 6.4 – Orçamento e custos

Os custos dos materiais para elaboração do protótipo encontram-se na Tab. 6.5.

**Tabela 6.5** – Custos do coletor

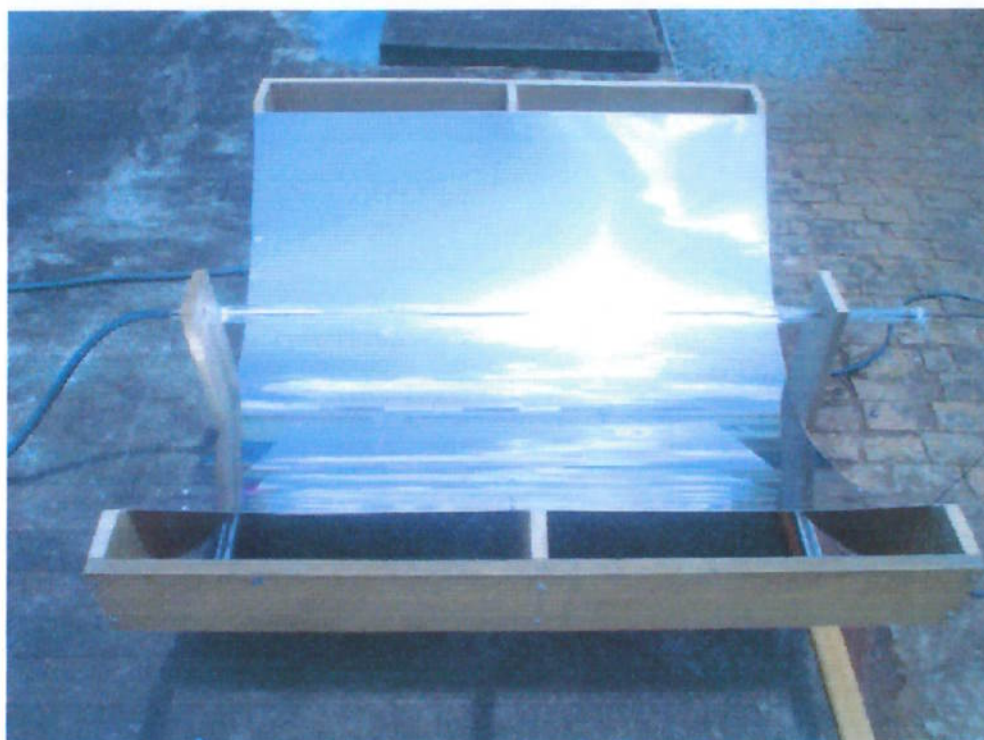
Descrição	Quantidade	Unidade	Preço
Tubo coletor	1	peça	R\$273,00
Placa MDF usada com serviço de corte	15	m <sup>2</sup>	R\$35,00
Perfil U alumínio	2,2	kg	R\$35,50
Tubo cobre	xxx	xxx	doado
Chapa aço inox	5	kg	R\$72,50
Parafusos	20	peça	R\$4,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$420</b>

### 6.5 – Montagem final e coleta de dados

O coletor solar montado é visualizado na Figura 6.27 e 6.28.

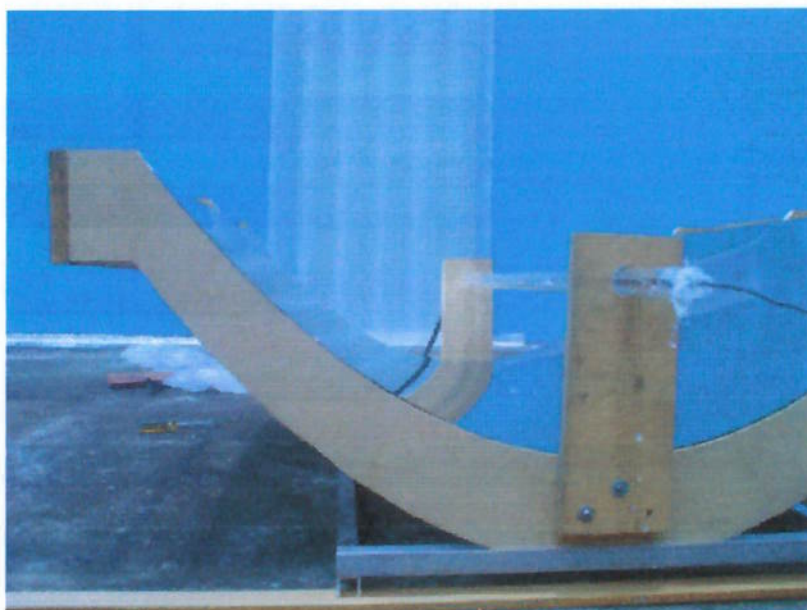
A coleta de dados foi realizado na cidade de São Paulo, dentro da Cidade Universitária, no prédio da Engenharia Mecânica e entre os prédios dos laboratórios da Mecânica dos Fluidos e Térmica, com pré-teste nos dias 14 e 15 de novembro, e coleta final no dia 26/11/05.

O dia era instável com várias nuvens e portanto não foi o dia ideal já que o aquecimento não foi de maneira contínua devido à passagem das nuvens que geravam penumbras sobre o local.



**Figura 6.27** – Coletor solar parabólico em teste





**Figura 6.28 – Coletor solar parabólico, em perfil**

Utilizou-se um termômetro digital portátil com data-logger da Instrutherm, tipo K/J - 2 canais – modelo TH060.



**Figura 6.29 – Termômetro digital com termopar**

A vazão foi definida até se atingir a temperatura de ebulição no tubo coletor e controlada para que fosse neste limite do P.E.

Utilizou-se uma garrafa para coleta da água aquecida, inclinando-a e sobrepondo um pano úmido para a condensação da água, a fim de medir o volume obtido através da transferência do fluido para uma proveta graduada.

#### 6.6 – Resultados, tratamento de dados e análises.

Os dados coletados foram armazenados no data-logger e descarregados em um computador posteriormente.

**Tabela 6.6 – Dados coletados**

	Date	time	10:24:03	T1	T2	T1-T2
"1	19-11-5	10:24:03	00:00:00	27,6	41,2	13,6
"2	19-11-5	10:26:33	00:02:30	27,9	46,7	18,8
"3	19-11-5	10:29:03	00:05:00	28,2	40,6	12,4
"4	19-11-5	10:31:33	00:07:30	28,7	57,5	28,8
"5	19-11-5	10:34:03	00:10:00	28,7	45,8	17,1
"6	19-11-5	10:36:33	00:12:30	29,2	43,7	14,5
"7	19-11-5	10:39:03	00:15:00	29,2	39,1	9,9
"8	19-11-5	10:41:33	00:17:30	29,3	34,0	4,7
"9	19-11-5	10:44:03	00:20:00	30,2	36,5	6,3
"10	19-11-5	10:46:33	00:22:30	30,8	38,9	8,1
"11	19-11-5	10:49:03	00:25:00	31,4	41,8	10,4
"12	19-11-5	10:51:33	00:27:30	31,6	38,2	6,6
"13	19-11-5	10:54:03	00:30:00	31,8	38,0	6,2
"14	19-11-5	10:56:33	00:32:30	32,2	48,8	16,6
"15	19-11-5	10:59:03	00:35:00	33,0	66,1	33,1
"16	19-11-5	11:01:33	00:37:30	33,0	56,6	23,6
"17	19-11-5	11:04:03	00:40:00	33,3	55,5	22,2
"18	19-11-5	11:06:33	00:42:30	32,8	53,5	20,7
"19	19-11-5	11:09:03	00:45:00	33,2	59,1	25,9
"20	19-11-5	11:11:33	00:47:30	34,3	73,6	39,3
"21	19-11-5	11:14:03	00:50:00	33,8	71,7	37,9
"22	19-11-5	11:16:33	00:52:30	34,1	63,2	29,1
"23	19-11-5	11:19:03	00:55:00	34,0	56,5	22,5
"24	19-11-5	11:21:33	00:57:30	34,6	57,9	23,3
"25	19-11-5	11:24:03	01:00:00	34,8	62,0	27,2
"26	19-11-5	11:26:33	01:02:30	36,1	60,1	24,0
"27	19-11-5	11:29:03	01:05:00	36,1	55,0	18,9
"28	19-11-5	11:31:33	01:07:30	37,0	59,9	22,9
"29	19-11-5	11:34:03	01:10:00	38,5	50,5	12,0
"30	19-11-5	11:36:33	01:12:30	38,7	70,1	31,4
"31	19-11-5	11:39:03	01:15:00	39,3	77,8	38,5
"32	19-11-5	11:41:33	01:17:30	39,2	74,7	35,5

Tabela 6.6 – Dados coletados (cont.)

"33	19-11-5	11:44:03	01:20:00	39,3	87,1	47,8
"34	19-11-5	11:46:33	01:22:30	39,8	87,3	47,5
"35	19-11-5	11:49:03	01:25:00	40,3	84,4	44,1
"36	19-11-5	11:51:33	01:27:30	40,6	80,7	40,1
"37	19-11-5	11:54:03	01:30:00	41,1	69,0	27,9
"38	19-11-5	11:56:33	01:32:30	40,7	65,8	25,1
"39	19-11-5	11:59:03	01:35:00	41,6	76,2	34,6
"40	19-11-5	12:01:33	01:37:30	41,7	66,7	25,0
"41	19-11-5	12:04:03	01:40:00	41,4	50,6	9,2
"42	19-11-5	12:06:33	01:42:30	41,1	87,7	46,6
"43	19-11-5	12:09:03	01:45:00	40,8	81,1	40,3
"44	19-11-5	12:11:33	01:47:30	40,9	76,8	35,9
"45	19-11-5	12:14:03	01:50:00	40,7	71,5	30,8
"46	19-11-5	12:16:33	01:52:30	41,3	69,1	27,8
"47	19-11-5	12:19:03	01:55:00	40,7	62,3	21,6
"48	19-11-5	12:21:33	01:57:30	40,6	60,8	20,2
"49	19-11-5	12:24:03	02:00:00	40,0	56,5	16,5
"50	19-11-5	12:26:33	02:02:30	39,3	49,0	9,7
"51	19-11-5	12:29:03	02:05:00	38,8	44,6	5,8
"52	19-11-5	12:31:33	02:07:30	38,6	42,7	4,1
"53	19-11-5	12:34:03	02:10:00	38,4	40,4	2,0
"54	19-11-5	12:36:33	02:12:30	37,5	40,2	2,7
"55	19-11-5	12:39:03	02:15:00	37,2	38,5	1,3
"56	19-11-5	12:41:33	02:17:30	24,2	37,4	13,2

Com os resultados da Tabela 6.6, gerou-se o gráfico da Figura 6.30

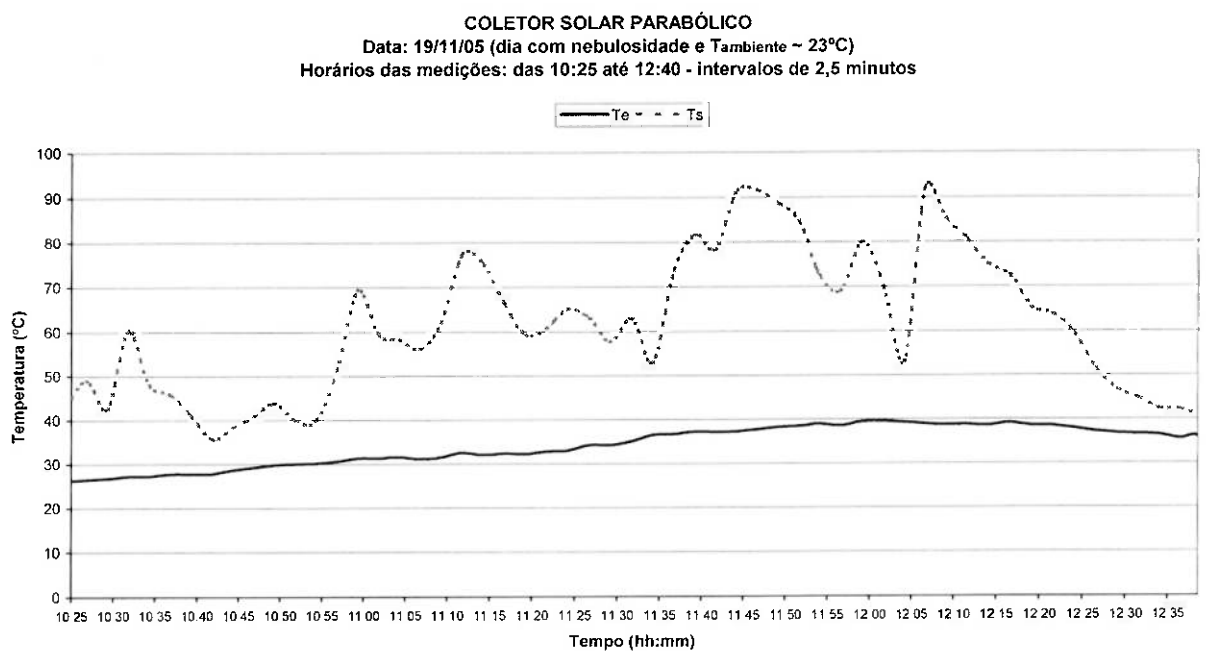
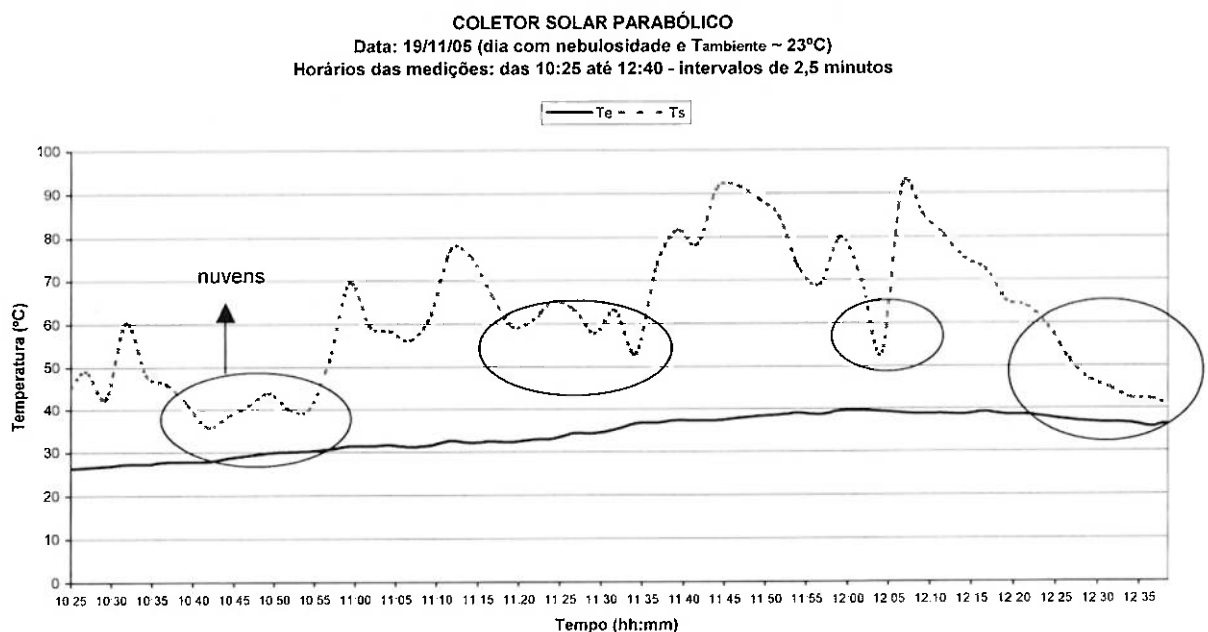


Figura 6.30 – Gráfico da coleta de dados do coletor parabólico

Verifica-se claramente na Figura 6.31 as variações de temperatura de saída do fluido causadas pela passagem de nuvens, podendo-se estimar até o seu “tamanho”.

A temperatura de entrada do fluido aqueceu devido à utilização de uma mangueira de ~ 2 m de comprimento. Como a vazão era baixa, a água esquentava até a temperatura de ~ 40 °C.



**Figura 6.31** – Gráfico da coleta de dados do coletor parabólico

Para absorver a irradiação solar incidente sobre a superfície refletora no tubo coletor, utilizou-se dois tubos de cobre de diâmetro de 4 mm inseridos no interior do tubo onde o fluido escoa.



**Figura 6.32 – Ebulição no o tubo coletor**

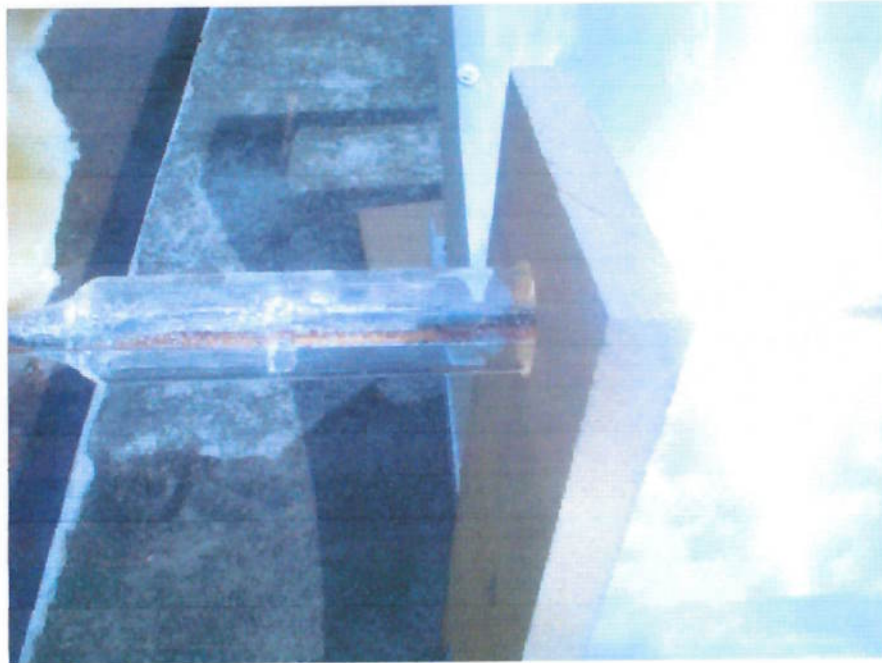


**Figura 6.33 – Entrada do tubo coletor**

Observar na Figura 6.34 que há focalização da luz sobre o tubo fora da área útil e na Figura 6.35, focalização sobre o suporte de madeira do tubo coletor. Isto ocorre devido à abertura do coletor não estar totalmente



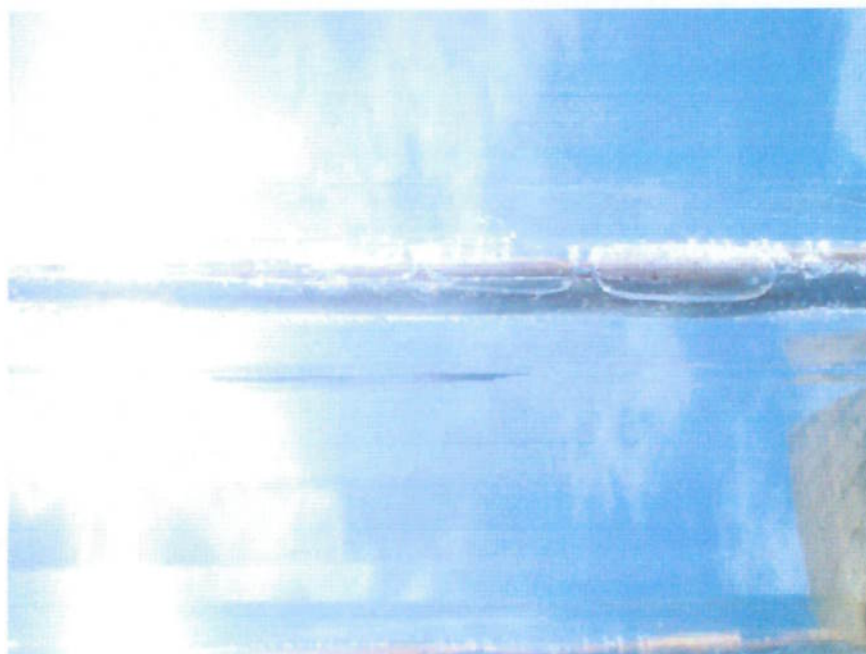
perpendicular em relação à incidência solar, cujo fato ocorre no sol do meio-dia, apesar da abertura estar no plano do movimento do sol ao longo do dia.



**Figura 6.34 – Saída do tubo coletor**



**Figura 6.35 – Problema na focalização**



**Figura 6.36** – Condição totalmente turbulenta

Os cálculos utilizados na tabela 6.2 foram refeitos inserindo os novos dados de entrada:

Temperatura de entrada = 40 ° C

Temperatura de saída = 95 ° C

Irradiação solar de pico estimado = 450 W/m<sup>2</sup>

Calcula-se que para um coletor de área de abertura de 1 m<sup>2</sup>, a vazão para o caso de rendimento 100% é de 7,03 L/h, contra 1,5 L/h obtidos experimentalmente. Ou seja, um rendimento de pico de 21,4%.

## 7 - CONCLUSÃO

O rendimento de pico obtido de 21,4% representa um aumento de rendimento da ordem de 7% em relação ao citado por Cavalcanti. Porém o valor obtido tem incertezas devido à estimativa adotada para a irradiação solar do dia da coleta.

Verifica-se que um coletor parabólico tem uma inércia baixa de resposta, ou seja, é muito sensível em relação à qualquer variação da irradiação solar de modo que a temperatura do fluido se aquece ou resfria rapidamente em função de uma mesma vazão. Contrariamente ao coletor plano, que pode ser comparado à mangueira utilizada para levar o fluido à entrada do tubo coletor, a variação de temperatura é pequena ao longo do tempo, independentemente da variação da irradiação solar, porém é baixa a elevação da temperatura do fluido (10°C contra 50°C).

Como desafio para estudos futuros, além do modelamento do sistema com os resultados obtidos, o rendimento pode ser melhorado de diversas maneiras:

- otimizando-se superfícies com índice de refletividade maiores (por exemplo, chapa de aço carbono niquelada);
- ajuste fino do foco (posição do tubo, corte de precisão na produção dos perfis);
- utilizando sistema de rastreamento do sol ao longo do dia;
- e também utilizando um tubo absorvedor mais justo e enegrecido em relação ao inserido (tubo de cobre) no tubo de vidro no experimento.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2000. 132 p.

KREIDER, J. F.; KREITH, F. **Solar energy handbook**. New York, McGraw-Hill, 1981. 1100 p.

BOYLE, G. (editado). **Renewable energy**. United Kingdom, Oxford University Press, 1996.

WIEDER, S. **An introduction solar energy for scientists and engineers**. Malabar, Florida, Kriegler Publishing Company, 1992.

Salles, A. C. N. **Metodologias de análises de risco para avaliação financeira e projetos de geração eólica**. Trabalho de mestrado, Rio de Janeiro, 2004.

Cavalcanti, E. S. C.; Brito, R. B. S. **Geração heliotérmica: uma nova opção de energia limpa para o Brasil**. Artigo submetido ao VIII Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1999.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - [www.mct.gov.br](http://www.mct.gov.br) – consulta em abril 2005.

SOLARPACES / IEA – [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org) – consulta em junho 2005.

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [www.cptec.inpe.br/](http://www.cptec.inpe.br/) - consulta em junho 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) – consulta em abril 2005.

ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE MADRI – <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n9/famvaz/i12amvaz.html> – consulta em abril 2005.

Fernandes, C. A.; Guaronghi, V. M. – **Energia solar**. Estudo publicado na internet - [www.energiasolar](http://www.energiasolar.com.br) – consulta em abril 2005.

Guerrini, I. M. – **Fontes alternativas de energia** – agosto 2001. Estudo publicado na internet - [www.energiasolar](http://www.energiasolar.com.br) – consulta em abril 2005.

ESTAÇÃO CIÊNCIA – CENTRO DE DIFUSÃO CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA E CULTURAL DA PRÓ-REITORIA DE CULTURA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA DA USP – [www.estacoaciencia.usp.br](http://www.estacoaciencia.usp.br) - consulta em abril 2005.

ELETROBRÁS; PROCEL; ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ. **Conservação de energia – Eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá – Minas Gerais, Editora da EFEI, 2001.

Hori, F. M.; Tabata, V. K. **Coletor solar plano de baixo custo – Trabalho de formatura**. São Paulo, Politécnica da USP, 2003.

Price, H.; Kearney, K. **Parabolic -Trough Technology Roadmap: A Pathway for Sustained Commercial Development and Deployment of Parabolic - Trough Technology**. Workshop U. S. DOE's (Department of Energy) Office of Power Technologies Concentrating Solar Power (CSP) Program - Estados Unidos, Califórnia, 1999.

Harbele, A.; Zhaler, C.; Mertins, M; Trieb, F. **The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations**. Franhofer Institute for Solar Energy Systems - Alemanha, 2002.

---

Palmieri, M. P.; **Pesquisa melhora a eficiência do coletor solar**. Universidade Federal de Ouro Preto – Minas Gerais, 1999.

Xavier, F. C.; **Concentrador solar parabólico**. Prêmio Sociedade Mineira de Engenheiros de Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, 2003.

Oliveira, A. R.; **Análise paramétrica e desempenho de um radiômetro de cavidade elipsoidal**. Tese de doutorado; Escola Politécnica da USP – São Paulo, 2004.

## **APÊNDICE 1 – Protocolo de Kyoto**

(fonte: Revista Época fevereiro de 2005)

O Protocolo de Kyoto foi o resultado da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada no Japão, em 1997, após discussões que se estendiam desde 1990. A conferência reuniu representantes de 166 países para discutir providências em relação ao aquecimento global.

O documento estabelece a redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que responde por 76% do total das emissões relacionadas ao aquecimento global, e outros gases do efeito estufa, nos países industrializados. Os signatários se comprometeriam a reduzir a emissão de poluentes em 5,2% em relação aos níveis de 1990. A redução seria feita em cotas diferenciadas de até 8%, entre 2008 e 2012 (países listados na tabela)

Um aspecto importante do protocolo é que apenas os países ricos, do chamado Anexo 1, são obrigados a reduzir suas emissões. Países em desenvolvimento, como Brasil, China e Índia, grandes emissores de poluentes, podem participar do acordo, mas não são obrigados a nada. O conceito básico acertado para Kyoto é o da "responsabilidade comum, porém diferenciada" - o que significa que todos os países têm responsabilidade no combate ao aquecimento global, porém aqueles que mais contribuíram historicamente para o acúmulo de gases na atmosfera (ou seja, os países industrializados) têm obrigação maior de reduzir suas emissões.

Para entrar em vigor, porém, o documento precisa ser ratificado por pelo menos 55 países. Entre esses, devem constar aqueles que, juntos, produziam 55% do gás carbônico lançado na atmosfera em 1990. Embora a União

Européia já tenha anunciado seu apoio ao protocolo, os Estados Unidos - o maior poluidor - se negam a assiná-lo. Sozinho, o país emite nada menos que 36% dos gases venenosos que criam o efeito estufa. Só nos últimos dez anos, a emissão de gases por parte dos Estados Unidos aumentou 10% e, segundo o protocolo, a emissão de gás carbônico deve dar um salto de 43% até 2020.

Os EUA desistiram do tratado em 2001, alegando que o pacto era caro demais e excluía de maneira injusta os países em desenvolvimento. O atual presidente americano, George W. Bush, alega ausência de provas de que o aquecimento global esteja relacionado à poluição industrial. Ele também argumenta que os cortes prejudicariam a economia do país, altamente dependente de combustíveis fósseis. Em vez de reduzir emissões, os EUA preferiram trilhar um caminho alternativo e apostar no desenvolvimento de tecnologias menos poluentes.

Os países que mais emitem dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) na atmosfera (porcentagem do total emitido no mundo)	
Estados Unidos	36,1%
Rússia	17,4%
Japão	8,5%
Alemanha	7,4
Reino Unido	4,3
Canadá	3,3
Itália	3,1
Polônia	3,0
França	2,7
Austrália	2,1
Espanha	1,9
Países Baixos	1,2
República Checa	1,2
Romênia	1,2

Países listados no Anexo 1: Alemanha, Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Bulgária, Canadá, Comunidade Européia, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheco-Eslovaca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia

## CRONOLOGIA DO PROTOCOLO

- 1988 - O programa da ONU para o Meio Ambiente cria o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), para analisar o impacto das mudanças climáticas. Governantes e cientistas se reúnem em Toronto, no Canadá, para discutir o tema.
- 1990 - Os cientistas informam por meio do IPCC que seria necessário reduzir 60% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A ONU passa a discutir a criação de uma Convenção sobre Mudança Climática.
- 1992 - Mais de 160 governos assinam a Convenção Quadro sobre Mudança Climática na Eco 92, no Rio. O Brasil é o primeiro a assiná-la. As mudanças climáticas são frutos da interferência humana.
- 1995 - É realizada a primeira Conferência das Partes (COPs), em Berlim, na Alemanha, onde é proposto um protocolo de decisões sobre as obrigações listadas na Convenção. O principal documento desta conferência foi o Mandato de Berlim.
- 1997 - É adotado o Protocolo de Kyoto, no Japão, o mais importante acordo ambiental feito pela ONU. Até 2012, 38 países industrializados precisam reduzir em 5,2% as emissões de gases de efeito estufa, entre eles, o CO<sub>2</sub>.
- 2001 - Os EUA, maior poluidor do mundo, se retiram das discussões sobre o Protocolo por considerá-lo custoso demais à economia norte-americana. O país é responsável por 36% das emissões globais de gases estufa e, desde, 1990, aumentaram suas emissões em 13%.
- 2004 - Acontece a 10.<sup>a</sup> COP na Argentina. Cresce a pressão para que os países em desenvolvimento também tenham metas em 2012.

- 2005 - Entra em vigor o Protocolo de Kyoto a partir do mês de fevereiro.