



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E LEVANTAMENTO DE DESEMPENHO DE UM  
CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO COM MECANISMO  
AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO SOLAR**

José Ribeiro de Souza Filho

Orientador:  
Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

**Abril/2008  
Natal-RN**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E LEVANTAMENTO DE DESEMPENHO DE UM  
CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO COM MECANISMO  
AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO SOLAR**

José Ribeiro de Souza Filho

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Dr.- Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN (orientador)**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN**

---

**Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN**

---

**Prof. Dr. Jorge Magner Lourenço – CEFET - RN**

*Dedico este trabalho ao Senhor Jesus Cristo por me amar e cuidar de mim, mantendo meu corpo físico vivo e com saúde, e por reacender em nós a cada dia a chama da esperança de um futuro melhor; a meu filho Juan Lucas e a minha amada e mui compreensiva esposa Eda.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade da realização deste curso.

Ao amigo Aldo Paulino de Medeiros Júnior, pela inestimável colaboração na consecução das partes experimentais e de análise deste trabalho;

À minha esposa por compreender minha ausência durante o processo;

A UFRN por viabilizar as condições materiais e nos disponibilizar educadores com um alto nível de comprometimento com o ensino;

Aos todos os que fazem a UFRN, desde o Diretor Geral até o mais humilde dos funcionários pelo carinho e dedicação, em especial aos Professores pela paciência e empenho que tiveram ao nos transmitir os conhecimentos necessários à realização deste trabalho;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, por me guiar com sua sabedoria;

Aos professores Avaliadores pelas contribuições;

Meu muito obrigado.

## RESUMO

Apresenta-se um concentrador solar do tipo cilindro-parabólico para a produção de vapor para aplicações diversas. A superfície da parábola foi construída em fibra de vidro, com dimensões que seguem um estudo de otimização de parâmetros ópticos inerentes à reflexão dos raios solares pela superfície refletora e a interceptação desses raios pelo tubo absorvedor. A superfície do concentrador de 2,24 m<sup>2</sup> foi recoberta por lâminas de espelho de 1,0 m de comprimento por 2 cm de largura. A tubulação absorvedora é composta de um tubo de cobre de diâmetro correspondente a 28 mm. O concentrador tem mobilidade para rastrear automaticamente o movimento aparente do sol. Serão mostrados os processos de fabricação e montagem do concentrador proposto, que apresenta como características principais, as facilidades de construção e montagem, além de custo reduzido. A temperatura máxima alcançada no tubo absorvedor vazio foi 232,1°C e a temperatura média para intervalo de 1 hora foi 171,5 °C, obtidas em um teste com automatização. O pico máximo obtido na temperatura de saída de água foi de 197,7°C para uma temperatura de 200,0°C no do tubo absorvedor. O melhor resultado médio da temperatura de saída da água para intervalo de 1 hora foi 170,2°C para uma temperatura de 171,2°C, no tubo absorvedor, obtido em teste com automatização. As médias de temperaturas de saída de água estiveram sempre acima da temperatura de vaporização da água. O concentrador apresenta uma eficiência útil de 38% e um custo de fabricação de aproximadamente R\$ 450,00 (€\$ 160,34).

**Palavras chaves - energia solar; concentrador solar cilindro parabólico; produção de vapor.**

## ABSTRACT

An cylinder-parabolic solar concentrator is presented to produce steam for different applications. This prototype was built in glass fiber with dimensions that follow a study of optimization of parameters inherent in the optical reflection of sunlight by the surface of reflection and absorption of the same by tubing that leads the fluid of work. The surface of the concentrator of 2.24 m<sup>2</sup> has been covered by layers of mirror with 1.0 m of length and 2.0 cm wide. The absorb tubing consists of a copper tube diameter equal to 28 mm. The concentrator is moving to follow the apparent motion of the sun. It will be presented the processes of manufacturing and assembly of the concentrator proposed, which has as main characteristics the facilities construction and assembly, in addition to reduced cost. Will be presented data from tests performed to produce steam setting up some parameters that diagnose the efficiency of the concentrator. It will be demonstrated the viabilities thermal, economic and of materials of the proposed system. The maximum temperature achieved in the vacuum tube absorber was 232.1°C and average temperature for 1 hour interval was 171.5°C, obtained in a test with automation. The maximum temperature achieved in the output of water was 197.7°C for a temperature of 200.0°C in the absorber tube. The best average result of the water exit temperature to interval of 1 hour was 170.2°C for a temperature of 171.2°C, in the absorber tube, obtained in test with automation. Water exit mean temperatures were always above of the water steaming temperature. The concentrator present a useful efficiency of 38% and a production cost of approximately R\$ 450,00 (€ \$ 160.34).

Key words – solar energy; solar concentrator parabolic-cylinder; producing of steam.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1. Apresentação do Trabalho.....</b>	<b>01</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>03</b>
<b>1.2.1. Objetivos Gerais.....</b>	<b>03</b>
<b>1.2.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>03</b>
<b>CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>04</b>
<b>2.1. A Importância das Energias Renováveis.....</b>	<b>04</b>
<b>2.1.1. O Futuro.....</b>	<b>04</b>
<b>2.1.2. Importância da Energia Solar.....</b>	<b>04</b>
<b>2.1.3. O Desenvolvimento e o Meio Ambiente.....</b>	<b>06</b>
<b>2.2. Concentradores Termossolares.....</b>	<b>08</b>
<b>2.2.1. Os Concentradores no Mundo.....</b>	<b>08</b>
<b>2.2.1.1. Sistemas de Concentradores Cilindro Parabólicos.....</b>	<b>09</b>
<b>2.2.1.2. Sistema de Receptor Central.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1.3. Discos Parabólicos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Concentradores Cilindro Parabólicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.1. Histórico.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2. Desenvolvimento de Concentradores no LES/UFRN.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Processos de Fabricação e Montagem do Concentrador Solar.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Desenvolvimento Teórico.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3. Metodologia dos Ensaios Térmicos.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4. Instrumentação Utilizada.....</b>	<b>42</b>



<b>CAPÍTULO 4 - ANÁLISES DE RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Análises dos Resultados Obtidos.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Resultados dos Testes Realizados.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3. Viabilidade Econômica.....</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura 1. Campo Acurex em Almería – Espanha.....	9
Figura 2 - Campo Ace em Almería – Espanha.....	10
Figura 3 - Campo DISS em Almería – Espanha.....	10
Figura 4 - Campo Eurotrough em Almería – Espanha.....	11
Figura 5 - Planta Solar SEGS na Califórnia – EUA.....	12
Figura 6 - Campo Solar DSG System em Ben Gurion – Israel.....	12
Figura 7 - Campo Solar SSPS-CRS em Almería – Espanha.....	13
Figura 8 - Campo Solar CESA 1 em Almería – Espanha.....	14
Figura 9 - Campo Solar 2 na Califórnia – EUA.....	15
Figura 10 - Campo Solar NSTTF no Novo México – EUA.....	15
Figura 11 - Campo Solar do Instituto Weizmann em Rehovot – Israel.....	16
Figura 12 - Campo Solar Eurodish na Alemanha.....	17
Figura 13 - Protótipo Dish-Stirling nos EUA.....	18
Figura 14 - Protótipos Dish-Stirling na Arábia Saudita.....	18
Figura 15 - Concentrador cilindro-parabólico construído no LMHES-UFRN.....	22
Figura 16 – Curva da parábola.....	24
Figura 17 – Desenho do perfil do concentrador cilindro-parabólico.....	24
Figura 18 - Desenho do molde do concentrador cilindro-parabólico.....	25

Figura 19 - Análise do direcionamento dos raios solares.....	25
Figura 20 - Desenho da modificação do perfil.....	26
Figura 21 - Desenho do perfil alterado.....	26
Figura 22 - Desenho da estrutura do concentrador.....	27
Figura 23. Tubo absorvedor do concentrador proposto.....	27
Figura 24. Detalhes do concentrador em estudo e de seus componentes.....	28
Figura 25. Desenho do circuito eletrônico.....	29
Figura 26. Desenho da placa de circuito impresso.....	29
Figura 27. Sistema de automatização do concentrador em estudo.....	29
Figura 28. Esquema do processo de termoconversão da energia solar.....	30
Figura 29. Fluxo de energia do concentrador cilindro parabólico.....	31
Figura 30. Concentrador cilindro parabólico em teste.....	37
Figura 31. Detalhes do sistema de alimentação do concentrador proposto.....	38
Figura 32. Concentrador cilindro-parabólico em operação.....	39
Figura 33. Concentrador cilindro-parabólico em operação.....	40
Figura 34. Concentrador cilindro-parabólico em operação.....	41
Figura 35. Diagrama de bloco da automação do concentrador.....	42
Figura 36. Radiômetro construído no LMHES da UFRN.....	43
Figura 37. Curva de calibração do radiômetro utilizado nas medições de radiação solar global.....	44

Figura 38. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor do concentrador solar em estudo.....	50
Figura 39. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio..	50
Figura 40. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor do concentrador solar em estudo.....	51
Figura 41. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio..	52
Figura 42. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	53
Figura 43. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	54
Figura 44. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	54
Figura 45. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	55
Figura 46. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	56
Figura 47. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	56
Figura 48. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	57
Figura 49. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	57
Figura 50. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	58
Figura 51. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	59
Figura 52. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	59
Figura 53. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	60
Figura 54. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	61
Figura 55. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	62
Figura 56. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	62

Figura 57. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	63
Figura 58. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	64
Figura 59. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	64
Figura 60. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	65
Figura 61. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	65
Figura 62. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.....	67
Figura 63. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.....	67
Figura 64. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.....	68
Figura 65. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.....	68
Figura 66. Comportamento assumido pelo volume de água vaporizado.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados usados para cálculo de parâmetros do concentrador.....	45
Tabela 2. Teste do concentrador em estudo - SEM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO.....	49
Tabela 3. Teste do concentrador em estudo - SEM CARGA/COM AUTOMAÇÃO.....	51
Tabela 4. Teste do concentrador em estudo - COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO.....	52
Tabela 5. Teste do concentrador em estudo - COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO.....	55
Tabela 6. Teste do concentrador em estudo - COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO.....	58
Tabela 7. Teste do concentrador em estudo - COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO.....	60
Tabela 8. Teste do concentrador em estudo - COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO.....	63
Tabela 9. Resultados médios gerais obtidos nos testes com o concentrador em estudo.....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$  = Área total da superfície de captação ( $m^2$ )

$A_i$  = Área do absorvedor iluminada pela radiação refletida ( $m^2$ )

$A_s$  = Área sombreada pelo tubo absorvedor ( $m^2$ )

$A_t$  = Área do tubo absorvedor onde ocorrem as perdas térmicas ( $m^2$ )

$C$  = Fator de concentração da energia solar

$D$  = Diâmetro do tubo absorvedor (m)

$GW$  = Giga Watts

$h$  = Coeficiente de transferência convectiva ( $W/m^2.K$ )

$I_d$  = Radiação solar direta instantânea coletada pelo sistema de captação ( $W/m^2$ )

$L$  = Comprimento do tubo absorvedor (m)

$K$  = Condutividade térmica ( $W/m.K$ )

$P_{abs}$  = Potência máxima que chega ao tubo absorvedor (W)

$k_{rd}$  = Fração da radiação refletida que chega no absorvedor (%)

$MW$  = Mega Watts

$Nu_D$  = Número de Nusselt

$P_{abs}$  - Potência máxima absorvida (W)

$P_{conv}$  = Potência perdida por convecção (W)

$P_{perdidas}$  = Potências perdidas (W)

$Pr$  = Número de Prandtl

$P_{rad}$  = Potência perdida por radiação para o meio ambiente (W)

$Re_D$  = Número de Reynolds

$T$  = Temperatura absoluta no foco (K)

$TW$  = Tera Watts

$T_{\infty}$  = Temperatura ambiente (K)

$T_{abs}$  = Temperatura do tubo absorvedor (K)

$T_{viz}$  = Temperatura da vizinhança (K)

$V$  = Velocidade do vento (m/s)

$\alpha_t$  - Absortividade do tubo absorvedor (%)

$\varepsilon$  = Emissividade do tubo absorvedor (%)

$\eta_o$  = Eficiência ótica do sistema de captação da energia solar (%)

$\eta_t$  = Eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico (%)

$\eta_u$  = Eficiência útil de conversão (%)

$\nu$  = Viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

$\rho$  = Refletividade do concentrador (%)

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot ^\circ K^4$ )



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação do Trabalho

O presente trabalho apresenta os processos de dimensionamento, construção, montagem e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilindro-parabólico destinado a aquecer e/ou vaporizar água para aplicações residenciais, comerciais e industriais.

Não tem-se a pretensão de substituir integralmente o uso da energia elétrica ou do gás no processo de aquecimento ou vaporização de fluidos, mesmo porque não seria possível, pois sendo o concentrador solar um equipamento cuja operacionalidade só tem sentido com a presença da radiação solar direta, é perfeitamente compreensível que haverá ocasião em que o sol não ofereça tais condições de operacionalidade, quer por questões de forte nebulosidade, quer em decorrência de períodos chuvosos e fatores outros que impeçam a presença da radiação direta e neste caso o uso da energia elétrica, do gás natural ou GLP se torna imperativo.

O concentrador solar proposto é uma alternativa energética ecologicamente correta que não deve ser negligenciada. Se constantemente usado nas horas em que o sol permita o seu emprego, esse equipamento solar representará uma contribuição significativa à política de desenvolvimento sustentável, quer reduzindo o consumo de energia obtida através de fontes não renováveis, quer contribuindo para uma melhoria das condições ambiental pela não emissão de poluentes e não degradação da cobertura vegetal do planeta.

A proposta deste trabalho é projetar, construir e analisar um concentrador solar cilindro-parabólico com baixo custo de fabricação, e que possa funcionar no período entre as 08:00 e 15:00 h, em regiões de baixa ou nenhuma nebulosidade. A região nordeste é a mais viável das regiões brasileiras para o uso desse equipamento, uma vez que apresenta uma média de horas de insolação da ordem de 3000/ano.

Uma das inovações apresentadas pelo trabalho foi a maneira como foi obtida a superfície refletora do concentrador. Utilizou-se um procedimento matemático através de uma fórmula para a obtenção do cilindro-parábola, e em seguida foi realizada uma modelagem utilizando o AutoCad para o diagnóstico da captação dos raios refletidos por parte do absorvedor.

Percebendo-se que a área de raios refletidos não direcionados ao absorvedor era significativa para algumas regulagens no que diz respeito ao acompanhamento do movimento aparente do sol, alterou-se a abertura do cilindro-parábola com o objetivo de minimizar as perdas reflexivas.

Uma outra inovação do trabalho foi a construção e montagem de dois sistemas de automatização para o acompanhamento do movimento aparente do sol, além do sistema manual usual apresentado por todos os concentradores que trabalham com radiação solar direta, necessitando, portanto, de regulagem para a garantia da radiação concentrada no seu foco. Os sistemas de automatização proporcionam mais comodidade ao usuário do concentrador solar, e as duas versões projetadas e montadas utilizaram um circuito eletrônico de baixo custo que aciona um motor através de foto-sensores, e de temporizadores. Tais sistemas são de baixo custo, pois utilizam componentes eletrônicos simples e baratos.

Um outro fator inovador é o fato de se utilizar segmentos de espelhos de menor largura em relação a outros concentradores mostrados pela literatura. Isso permite uma perfeição maior da superfície refletora do concentrador, diminuindo as perdas reflexivas, proporcionando a obtenção de uma maior temperatura no seu foco.

Portanto, serão enfocadas inovações mais aprofundadas sobre os seguintes parâmetros: forma de obtenção do perfil da superfície refletora, otimização do processo construtivo da mesma, utilização de diferentes materiais, otimização do processo de captação e reflexão da energia radiante, geometrias para os absorvedores, acompanhamento dos movimentos aparentes do sol automatizado, dentre outros.

Uma outra característica do trabalho foi a utilização de materiais de sucata para a confecção da estrutura do concentrador. Uma carcaça de birô de aço foi utilizada como elemento central dessa estrutura, diminuindo consideravelmente o custo do sistema.

Tais processos de otimização darão um maior poder de competitividade ao concentrador em relação aos combustíveis convencionalmente utilizados, e proporcionará uma maior viabilidade de utilização para tal protótipo, que tem alcance social e ecológico inestimáveis. Tais estudos têm como prioridades contribuir para a diminuição das desigualdades sociais; evitar a migração do homem do campo; como também, propiciar até uma forma de geração de renda pelo repasse da tecnologia de fabricação de tal equipamento às comunidades rurais.

O presente trabalho está dividido em capítulos, da seguinte maneira:

O capítulo 1, através da introdução, faz uma breve descrição do trabalho;

O capítulo 2 apresenta um estudo sobre o estado da arte, no campo da energia solar e dos concentradores;

O capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos utilizados na construção e análise do concentrador solar projetado. Aqui são apresentados a relação dos materiais utilizados, os detalhes de construção, princípio de funcionamento e a metodologia experimental empregada;

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos no procedimento experimental, bem como a análises de gráficos, tabelas e comentários;

O capítulo 5 trata das conclusões e sugestões em função da análise dos resultados.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Projetar, construir e testar um concentrador solar cilindro parabólico destinado ao aquecimento e vaporização de água.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1 - Descrever os processos de fabricação e montagem do concentrador solar cilindro parabólico automatizado e de custo baixo;

2 - Ensaiar tal equipamento demonstrando sua viabilidade térmica;

3 - Demonstrar a viabilidade econômica do concentrador em estudo;

4 - Comparar o seu desempenho com e sem automatização;

---

## **2. ESTADO DA ARTE**

A seguir serão apresentados estudos e ações implementadas no que diz respeito à realidade mundial das energias alternativas e dos sistemas de concentração da energia solar radiante. Serão abordados aspectos das pesquisas com concentradores solares, na UFRN e no mundo.

### **2.1. A Importância das Energias Renováveis**

#### **2.1.1. O Futuro**

Olhando para o futuro, perceber-se-á que o custo da energia tenderá a ser sempre maior, e que a crise de combustíveis fósseis e de madeira tornar-se-á mais e mais aguda. As formas de suprimento de energia estão determinando o curso dos desenvolvimentos social e econômico. O suprimento de energia será a base para um elevado e sustentável nível de segurança e conforto. A energia também determinará o balanço ecológico.

As tecnologias e fontes energéticas que se usam nos dias atuais influenciarão significativamente o amanhã. Há também uma grande evidência de que a maioria das tecnologias energéticas em uso não é ecologicamente apropriada e podem provocar sérias e irreversíveis mudanças climáticas, bem como a constatação de que a quase totalidade destas fontes energéticas não são renovável e estão se esgotando rapidamente. Em função dessas percepções, o direcionamento às fontes renováveis de energia é inevitável. As fontes de energias eólica, solar e de biomassa são abundantes, amplamente distribuídas e ecologicamente atrativas. Essas fontes não poluem a atmosfera e não contribuem para o aumento da temperatura do planeta.

#### **2.1.2. A Importância da Energia Solar**

O sol é uma fonte de energia perene, silenciosa e não poluente, sendo responsável por todas as formas de vida no nosso Planeta. Diariamente o sol libera uma grande quantidade de energia através de ondas eletromagnéticas. Uma parcela dessa energia incide sobre a Terra, e sofre pequena atenuação quando interage com os gases atmosféricos.

A energia solar gera processos naturais, como a fotossíntese que combina a energia luminosa do sol com o dióxido de carbono da atmosfera para armazenar energia nas plantas em forma de hidrocarbonos. Na realidade, a maior parte da energia que utilizamos na Terra vem do Sol. Os Ventos, Biomassas (inclusive fóssil), Quedas d'água, são todos resultado da irradiação luminosa emitida pelo Sol.

A energia oriunda do sol pode ser utilizada para diversas finalidades, substituindo, em muitos casos com vantagens, outras formas convencionais de energia que vêm sendo utilizadas pelo homem há décadas.

O interesse por fontes alternativas de energia vem crescendo muito nos últimos anos. A energia solar é uma forma de energia absolutamente pura, não poluente, não produz fumaça e nem resíduos radioativos. Constitui-se, portanto, numa forma ideal de energia para proteção do meio ambiente. Atualmente já existem tecnologias e projetos de utilização da energia solar para varias aplicações, através de equipamentos como: Coletores Planos; Secadores Solares; Fogões Solares; Dessalinizadores; Concentradores Parabólicos; Placas Fotovoltaicas; etc.

Citar a Energia Solar como solução para todos os problemas energéticos da humanidade representa desconhecer as limitações técnicas de tal alternativa. Porém o imenso potencial energético de tal fonte não pode ser desprezado por nenhum país do mundo, em tempos de economia de combustíveis convencionais. Representa, no entanto, uma alternativa bastante significativa para a composição da matriz energética.

Considerando-se que o consumo energético anual atual corresponde a  $1,5 \times 10^8$  GWh, conclui-se que a energia solar disponível nas massas continentais representa mais de 1000 vezes o consumo de energia da humanidade. Isso equivale a dizer que menos de 1% da energia solar disponível nas massas continentais seria suficiente para suprir de energia, a humanidade. Se considerarmos toda a área da Terra a disponibilidade aumenta para  $1,02 \times 10^{13}$  GWh (Souza, 2002).

Pelo fato do Brasil possuir uma grande extensão territorial, sendo grande parte situada na zona tropical e com alta incidência de radiação solar, torna-se possível desenvolver tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, etc. Mas sua utilização é ainda muito reduzida.

Vários países possuem projetos em desenvolvimento e já utilizam a energia solar em muito maior escala que o Brasil. A Califórnia, EUA, tem atualmente uma instalação capaz de gerar uma grande quantidade de energia elétrica a partir da tecnologia solar. Na Suíça, igualmente, possui programa para produção de energia elétrica a partir da energia solar. Em Freiburg, Alemanha, se constroem casas, com telhados cobertos com painéis fotovoltaicos, que produzem mais energia do que consomem (Bezerra, 2001). Na Índia, na China e no Kênia, os fogões solares fazem parte do cotidiano.

Os maiores índices de radiação são observados na Região Nordeste, com destaque para o Vale do São Francisco, onde a média anual é de aproximadamente 6 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Os menores índices são observados no Litoral Sul-Sudeste, incluindo a Serra do Mar, e na Amazônia Ocidental, respectivamente. No Amapá e Leste do Pará, onde também se observam índices inferiores à média nacional. É importante ressaltar que mesmo as regiões com menores índices de radiação apresentam grande potencial de aproveitamento energético ([www.inpe.gov.br](http://www.inpe.gov.br)).

Tratando-se do Rio Grande do Norte, considera-se uma Radiação Solar Global média entre 0,5 a 0,7 KW/m<sup>2</sup>, com nível de insolação médio da ordem de 8 horas por dia.

### **2.1.3. O Desenvolvimento e o Meio Ambiente**

O desenvolvimento de um país deverá ser fundamentado no sentido de evitar os riscos ecológicos decorrentes desse mesmo desenvolvimento.

O extraordinário aumento do consumo de energia verificado nas três últimas décadas tem chamado a atenção para o seu impacto sobre os recursos ecológicos, principalmente nos países altamente industrializados. A poluição do ar e das águas, não conhece limites políticos. O homem pode criar nações, mas, não pode criar a biosfera que é única na Terra.

A exploração de energia em um país pode seguramente gerar efeitos adversos em outros países e oceanos quando tal exploração negligencia as normas internacionais de segurança. Não há dúvida de que o consumo de energia continuará a aumentar, principalmente nos países ávidos de desenvolvimento como é o caso do Brasil.

A causa principal da poluição do ar no mundo industrializado é devido à combustão de materiais fósseis em veículos e outros meios de transporte, nas indústrias, usinas termoelétricas,

edifícios comerciais, residenciais, etc. Entre os principais poluentes estão os hidrocarbonetos, os óxidos de enxofre, nitrogênio e partículas sólidas de materiais.

Estes poluentes, de formas diversas, afetam a saúde das populações, dos animais, das plantas e até mesmo podem causar danos materiais a edifícios.

No caso da água, a poluição está caracterizada pelo rejeito residencial e industrial lançados nos rios e seus afluentes, detritos aquecidos das usinas elétricas, vazamento de petróleo nos oceanos, a assim por diante.

As usinas nucleares constituem-se em outro tipo de ameaça à ecologia. O lixo atômico radioativo é na verdade um problema que transcende todas as diferenças nacionais e culturais e que se estenderá por séculos afora.

Acredita-se que o freio ecológico final ao consumo de energia não será caracterizado pela exaustão dos recursos nem pelos efeitos específicos da poluição, porém pelo impacto do consumo de energia sobre o clima da terra. Assim como no passado o clima da terra foi afetado por profundas mudanças, como por exemplo, o desaparecimento de terras férteis transformadas em desertos calcinados em decorrência da Era Glacial, não resta dúvidas de que no futuro, mesmo independente do controle do homem, forças naturais causarão outras modificações climáticas importantes.

O consumo de energia na atividade contemporânea está se aproximando de níveis, nos quais a possibilidade de efeitos irreversíveis sobre o clima da terra, começa a se constituir numa preocupação crescente.

Uma das restrições técnicas à difusão de projetos de aproveitamento de energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que torna necessário o uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável. Comparando-se, contudo, a outros recursos, como a energia hidráulica, por exemplo, observa-se que a limitação de espaço não é tão restritiva ao aproveitamento da energia solar.

Tomando-se como referência um índice médio global de radiação solar no Brasil de 1.800 kWh/m<sup>2</sup> ao ano, o consumo total de energia elétrica em 1998 (cerca de 300 TWh) e uma eficiência de conversão de 12%, seriam necessários 1.400 km<sup>2</sup> de coletores solares (0,016% do

território nacional); o que corresponde a somente 5% da área alagada por usinas hidrelétricas no Brasil. (Centro e Energias Renováveis - UNESP , 2005).

## **2.2. Concentradores Termossolares**

Sistemas Termossolares de Concentração (STC) é a denominação genérica dada a uma série de sistemas tecnológicos diferentes, concebidos com a finalidade de converter a componente direta da radiação solar em outra forma de energia, para sua imediata utilização ou armazenamento, mediante o uso de concentradores solares.

Entre estas tecnologias, há três que se destacam pelo alto grau de desenvolvimento: os sistemas de coletores cilindro parabólicos (CCP), os sistemas de receptor central (CRS) ou sistemas de torre, e os discos parabólicos (DP) ou discos stirlings. Os primeiros concentram a radiação solar em um eixo (foco linear), enquanto que os dois últimos a concentram em um ponto (foco pontual), obtendo com isso maiores relações de concentração e conseqüentemente maior temperatura.

Os sistemas a concentração são normalmente constituídos por coletores de forma parabólica, semi-esférica, cilindro-parabólico, cônica e tronco-cônica. Estes sistemas, para que possam apresentar um desempenho satisfatório, necessitam de radiação direta, céu claro e sem nebulosidades.

### **2.2.1. Os Concentradores no Mundo**

Das principais tecnologias atuais de STCs (Receptor Central, Coletores Cilindro Parabólicos e os Discos Stirlings), as plantas com concentradores cilindro parabólicos são as que contam atualmente com uma maior experiência comercial. As novas plantas SEGS (Solar Electricity Generating Systems) atualmente em operação na Califórnia, com mais de 2,5 milhões de metros quadrados de CCP, são o melhor exemplo do estado da arte desta tecnologia. Com uma capacidade de produção em regime comercial de 354 MW, as plantas SEGS têm acumulado grande experiência no desenho e implementação deste tipo de STC (Lotker, 1991).

A seguir apresentam-se alguns dos projetos mais significativos até o presente momento no campo dos STCs - Sistemas Termossolares de Concentração. (Pérez, 2005).



### 2.2.1.1. Sistemas de Concentradores Cilindro Parabólicos

Atualmente, além de uma numerosa quantidade de pequenas instalações com caráter investigativo e demonstrativo, foi levantado um total de nove plantas de produção de energia elétrica utilizando tecnologia de coletores cilindro-parabólicos que somam um total de 350 MW instalados. As experiências mais significativas são as seguintes:

#### **Espanha:**

Campo Acurex, 0,5 MW, Almería: Este campo consta de 20 filas de 80 m de comprimento cada uma com orientação Leste-Oeste e sistema de seguimento solar em um eixo. A abertura dos coletores Acurex 3001 é de 1,83 m, e a superfície de captação deste campo é de 2674 m<sup>2</sup>. A Figura 1 mostra o campo solar descrito.



Figura 1. Campo Acurex em Almeria – Espanha.

Campo Ace 20, 50 kW, Almería: Este campo de coletores tipo Ace 20, de 2,5 m de abertura e 132,5 m de comprimento foi construído na Plataforma Solar de Almería com o objetivo de alcançar temperaturas em torno dos 300°C mediante um coletor cilindro-parabólico de baixo custo. A Figura 2 mostra o campo solar descrito.



Figura 2. Campo Ace em Almería – Espanha

Campo DISS, 0,5 MW, Almería: Este campo é constituído por um concentrador solar cilindro-parabólico de 500 m de comprimento, composto por 40 módulos de 12,5 m de comprimento e 5,76 m de abertura. A superfície de captação deste campo é de 2880 m<sup>2</sup>. A Figura 3 mostra a usina solar descrita.



Figura 3. Campo DISS em Almería – Espanha.

Campo Eurotrough, 50 kW, Almería: Com objetivo de introduzir eficiência ao controle do sol sobre a estrutura LS3 para coletores cilindro-parabólicos, um consórcio de empresas européias, entre as que participam a Inabensa desenvolveu um novo conceito de estrutura metálica denominada Eurotrough, de módulos de 12,5 m de comprimento com abertura de 5,76 m sobre as quais se podem utilizar espelhos de Pilkington e os tubos de Sol. A Figura 4 mostra a usina solar descrita.



Figura 4. Campo Eurotrough em Almería – Espanha.

#### **USA:**

Plantas SEGS, 354 MW, Califórnia: Em 1993. A Southern California Edison (SCE) firmou um acordo com Luz International Limited (LIT) para comprar a energia produzida pelas primeiras plantas termossolares, chamadas de Solar Electric Generating System (SEGS-I e II). Posteriormente, a LIT firmou com a SCE vários acordos para construir as plantas SEGS-III a SEGS IX. Desde a primeira planta de 14 MW, e abertura de espelhos de 3 m até as últimas LS3 de 80 MW e quase 6 m de abertura tem-se incorporado importantes melhorias na estrutura e tubos absorvedores. No total foram construídas nove plantas, com uma potência total instalada de 354 MW. A Figura 5 mostra a planta solar descrita.



Figura 5. Planta Solar SEGS na Califórnia – EUA.

### **Israel:**

DSG System, 0,5 MW, Ben Gurion: Instalação composta por 20 módulos LS3 de 25 m de comprimento e 6,76 m de abertura, para ensaios de tubos absorvedores e produção direta de vapor. A empresa Solel, Jerusalém, é a proprietária de patentes de estrutura LS3 e tubo absorvedor. A Figura 6 mostra o campo solar DSG (Direct Steam Generation) descrito.



Figura 6. Campo Solar DSG System em Ben Gurion – Israel.

### 2.2.1.2. Sistema de Receptor Central

Atualmente existem mais de nove instalações diferentes com caráter demonstrativo. Algumas iniciaram como plantas de produção de eletricidade e foram se transformando ao longo dos anos em centros de investigações de energia solar. As experiências mais significativas são as seguintes:

#### **Espanha:**

Campo SSPS-CRS, 0,5 MW, Almería: Este campo tem como origem uma planta de produção de eletricidade com receptor de sódio. Na atualidade se inclui nas instalações que o Ciemat opera com o nome de Plataforma Solar de Almería. Este campo possui 92 heliostatos Martin-Marietta (USA) e MBB (USA) de 40 m<sup>2</sup> cada e serve de local de ensaio para todos tipos de protótipos de heliostatos, receptores, etc. Cabe destacar o banco de ensaios Sulzer para receptores volumétricos de ar, e a plataforma para o ensaio de receptores de sais RAS (Receptor de Ar e de Sais). A Figura 7 mostra o campo solar descrito.



Figura 7. Campo Solar SSPS-CRS em Almería – Espanha.

Campo CESA 1, 1,2 MW, Almería: Este campo tem como origem uma planta de produção de eletricidade com receptor de vapor superaquecido que entrou em operação em 1983. É propriedade da Ciemat e está localizado na Plataforma Solar de Almería. Conta com um total



de 300 heliostatos de 40 m<sup>2</sup> de CASA e Sener (Espanha), e protótipos da Inabensa (Espanha). Atualmente são ensaiados neste campo, o receptor TSA, volumétrico de ar de 1 MW, e o receptor Refos, volumétrico fechado, para turbina de gás de 0,1 MW. A Figura 8 mostra o campo solar descrito.



Figura 8. Campo Solar CESA 1 em Almería – Espanha.

#### **USA:**

Campo Solar 1, 10 MW, Califórnia: Planta com receptor de vapor saturado. Conta com 1926 heliostatos Boeing. Entrou em funcionamento em 1984, e esteve operativo até o final da década de 80. No ano de 1996 foi transformado em planta de sais fundidos.

Campo Solar 2, 10 MW, Califórnia: Sobre o mesmo campo de heliostatos e torre do Campo Solar 1 se realizaram as reformas necessárias para ensaiar um novo receptor e sistema de geração de sais fundidos. Entrou em funcionamento em 1996 e operou até abril de 1999. Permitiu demonstrar a viabilidade técnica dos sais fundidos e do armazenamento térmico em dois tanques, um frio e outro quente. A Figura 9 mostra o campo solar descrito.



Figura 9. Campo Solar 2 na Califórnia – EUA.

Campo NSTTF, 1,5 MW, Novo México: Centro de Investigação e Ensaio em Albuquerque. É operado pela Sandia National Laboratories para o Departamento de Energia de U.S.A. Seu funcionamento como centro de ensaios começou em 1978. Conta com 222 heliostatos Martin-Marietta de aproximadamente  $40 \text{ m}^2$  cada um. A Figura 10 mostra o campo solar descrito.



Figura 10. Campo Solar NSTTF no Novo México – EUA.

**Israel:**

Campo do Instituto Weizmann, Rehovot: Centro de Investigação. Foi inaugurado em 1988. Conta com 64 heliostatos de Asinel (Espanha) com superfície refletora da Inabensa (Espanha) de aproximadamente 55 m<sup>2</sup> cada. Tem servido de plataforma de ensaios para receptores de vapor saturado e de ar comprimido para turbina. A Figura 11 mostra o campo solar descrito.



Figura 11. Campo Solar do Instituto Weizmann em Rehovot – Israel.

**2.2.1.3. Discos Parabólicos**

Até agora foram desenhados protótipos que funcionam com potências entre 15 kW e 50 kW, e são encontrados nos centros de investigações da Espanha, Alemanha, Estados Unidos, Arábia, etc. Estes sistemas que funcionam perfeitamente nestas localidades são mais caros que as outras tecnologias se considerado a construção de grandes plantas.

Apesar da incerteza desta tecnologia para grandes plantas, têm a seu favor o fato de possuírem sistemas modulares, além da vida útil dos motores Stirling, em torno de 30.000 h a plena potência, equivalente ao funcionamento de uma central durante 15 anos.



**Europa:**

Atualmente um consórcio Europeu no qual participa a Inabensa, elabora melhoras que impliquem no barateamento destes sistemas com projetos de desenvolvimento do protótipo Eurodish. Este protótipo que incorpora um motor Stirling da companhia Alemã Solo, foi desenhado especificamente para este tipo de aplicação solar. A empresa encarregada do desenvolvimento do disco parabólico especular dentro deste consórcio é a SBP, também da Alemanha. A Inabensa é a responsável pela fabricação e montagem do conjunto que se acopla ao motor Stirling fabricado pela companhia Solo. A Figura 12 mostra o campo solar Eurodish.



Figura 12. Campo Solar Eurodish na Alemanha.

**USA:**

Um consórcio no qual participa Departamento Norte-americano de Energia (DOE), e Boeing entre outros, desenvolveram um protótipo Disco Stirling de 25 kW. A Figura 13 mostra o protótipo desenvolvido.



Figura 13. Protótipo Dish-Stirling nos EUA.

**Arábia Saudita:**

A Arábia Saudita possui dois protótipos de Disco Stirling 50 kW cada. A Figura 14 mostra os protótipos instalados.



Figura 14. Protótipos Dish-Stirling na Arábia Saudita.

## 2.3. Concentradores Cilindro Parabólicos

O coletor cilindro parabólico, denominado pela sigla CCP, deve seu nome a um de seus componentes principais: a superfície refletora cilindro parabólica que reflete a radiação solar direta, concentrando-a sobre um tubo absorvente colocado na linha focal da parábola. Esta radiação concentrada sobre o tubo absorvedor faz com que o fluido que circula pelo seu interior se aqueça, transformando desta forma a radiação solar em energia térmica, na forma de calor sensível ou latente de fluido.

Como qualquer outro coletor à concentração, os CCP's só podem aproveitar a radiação solar direta, o que exige que o coletor vá modificando sua posição durante o dia. Este movimento é obtido mediante o giro em torno de um eixo paralelo à sua linha focal.

O tipo de fluido de trabalho utilizado nos CCP's depende da temperatura à que se deseja aquecer. Para temperaturas moderadas ( $<200^{\circ}\text{C}$ ), pode-se utilizar água desmineralizada ou Etileno Glicol como fluido de trabalho. Os óleos sintéticos são utilizados nas aplicações onde busca-se a obtenção de temperaturas mais altas ( $200^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$ ) (Gil, 2001).

### 2.3.1. Histórico

A idéia de concentração da energia solar não é novidade. Nem mesmo a utilização de parábolas para aquecer é uma descoberta: os vikings ateavam fogo às velas das embarcações inimigas utilizando um equipamento semelhante (Censolar, 2001).

O concentrador solar parabólico composto CPC foi proposto inicialmente por Winston (1974), e é adequado para temperaturas de até  $256^{\circ}\text{C}$ , sem necessidade de mecanismo de acompanhamento solar e de custo relativamente baixo.

Na sua forma convencional, utiliza superfícies concentradoras na forma de parábolas truncadas que refletem a radiação solar no seu eixo onde um tubo absorvedor recebe esta energia. Pelo interior do tubo circula um fluído a ser aquecido, normalmente água. A utilização do CPC com a finalidade de aquecimento de água para uso doméstico é relatada em alguns trabalhos, mas foi constatado que, devido a sua baixa eficiência global, essa aplicação era muito desvantajosa, se comparado com os coletores planos usados para a mesma finalidade.

Duff, Lameiro e Löff em 1975 propuseram um modelo para avaliação de viabilidade

econômica de vários tipos de concentradores solares com absorvedores de foco linear. O estudo busca encontrar um custo mínimo para uma usina solar utilizando concentradores para a geração de energia elétrica.

Mullick e Nanda em 1982 propuseram um novo método para a determinação do fator de perda térmica em concentradores solares de foco linear. Nesse trabalho o absorvedor está recoberto por um tubo de vidro transparente cilíndrico, e foi exposto a velocidades de vento no intervalo entre 0,5 e 10,0 m/s.

Mendes (1984) utilizou os tubos de calor como absorvedores envolvidos por tubos de vidro evacuados, em um sistema de CPC(s) para obter água quente a 80°C.

Bhowmik, Mathur e Kandpal em 1985 apresentaram um estudo sobre as temperaturas de operação em concentradores solares lineares, levando em conta a emissividade do absorvedor, a velocidade do vento e o coeficiente de perda térmica.

Negi, Mathur e Kandpal em 1985 estudaram a quantidade de energia útil fornecida por concentradores solares de foco linear usando absorvedores tubulares. Calculou-se a temperatura máxima obtida para várias localidades do mundo. Estudou-se também a eficiência do sistema utilizando absorvedores recobertos para a minimização das perdas convectivas.

Riveros e Oliva em 1986 apresentaram um método gráfico de análise para determinar o desempenho de concentradores solares. Priorizaram no estudo as perdas reflexivas.

Grald e Kuehn em 1989 avaliaram o desempenho de um concentrador parabólico com absorvedor poroso. Os parâmetros principais de análise foram a vazão mássica, o ângulo de reflexão da radiação, as dimensões do receptor e as propriedades dos materiais em relação a eficiência térmica.

Spirkl, Muschaweck e Timinger em 1997 estudaram a influência de vários tipos de refletores utilizados em concentradores, levando em conta principalmente as perdas reflexivas, o sombreamento e a concentração solar.

Richter em 1999 estudou os parâmetros ópticos de dois concentradores solares com absorvedores lineares, testando-os para os posicionamentos norte-sul e leste-oeste.

Hamad em 2003 apresentou um estudo experimental para determinar o desempenho de um concentrador cilindro parabólico com um novo design do absorvedor. Os experimentos foram realizados durante o inverno e verão em Basrah, Iraque. Verificou-se que o desempenho do concentrador depende principalmente da vazão mássica de água.

Souza, em 2005, estudou um concentrador cilindro-parabólico, destinado ao aquecimento de água para uma vazão de 200 L/dia, trabalhando em torno de 7 h/dia, com superfície refletora de 3,0 m<sup>2</sup> de área, constituída por um filme de polietileno (papel aluminizado), obtendo temperaturas em torno de 50°C. Para uma vazão de 8 L/h, a temperatura da água ficou em torno de 85°C. A temperatura máxima no foco para a menor vazão trabalhada ficou em torno de 117°C.

Leutz e Annen em 2006 apresentaram um modelo para avaliar o desempenho de concentradores solares estacionários. O método utilizado permite a otimização em relação a parâmetros como posicionamento e inclinação

No trabalho aqui apresentado, procurou-se desenvolver uma análise térmica sistemática visando obter resultados teóricos e experimentais que viabilizassem o uso de CCP com tubos de calor sem invólucro evacuado, fornecendo água aquecida para uso doméstico, com baixo custo de fabricação e simplicidade.

Para a realização dos testes de campo, foi construído um protótipo para ensaios segundo as orientações retiradas de Duffie (1991). O tubo de calor foi projetado e construído conforme roteiros já desenvolvidos por Duarte (1985) e Rocha (1988), denominados “Heat Pipe”.

### **2.3.2. Desenvolvimento de Concentradores no LES/UFRN**

A experiência na fabricação de sistemas de aquecimento do tipo cilindro-parabólico, já é uma realidade no Laboratório de Energias Solar da UFRN, já tendo sido construídos dois sistemas que utilizam este princípio. A Figura 15 mostra um dos protótipos desenvolvidos no LES-UFRN, trata-se de um sistema de aquecimento para a produção de vapor, tendo sido obtido em ensaios preliminares, temperaturas no absorvedor sem carga em torno de 200°C.



Figura 15. Concentrador cilindro-parabólico construído no LMHES-UFRN.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o concentrador solar proposto que visa diminuir os custos de fabricação de sistemas de aquecimento e vaporização de água através do uso da energia solar, tornando-os mais acessíveis à população, além de oferecer, como de costume no LES/UFRN, mais uma alternativa tecnológica para a diminuição do custo da energia.

Este dispositivo visa aliviar a matriz energética, através da substituição do uso de combustíveis convencionais pela utilização de uma fonte energética limpa, inesgotável e disponível em grande quantidade em quase todas as regiões do mundo, e que é prioridade de investimento nos países desenvolvidos.

O concentrador solar projetado que tem como características: mecanismo de rastreamento do movimento aparente do sol, concentração de foco linear, fator de concentração ajustável durante o projeto, manutenção simples e barata, equipamento desmontável para facilitar seu transporte, baixo peso, além de representar uma inovação em relação aos protótipos concebidos até então no LES/UFRN.

Um aspecto que mereceu atenção para a fabricação da superfície cilindro-parabólica foi a construção de um molde com dimensões pré-definidas, sobre o qual se aplicou fibra de vidro.

#### 3.1. Processos de Fabricação e Montagem do Concentrador Solar

Para a construção do concentrador solar proposto foram utilizados os seguintes procedimentos:

- **Projeto das dimensões do cilindro-parabolóide**

As dimensões foram definidas a partir da pretensão de obter-se um concentrador com área em torno de  $2,0 \text{ m}^2$  (2m x 1m).

• **Desenho do perfil cilindro parabólico**

Foi desenhado no Autocad em escala o perfil cilindro-parabólico utilizando a equação descrita por Duffie (1991), para análises dos ângulos de reflexão dos espelhos. A Figura 16 mostra o gráfico da citada equação, e a Figura 17 o perfil cilindro parabólico obtido.

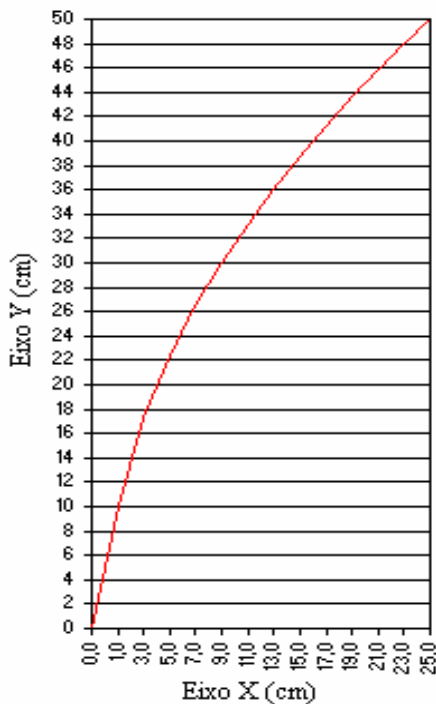


Figura 16. Curva da parábola.

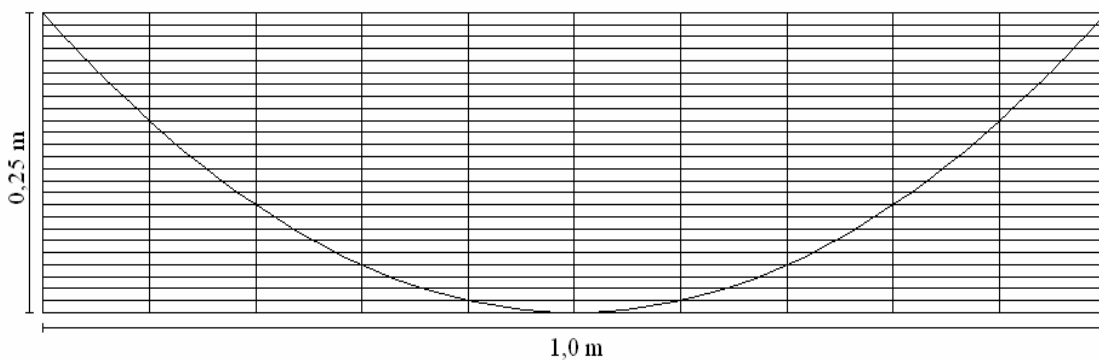


Figura 17. Desenho do perfil do concentrador cilindro-parabólico.

• **Desenho e confecção do molde**

Utilizando o desenho do perfil mostrado na figura 17 confeccionou-se um molde de calha de alumínio de 2 mm de espessura e madeira de 15 mm de espessura. Sobre a superfície do



molde foi aplicada primeiramente uma cera desmoldante e em seguida duas camadas de fibra de vidro e resina ortoftálica, obtendo a estrutura cilindro-parabólica desejada.

Após o tempo necessário de secagem, retirou-se a peça em fibra com um grau de resistência e perfeição bastante satisfatório. A Figura 18 mostra o desenho do molde do concentrador cilindro parabólico.

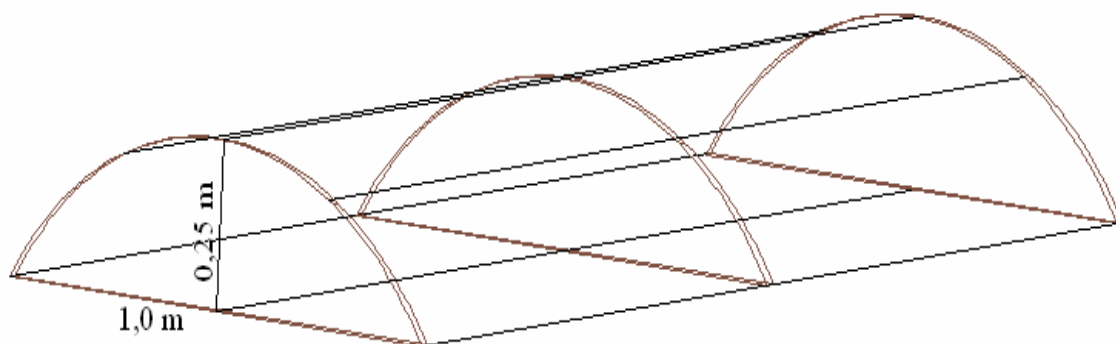


Figura 18. Desenho do molde do concentrador cilindro-parabólico.

Após a obtenção do perfil da parábola em fibra de vidro foi feita uma simulação da superfície refletora da parábola em relação aos ângulos de incidência e de reflexão. Foi constatado que havia um desvio reflexivo importante em alguns segmentos de espelhos acarretando o não direcionamento dos raios refletidos para o absorvedor, como mostra a Figura 19. Percebeu-se que baixando as bordas do perfil da parábola, já construído em fibra de vidro, o problema seria atenuado, conforme mostrado na Figura 20. Partiu-se, então, para essa solução que se configurou e está mostrada na Figura 21, onde se percebeu um aumento da abertura do perfil cilindro parabólico de 12%. Com isso houve uma alteração na distância focal da parábola que passou de 0,25 m para 0,5 m.

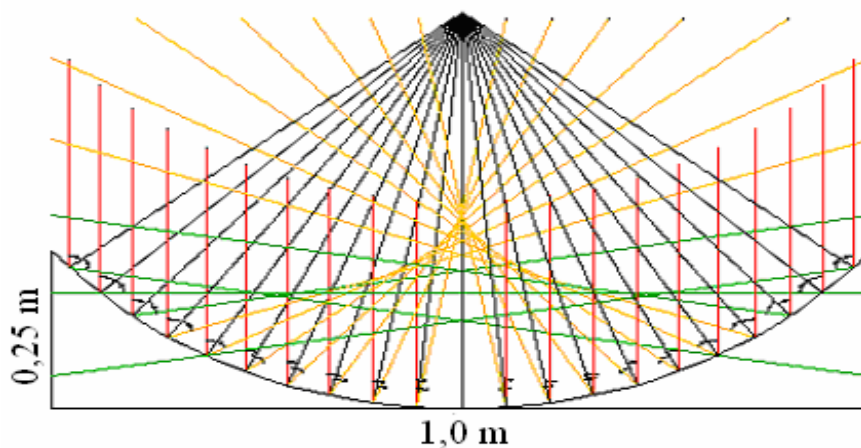


Figura 19. Análise do direcionamento dos raios solares.

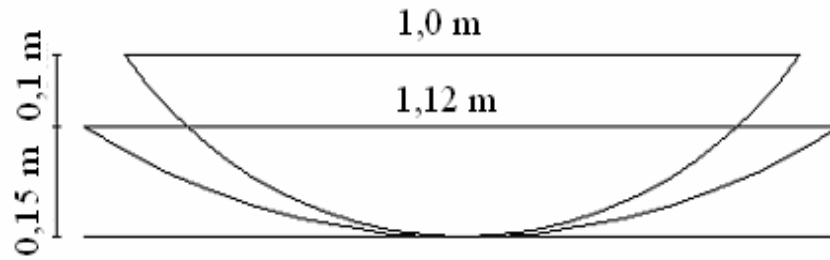


Figura 20. Desenho da modificação do perfil.

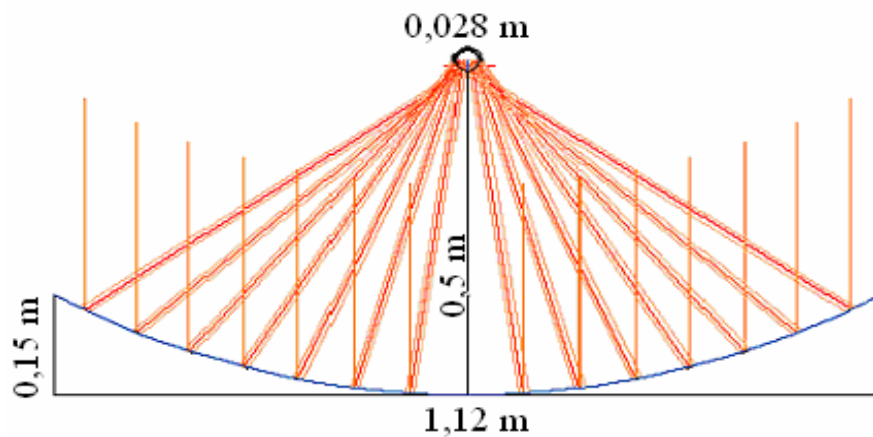


Figura 21. Desenho do perfil alterado.

- **Corte dos espelhos**

Os espelhos foram cortados em pedaços com 1,0 m de comprimento, 2 cm de largura e 2 mm de espessura, utilizando para tal um cortador de vidros profissional;

- **Fixação dos espelhos**

Foi utilizado cola fórmica para fixar os segmentos de espelho no perfil cilindro parabólico de fibra, concluindo assim a superfície refletora do concentrador;

- **Confecção da estrutura de fixação do concentrador**

Foi construída uma estrutura de apoio para o concentrador, de forma a permitir o acompanhamento do movimento aparente do sol, desde o nascer até o ocaso, ou seja, um giro de 180°. Foram utilizadas sucatas de dois birôs, dois mancais e 2,2 m de tubo de ferro galvanizado

de 22 mm de diâmetro como eixo. Desenhou-se a estrutura para análise, como mostra a Figura 22.

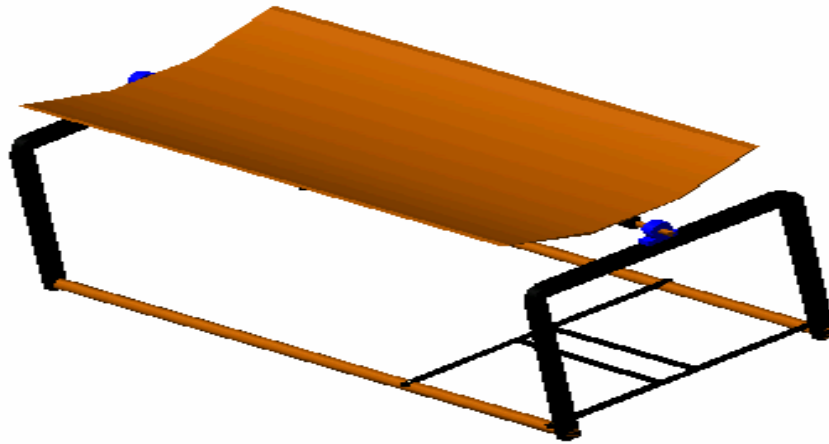


Figura 22. Desenho da estrutura do concentrador.

#### • Confeção do absorvedor

Utilizou-se 2,2 m de tubo de cobre de 28 mm de diâmetro pintado de preto fosco, onde em uma das extremidades, colocou-se uma conexão em forma de “U” e uma válvula de retenção conectada a uma mangueira, ligada a um reservatório (garrafa PET de 2 L); na outra extremidade foi colocada uma redução, um manômetro e um registro de passagem. Para fixar o absorvedor no foco, foram soldados dois pedaços de tubos de ferro galvanizado próximo às extremidades do eixo. A Figura 23 mostra o tubo absorvedor utilizado no concentrador posicionado no foco do concentrador.



Figura 23. Tubo absorvedor do concentrador proposto.

Na Figura 24 é mostrado o concentrador construído em todos os seus detalhes.



Figura 24. Detalhes do concentrador em estudo e de seus componentes.

- **Obtenção do sistema de acompanhamento**

Foram utilizadas sucatas de moto (corrente, coroa e pinhão) além de uma caixa de redução de 70:1, um Motor CC (Polymotor) de 24 V e uma bateria de moto 12 V.

- **Pintura da estrutura**

Toda a estrutura do concentrador solar foi pintada para protegê-la das intempéries, minimizando os efeitos da degradação de sua exposição aos fenômenos da natureza.

- **Automatização do sistema de rastreamento solar**

Foram feitos estudos preliminares para a confecção da placa de circuito impresso; em seguida os componentes foram soldados. Foram realizados testes e ajustes necessários ao funcionamento do sistema de rastreamento. As Figuras 25 e 26 mostram os desenhos do circuito eletrônico e da placa de circuito impresso, e na Figura 27 apresenta-se o sistema de automatização do concentrador já montado.

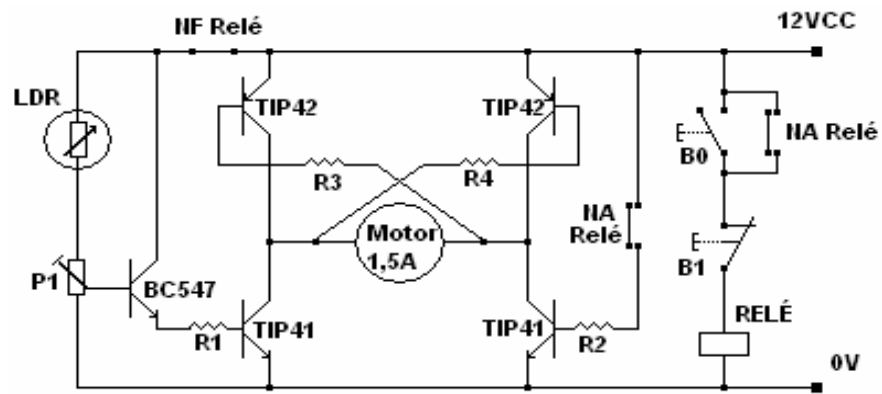


Figura 25. Desenho do circuito eletrônico

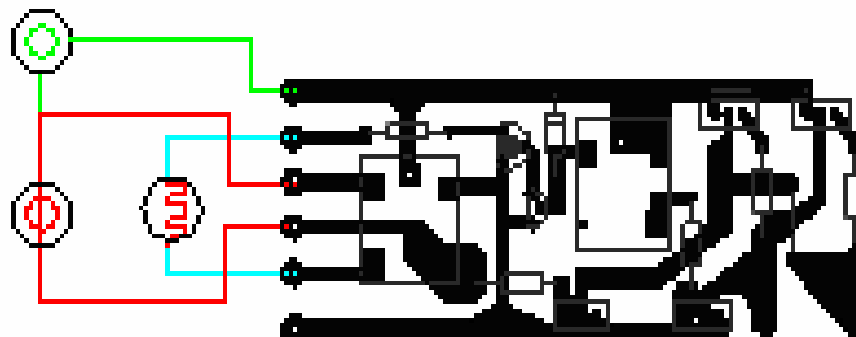


Figura 26. Desenho da placa de circuito impresso

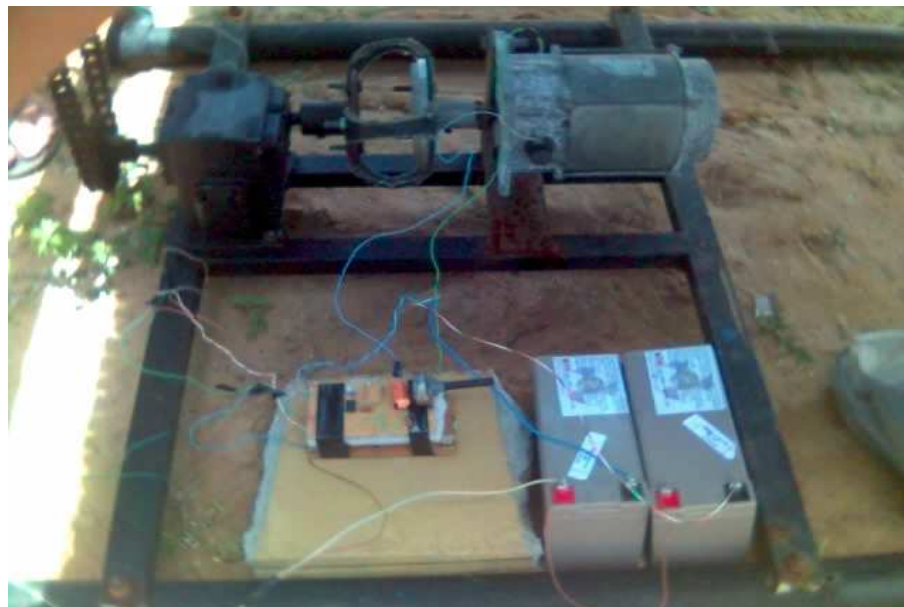


Figura 27. Sistema de automatização do concentrador em estudo

### 3.2. Desenvolvimento Teórico

São apresentadas as teorias e as equações necessárias à determinação dos parâmetros térmicos do concentrador em estudo.

#### • Determinação da Equação da Superfície Cilindro - Parabólica

Como o próprio nome indica, este tipo de concentrador assemelha-se a um cilindro com uma seção transversal em forma de parábola – que é uma curva plana e simétrica com relação a um eixo.

A construção do concentrador parabólico tem por base o traçado geométrico da parábola cuja equação em coordenadas cartesianas retangulares referida ao eixo de simetria e a tangente no vértice vem dada por:  $y^2 = 2.p.x$ , sendo  $p = 2.f$ , onde ( $f$ ), é a distância focal.

Segundo Duffie (1991), a equação do concentrador cilindro-parabólico – e que é também a equação da parábola, tem a forma:  $y^2 = 4.f.x$ .

Para que se possa desenvolver o perfil desse tipo de geometria e a partir daí construir o concentrador, é necessário que se faça uso de uma das equações anteriormente estabelecidas.

De acordo com (Fraidenraich, 1995; Queiróz, 2005; Lion 2007), o processo de conversão da radiação solar direta em energia térmica, passa por dois estágios, como segue: No primeiro estágio a radiação solar é captada através de uma superfície de captação e refletida para o tubo absorvedor. No segundo estágio a radiação solar absorvida pelo tubo absorvedor é transferida ao fluido de trabalho por condução e ao ar atmosférico por convecção e por radiação. A Figura 28 mostra o esquema do processo de termoconversão da energia solar.

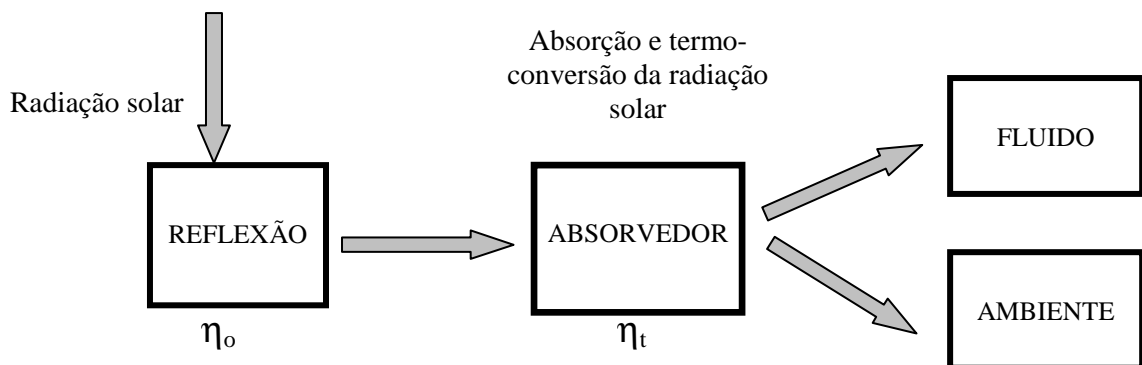


Figura 28. Esquema do processo de termoconversão da energia solar.

Conforme indicado na Figura 28, nota-se que a primeira fase do processo depende de um fator importante, a eficiência ótica ( $\eta_o$ ). Dependendo do material e do grau de precisão que é construído a superfície de captação do sistema, a eficiência ótica representa uma variável com características limitadoras no resultado global do sistema juntamente com a eficiência térmica ( $\eta_t$ ), na segunda fase do processo. Outros fatores que devem ser considerados em qualquer projeto de conversão da energia solar radiante em outra forma de energia são: variação da intensidade de radiação em função da localização geográfica, clima, época do ano e poluição atmosférica.

Contudo a eficiência útil do ciclo pode ser representada através da equação (3.1):

$$\eta_u = \eta_o \times \eta_t \quad (3.1)$$

De acordo com a configuração mostrada na Figura 28, apresenta-se a seguir, uma exemplificação mais detalhada no sentido de explicar com maior clareza o que ocorre nos sistemas que operam segundo a concentração da radiação e eficiência de conversão da energia radiante em energia térmica. Como a primeira hipótese sugere-se que as perdas térmicas no elemento de absorção são apenas de natureza radiativa e convectiva, assim a Figura 29, representa o ciclo completo e a partir do mesmo procede-se a um balanço energético do sistema.

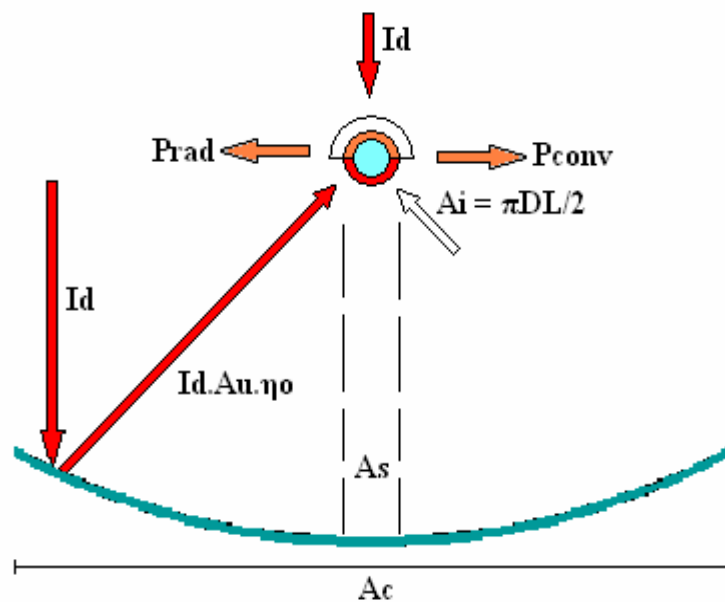


Figura 29. Fluxo de energia do concentrador cilindro-parabólico.

onde:

$I_d$  - Radiação solar direta instantânea coletada pelo sistema de captação ( $W/m^2$ )

$P_{abs}$  - Potência máxima que chega ao tubo absorvedor (W)

$P_{conv}$  - Potência perdida por convecção (W)

$P_{rad}$  - Potência perdida por radiação para o meio ambiente (W)

$\eta_o$  - Eficiência ótica do sistema de captação da energia solar (%).

$\eta_t$  - Eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico (%)

$\eta_u$  - Eficiência útil de conversão (%)

$A_u = (A_c - A_s)$  - Área útil do concentrador ( $m^2$ )

$A_c$  - Área total da superfície de captação ( $m^2$ )

$A_s$  - Área sombreada pelo tubo absorvedor ( $m^2$ )

$A_i$  - Área do absorvedor iluminada pela radiação refletida ( $m^2$ )

$L$  - comprimento (m)

#### • Potência Útil

Assim, de acordo com o esquema da Figura 29 a potência útil ( $P_u$ ) do sistema em (W), é dada pela diferença entre a potência máxima absorvida ( $P_{abs}$ ) e a potência perdida ( $P_{perdida}$ ), como se segue:

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida} \quad (3.2)$$

#### • Potência Máxima Absorvida

A potência absorvida pelo absorvedor é dada pela equação:



$$P_{abs} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t \quad (3.3)$$

onde:

$P_{abs}$  - Potência máxima que chega ao tubo absorvedor (W)

$I_d$  - Radiação solar direta incidente ( $W/m^2$ )

$A_u = (A_c - A_s)$  - Área útil do concentrador ( $m^2$ )

$A_c$  - Área total da superfície de captação ( $m^2$ )

$A_s$  - Área sombreada pelo tubo absorvedor ( $m^2$ )

$\rho$  - Refletividade do concentrador (%)

$k_{rd}$  - Fração da radiação refletida que chega no absorvedor (%)

$\alpha_t$  - Absortividade do tubo absorvedor (%)

#### • Potência Perdida

As perdas térmicas ocupam o segundo lugar em ordem de importância em um concentrador cilindro parabólico (CCP), atrás das perdas ópticas. Ocorre principalmente em dois lugares: no tubo absorvedor e na tubulação que transporta o fluido térmico até o local de armazenamento ou de aproveitamento, sendo muito mais importantes, as perdas através do tubo absorvedor.

As perdas térmicas associadas ao tubo absorvedor são compostas por: perdas por radiação e perdas por convecção. Consideraram-se desprezíveis as perdas por condução uma vez que se colocou um isolante nos suportes de fixação do tubo absorvedor evitando o contato entre o tubo e o suporte metálico.

De acordo com Incropera (2003) a potência perdida por radiação e por convecção pode ser determinada pelas equações 3.4 a 3.7:

$$P_{perdida} = P_{conv} + P_{rad} = \bar{h} A (T_{abs} - T_{\infty}) + \varepsilon A \sigma (T_{abs}^4 - T_{viz}^4) \quad (3.4)$$

onde:

$P_{perdida}$  - Potência perdida (W)

$P_{conv}$  - Potência perdida por convecção (W)

$P_{rad}$  - Potência perdida por radiação para o meio ambiente (W)

$h$  - Coeficiente de transferência convectiva ( $W/m^2.K$ )

$A = \pi DL/2$  - Área do tubo absorvedor onde ocorrem as perdas térmicas ( $m^2$ )

$D$  - Diâmetro do tubo absorvedor (m)

$L$  - Comprimento do tubo absorvedor (m)

$T_{abs}$  - Temperatura do tubo absorvedor (K)

$T_{\infty} = T_{viz}$  - Temperatura ambiente (K)

$\varepsilon$  - Emissividade do tubo absorvedor

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$ )

• O coeficiente de transferência convectiva pode ser obtido através da equação:

$$\bar{h} = \overline{Nu}_D \cdot \frac{k}{D} \quad (3.5)$$

onde:

$h$  - Coeficiente de transferência convectiva ( $W/m^2.K$ )

$Nu_D$  - Número de Nusselt

**K** – Condutividade térmica do ar (W/m.K)

**D** - Diâmetro do tubo absorvedor (m)

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4 / Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282.000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (3.6)$$

**Nu<sub>D</sub>** - Número de Nusselt.

**Re<sub>D</sub>** - Número de Reynolds

**Pr** - Número de Prandtl

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.7)$$

onde:

**Re<sub>D</sub>** - Número de Reynolds

**V** - Velocidade do vento (m/s)

**D** - Diâmetro do tubo absorvedor (m)

**ν** - Viscosidade cinemática do ar (m<sup>2</sup>/s)

De acordo com (Fraidenraich, 1995; Queiróz, 2005; Lion 2007) as equações 3.8 a 3.10 podem utilizadas para determinar as eficiências envolvidas no processo de transformação da energia eletromagnética em energia térmica.

#### • Eficiência óptica

Este parâmetro determina o percentual de toda a energia solar radiante que chega na superfície refletora e é enviado para o tubo absorvedor. O percentual da energia radiante que chega na superfície refletora e não é enviado para o absorvedor, constitui-se nas perdas ópticas do sistema.

$$\eta_o = \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t \quad (3.8)$$

• **Eficiência térmica (rendimento térmico)**

Este parâmetro determina o percentual da energia que chega ao tubo absorvedor e é transferida para o fluido de trabalho.

$$\eta_t = \frac{P_u}{I_d \cdot A_u \cdot \eta_o} = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (3.9)$$

• **Eficiência útil**

Este parâmetro determina o percentual de toda a energia solar radiante que chega na superfície refletora e é transferida para o fluido de trabalho.

$$\eta_u = \eta_o \cdot \eta_t \quad (3.10)$$

• **Fator de concentração**

De acordo com (Queiróz, 2005) o fator de concentração é obtido por meio da equação (3.11):

$$C = \frac{A_u}{A_i} \quad (3.11)$$

onde:

$C$  - fator de concentração da energia solar

$A_i$  - área iluminada do absorvedor (m<sup>2</sup>)

$A_u = (A_c - A_s)$  - Área útil do concentrador ( $m^2$ )

$A_c$  - Área da superfície de captação ( $m^2$ )

$A_s$  - Área sombreada pelo tubo absorvedor ( $m^2$ )

### 3. Metodologia dos Ensaio Térmicos

Para diagnosticar a eficiência do concentrador proposto, realizaram-se vários dias de testes, com e sem carga, com e sem automação.

- **Testes sem carga**

A cada 10 ou 15 minutos media-se a radiação solar global e a temperatura do tubo absorvedor na parte central do tubo e na metade de seu comprimento. A Figura 30 mostra o concentrador em teste.



Figura 30. Concentrador cilindro-parabólico em teste.

- **Testes com carga**

Inicialmente enchia-se o tubo absorvedor e a mangueira com 1,6 litros d'água, em seguida colocava-se a ponta da mangueira dentro de uma garrafa PET de 2 litros, também cheia d'água. Fechava-se o registro de saída de fluido do absorvedor, após um período de 10 ou 15 minutos, media-se a temperatura do absorvedor na parte central do tubo e na metade de seu comprimento, a temperatura de saída da água, a radiação solar global e a pressão manométrica da água dentro do tubo absorvedor e em seguida abria-se o registro liberando água que podia estar no estado líquido ou de vapor. Utilizaram-se seis garrafas de PET's de 2,0 litros, uma servia de reservatório de alimentação e as outras eram usadas para o reabastecimento. Ao final do dia de teste determinava-se a quantidade de água aquecida.

Observou-se que a pressão de entrada do fluido era menor que a pressão de saída. Usou-se, portanto, uma válvula de retenção unidirecional para evitar que o fluido voltasse para o reservatório. Assim, ao receber energia térmica, o fluido se expandia dentro do absorvedor aumentando a pressão interna que por sua vez diminuía com a abertura do registro de saída de vapor. Com a saída do vapor produzia-se um vácuo no interior do absorvedor, fazendo com que o fluido fosse sugado do reservatório. A Figura 31 mostra detalhes do sistema de alimentação do concentrador em estudo.



Figura 31. Detalhes do sistema de alimentação do concentrador proposto.

As Figuras 32 e 33 mostram o concentrador proposto produzindo vapor quando da realização de seus testes.



Figura 32. Concentrador cilindro-parabólico em operação



Figura 33. Concentrador cilindro-parabólico em operação.

- **Testes sem automação**

Posicionava-se manualmente a superfície refletora em direção ao sol, de modo que o absorvedor ficasse iluminado, ou seja, que o absorvedor ficasse no foco da parábola. A cada 10 ou 15 minutos fazia-se o reposicionamento do foco no absorvedor, o que representa uma inclinação  $2,5^\circ$  e  $3,75^\circ$  respectivamente. A Figura 34 mostra o concentrador em operação sem mecanismo de automação.





Figura 34. Concentrador cilindro-parabólico em operação

- **Testes com automação**

A superfície refletora gira em torno do eixo através do acionamento de um motor CC de 12 volts que por sua vez é controlado por um circuito eletrônico. Um foto-sensor é colocado próximo ao tubo absorvedor, em um local sombreado, assim, ao receber iluminação aciona o circuito, que por sua vez aciona o motor, fazendo com que a parábola gire até o ponto em que o foto-sensor volte à sombra. No final do dia quando a superfície refletora atinge um determinado ponto onde se encontra um fim-de-curso, este ao ser acionado faz com que a superfície refletora

retorne ao ponto inicial. Chegando ao ponto inicial tocará em outro fim de curso, que faz com que pare seu movimento, assim o equipamento estará pronto para reiniciar o trabalho no dia seguinte. O acionamento se dá automaticamente a cada 5 minutos aproximadamente.

A Figura 35 mostra o diagrama de automação para o circuito que utiliza o sensor fotoelétrico.

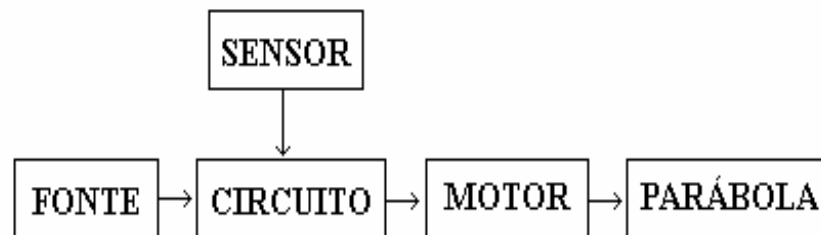


Figura 35. Diagrama de bloco da automação do concentrador

### 3.4. Instrumentação Utilizada

#### • Medição da Temperatura

Os dados da temperatura foram obtidos utilizando-se dois termopares de cromel-alumel, um colocado na parte inferior do absorvedor, na metade do tubo e o outro na saída do fluido, acoplados a um termômetro digital.

O termômetro digital utilizado, de duas entradas, tem uma resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$  e permite medições na faixa de  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $1200^{\circ}\text{C}$ , com erro máximo de 2%. (Lion, 2007).

#### • Medição da Radiação

Para a medição da radiação solar global foi utilizado um piranômetro construído no LES/UFRN acoplado a um multímetro digital de 4 dígitos e meio. O princípio de funcionamento empregado por este aparelho consiste em medir a radiação solar como função da diferença de temperatura de termalização de dois corpos cinza de diferentes emitâncias, submetidos à ação de uma mesma fonte de radiação.

Duas chapas de cobre, uma pintada de preto e outra de branco, submetidas à radiação solar em um mesmo recipiente, servem para o fim desejado. A diferença de temperatura entre as chapas é medida com termopares e permite, uma vez aferido, com um instrumento padrão (piranômetro tipo Eppley), uma medida da radiação solar global incidente.

A Figura 36 mostra o referido medidor de radiação e a Figura 37, a sua curva de calibração. Esse instrumento tem uma constante de tempo igual a 4,98 s e apresenta um erro de leitura inferior a 5%. O multímetro utilizado para medir a diferença de potencial entre os elementos sensíveis do piranômetro apresenta uma faixa de leitura de 0 a 1000 V, com erro inferior a 2%.

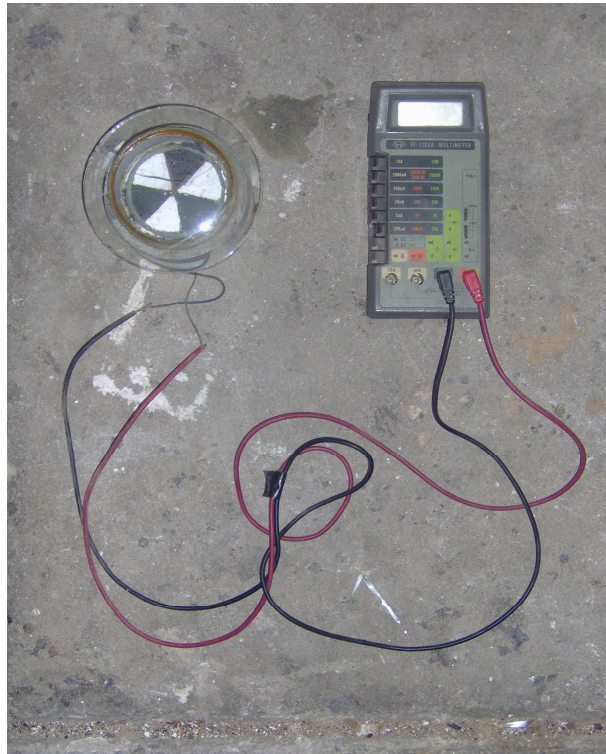


Figura 36. Radiômetro construído no LMHES da UFRN

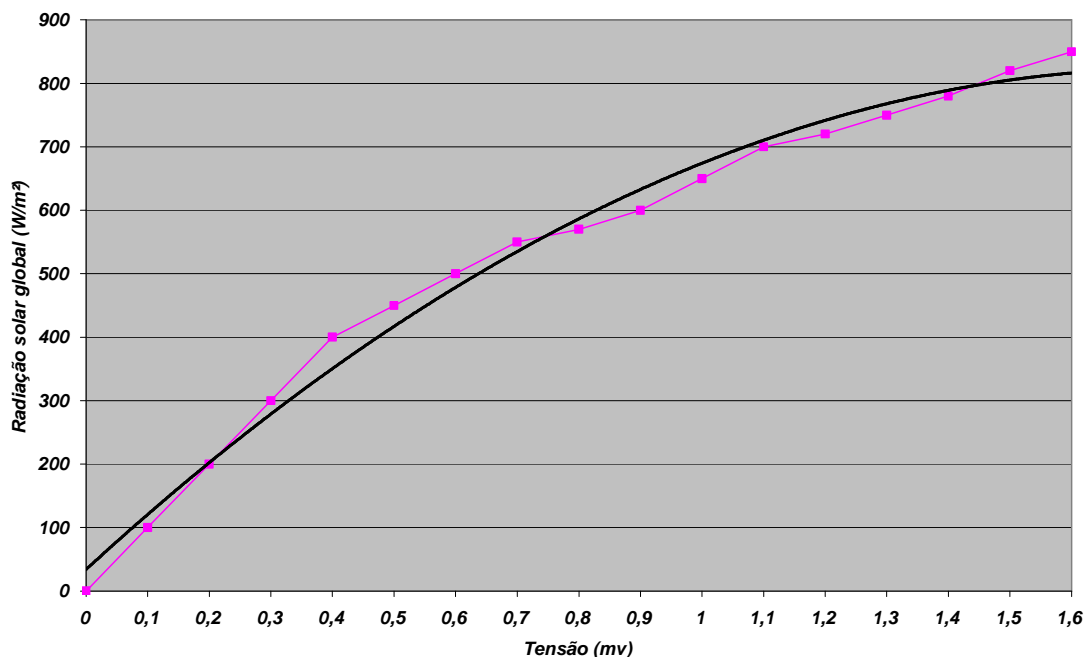


Figura 37. Curva de calibração do radiômetro utilizado nas medições de radiação solar global.

#### • Medição da Vazão

Para o controle da vazão foram utilizados uma válvula de retenção na entrada e um registro de esfera na saída do absorvedor. Como não se dispunha de um rotâmetro para líquidos de baixa vazão, foi utilizado um método indireto que consistia em medir o tempo necessário para evaporar um litro de água. Este processo era repetido a cada hora, para assegurar-se a constância da vazão.

Para a medição do tempo foi empregado um relógio digital tipo cronômetro com resolução de centésimos de segundo.

#### • Medição da Pressão

Utilizaram-se manômetros de média pressão com escala máxima de 1103,15 kPa (160 psi)

Avaliou-se também a área de sombra no absorvedor ao longo do dia. O eixo do concentrador está posicionado na direção norte-sul e a superfície refletora voltada para a direção leste-oeste.

## 4. ANÁLISES DE RESULTADOS

### 4.1. Análises dos Resultados Obtidos

Usando os equacionamentos descritos no capítulo anterior, calcularam-se os parâmetros que diagnosticam a eficiência de um concentrador solar cilindro parabólico, conforme o procedimento a seguir.

Os cálculos foram baseados na maior temperatura do absorvedor com carga, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados usados para cálculo de parâmetros do concentrador.

Tabsorvedor (°C)	Tsaída de Fluido (°C)	Radiação Solar Direta (W/m <sup>2</sup> )	Pressão (kPa)
171,2	170,2	581,7	706,1

**O balanço térmico para o concentrador vem dado por:**

$$I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t = P_u + P_{perdida}$$

onde:

$I_d$  – Radiação solar direta - **581,7 W/m<sup>2</sup>**

$A_c$  - Área da superfície de captação - **2,24 m<sup>2</sup>**

$A_s$  - Área sombreada pelo absorvedor - **0,056 m<sup>2</sup>**

$A_u = (A_c - A_s)$  - Área útil do concentrador - **2,184 m<sup>2</sup>**

$A_i$  - área iluminada do absorvedor - **0,088 m<sup>2</sup>**

$\rho$  - Refletividade do concentrador - (espelhos: de 90 a 95%) - **0,90**

$k_{rd}$  - Fração da radiação refletida que chega no absorvedor (95%) - **0,95**

$\alpha_t$  - Absortividade do tubo absorvedor (cobre: 90-96%) - **0,90**

$P_u$  - Potência útil (watts)

$P_{perdida}$  - Potência perdida por condução, radiação e convecção (watts)

#### a. Cálculo da máxima potência térmica absorvida pelo tubo absorvedor.

Por intermédio da equação (3.3) pode-se determinar a máxima potência obtida no tubo absorvedor a partir dos seguintes dados (Queiroz, 2005):

$$P_{abs} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t$$

$$P_{abs} = 977,59W$$

#### b. Cálculo da potência perdida

A potência perdida ocorre principalmente por radiação e por convecção, pode ser determinada, substituindo os valores nas equações 3.4 a 3.7.

$$P_{perdida} = P_{conv} + P_{rad} = \bar{h} A_i (T_{abs} - T_{\infty}) + \varepsilon A_i \sigma (T_{abs}^4 - T_{viz}^4)$$

$$P_{perdida} = 488,93W$$

A potência perdida por convecção e radiação foi calculada utilizando-se o procedimento descrito no capítulo anterior e corresponderam a:  $P_{conv}$  – Potência perdida por convecção = **345,20 W** e  $P_{rad}$  – Potência perdida por radiação = **143,73 W**.

#### c. Cálculo da potência útil

A potência útil vem dada pela diferença entre a potência absorvida e a potência perdida, e pode ser determinada substituindo-se os valores na equação 3.2.

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida}$$

$$P_u = 488,66W$$

#### d. Cálculo das eficiências

A seguir são apresentados os resultados das eficiências de transformação da energia eletromagnética em energia térmica.

##### d.1. Eficiência óptica

$$\eta_o = \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t$$

onde:

$\rho$  - Refletividade do concentrador - (espelhos: de 90 a 95%) - **0,95**

$k_{rd}$  - Fração da radiação refletida que chega no absorvedor - **0,90**

$\alpha_t$  - Absortividade do tubo absorvedor (cobre: 90-96%) - **0,90**

$$\eta_o \cong 0,76$$

##### d.2. Eficiência térmica

$$\eta_t = \frac{P_{útil}}{P_{abs}}$$

$$\eta_t \cong 0,50$$

Ressalte-se que se desprezaram as perdas térmicas do absorvedor por condução.

**d.3. Eficiência global**

$$\eta_g = \eta_o \cdot \eta_t$$

$$\eta_g \cong 0,38$$

Os valores obtidos traduzem uma boa eficiência óptica, uma considerável eficiência térmica e uma significativa eficiência global como resultado do processo de otimização empregado para a confecção do equipamento e dos segmentos de espelho de pequena área que produziram uma superfície espelhada uniforme adaptando-se ao perfil parabólico, mesmo sendo planos.

**e. Fator de concentração**

O fator de concentração é obtido por meio da equação 3.11, que ao substituírem-se os dados encontra-se:

$$C = \frac{A_u}{A_i}$$

$$C = 24,81$$

onde:

$A_u$  - área útil do concentrador  $2,24 \text{ m}^2 - 0,056 \text{ m}^2 = 2,184 \text{ m}^2$

$A_i$  - área iluminada do absorvedor -  $0,088 \text{ m}^2$



## 4.2. Resultados dos Testes Realizados

As Tabelas a seguir mostram os dados médios horários dos parâmetros medidos durante os testes realizados com o concentrador construído, com mecanismo de acompanhamento do movimento aparente do sol manual e eletrônico, para diagnóstico de seu desempenho e da quantidade de vapor produzida para os testes com carga. Mostra-se também o comportamento assumido por tais parâmetros.

O primeiro teste realizado consistiu em medir-se a temperatura do absorvedor, bem como a temperatura ambiente e a radiação solar direta com mecanismo manual de acompanhamento do movimento aparente do sol. Os dados medidos encontram-se mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Teste do concentrador em estudo - **SEM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO**

<b>Tempo (h)</b>	<b>Tambiente (°C)</b>	<b>Tabsorvedor (°C)</b>	<b>Radiação Solar Direta (W/m<sup>2</sup>)</b>
08:00 - 9:00	30,3	131,7	514,6
09:00 - 10:00	30	159,6	551,6
10:00 - 11:00	29,7	160,3	564,3
11:00 - 12:00	29,1	147,7	522,3
12:00 - 13:00	29	148,3	504,4
13:00 - 14:00	29,2	154,3	564,5
14:00 - 15:00	29	152,1	548,6
<b>Média</b>	<b>29,5</b>	<b>150,6</b>	<b>538,6</b>

Os dados apontam para uma temperatura máxima do tubo absorvedor igual a 160,3°C, bem acima da temperatura de evaporação da água, para uma radiação solar direta correspondente a 564,3 W/m<sup>2</sup>. Percebe-se que a radiação solar direta não apresentou maior magnitude para os períodos que deveriam apresentar maior intensidade de radiação, entre 11:00 h e 13:00 h. Neste período houve uma nebulosidade significativa em vários instantes, atenuando a incidência da radiação na forma direta.

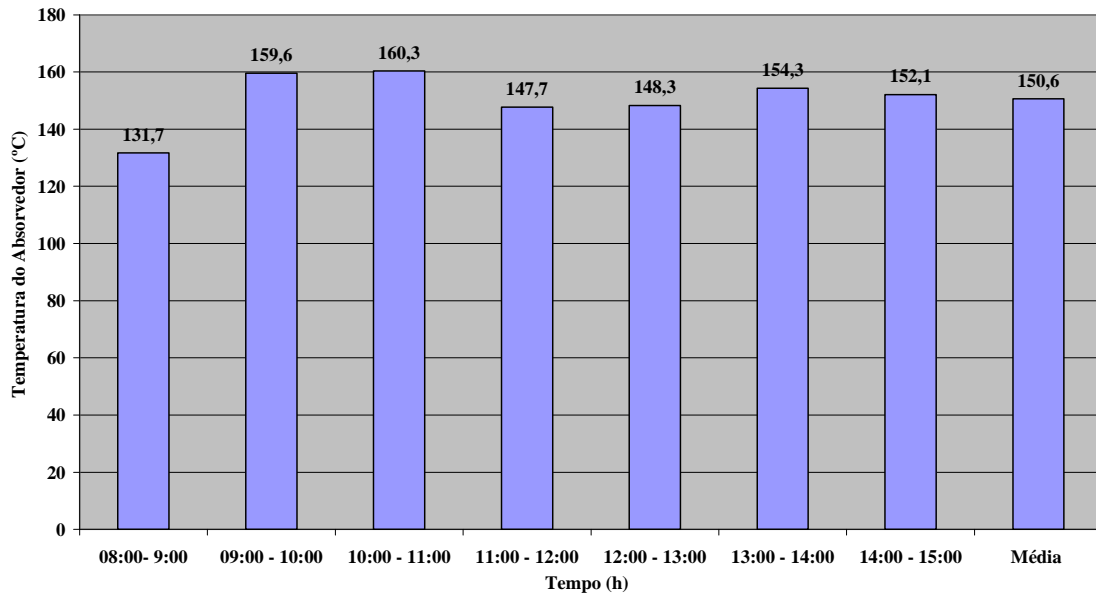


Figura 38. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor do concentrador solar em estudo.

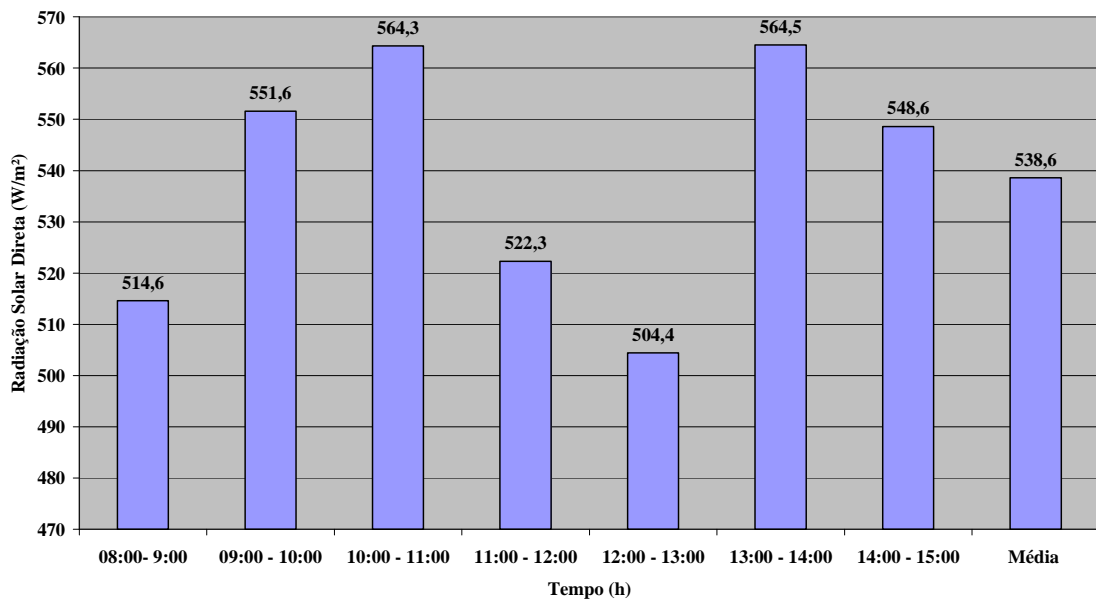


Figura 39. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio.

O segundo teste realizado consistiu em medir-se a temperatura do absorvedor, bem como a temperatura ambiente e a radiação solar direta com mecanismo automático de acompanhamento do movimento aparente do sol. Os dados medidos encontram-se mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Teste do concentrador em estudo - SEM CARGA/COM AUTOMAÇÃO

<b>Tempo (h)</b>	<b>Tambiente (°C)</b>	<b>Tabsorvedor (°C)</b>	<b>Radiação Solar Direta (W/m<sup>2</sup>)</b>
08:00 - 9:00	29,8	150,5	514,0
09:00 - 10:00	31,9	160,8	548,3
10:00 - 11:00	32,7	170,0	561,8
11:00 - 12:00	31,3	171,5	599,0
12:00 - 13:00	31,1	160,0	589,6
13:00 - 14:00	31,9	145,8	539,4
14:00 - 15:00	33,4	136,6	531,4
<b>Média</b>	<b>31,7</b>	<b>156,5</b>	<b>554,8</b>

Percebe-se que a temperatura média do absorvedor foi um pouco superior ao primeiro teste, sem automação. Pode-se concluir que o aumento da radiação foi o responsável por esse aumento de temperatura, pelo fato da radiação solar direta nesse dia de teste ter sido superior a do teste anteriormente realizado. O aumento percentual na temperatura do absorvedor, em torno de 4%, foi apenas 1,0% maior que o aumento da incidência da radiação solar direta.

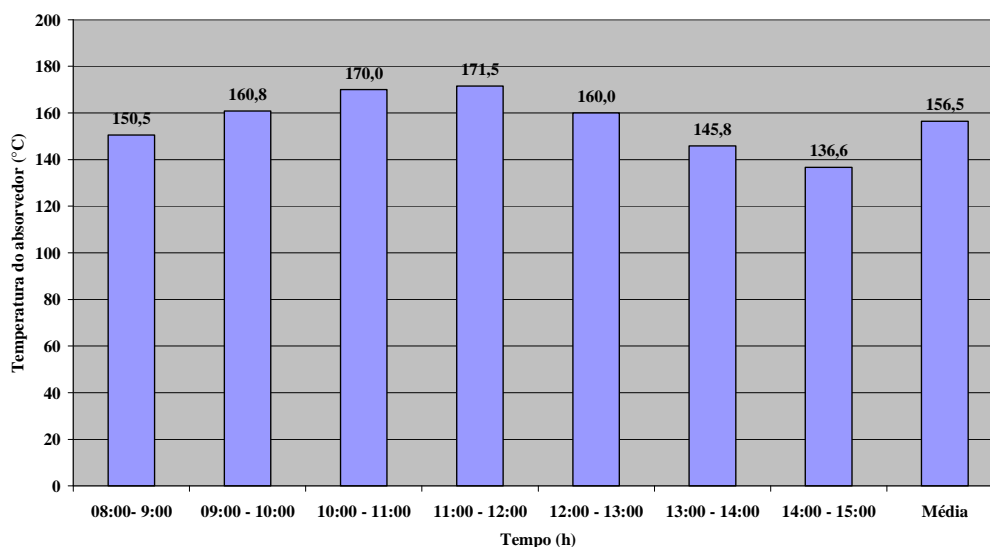


Figura 40. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor do concentrador solar em estudo.

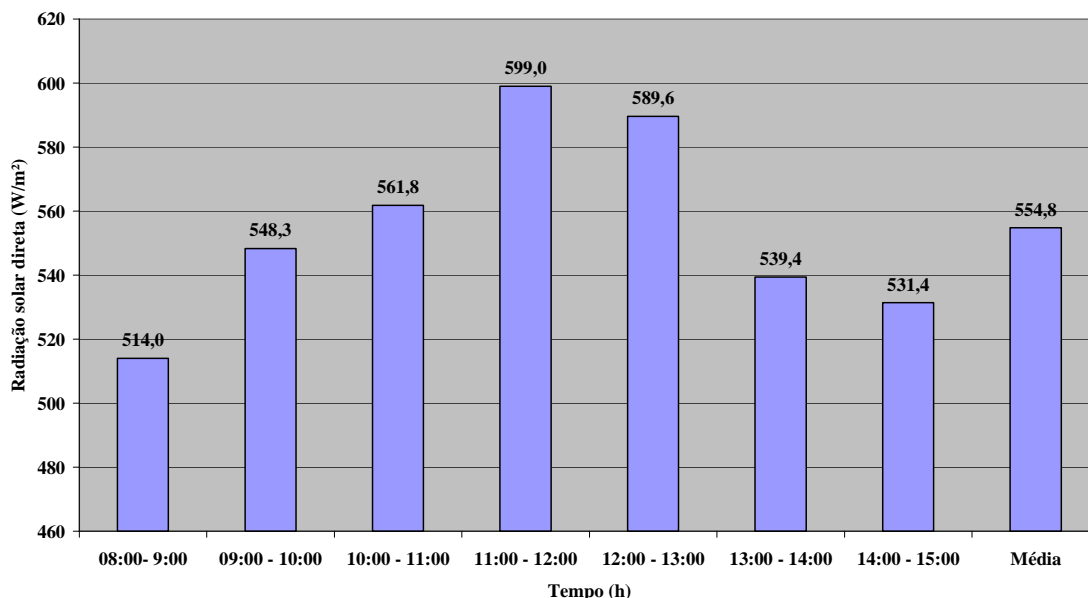


Figura 41. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio.

O terceiro teste realizado consistiu-se em medir as temperaturas do absorvedor e do vapor que sai do tubo absorvedor após a liberação do registro. Mediu-se também a pressão do vapor contido no tubo absorvedor e a radiação. Este teste foi realizado com carga, e teve o mecanismo de acompanhamento do movimento aparente do sol, acionado manualmente. Os dados medidos encontram-se mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Teste do concentrador em estudo - **COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO**

<b>Tempo (h)</b>	<b>Tabsorvedor (°C)</b>	<b>Tsaída (°C)</b>	<b>Radiação Solar Direta (W/m²)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
08:00 - 09:00	118,5	115,8	497,1	78,5
09:00 - 10:00	122,0	119,3	510,9	98,1
10:00 - 11:00	122,6	120,4	522,3	107,9
11:00 - 12:00	129,1	127,3	561,1	156,9
12:00 - 13:00	132,5	130,1	571,4	176,5
13:00 - 14:00	125,5	122,7	533,7	127,5
14:00 - 15:00	121,2	118,5	505,1	98,1
<b>Média</b>	<b>124,5</b>	<b>122,0</b>	<b>528,8</b>	<b>120,5</b>

Os dados medidos revelam uma temperatura de saída sempre acima da temperatura de vaporização da água; demonstrando a eficiência térmica do concentrador projetado. Isso demonstra que o volume de água vaporizado poderia ser maior.

A temperatura do tubo absorvedor, como se verificará nos testes seguintes está sempre um pouco acima da temperatura de saída do vapor. A radiação solar direta esteve um pouco abaixo em relação aos testes anteriores, mas corresponde a uma radiação global em torno de  $660 \text{ W/m}^2$ , nível bem significativo e dentro da média prevista para a região nordeste brasileira, entre  $500$  e  $700 \text{ W/m}^2$ .

A pressão máxima nesse dia de teste foi de  $176,5 \text{ kPa}$ , porém a média do dia correspondeu a apenas  $120,5 \text{ kPa}$ . A Figura 42 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor, já a Figura 43 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor do concentrador solar em estudo.

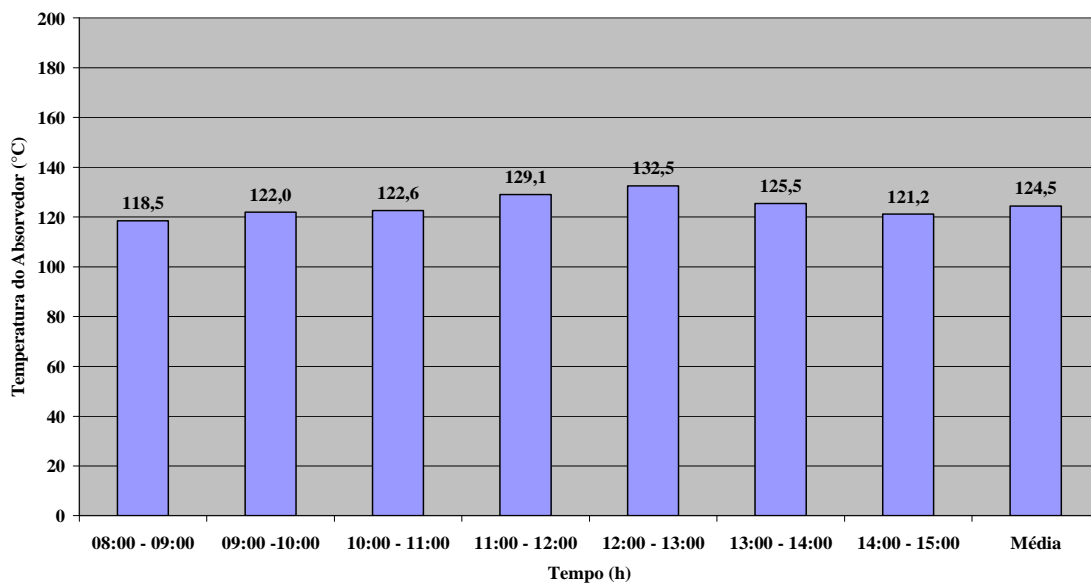


Figura 42. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

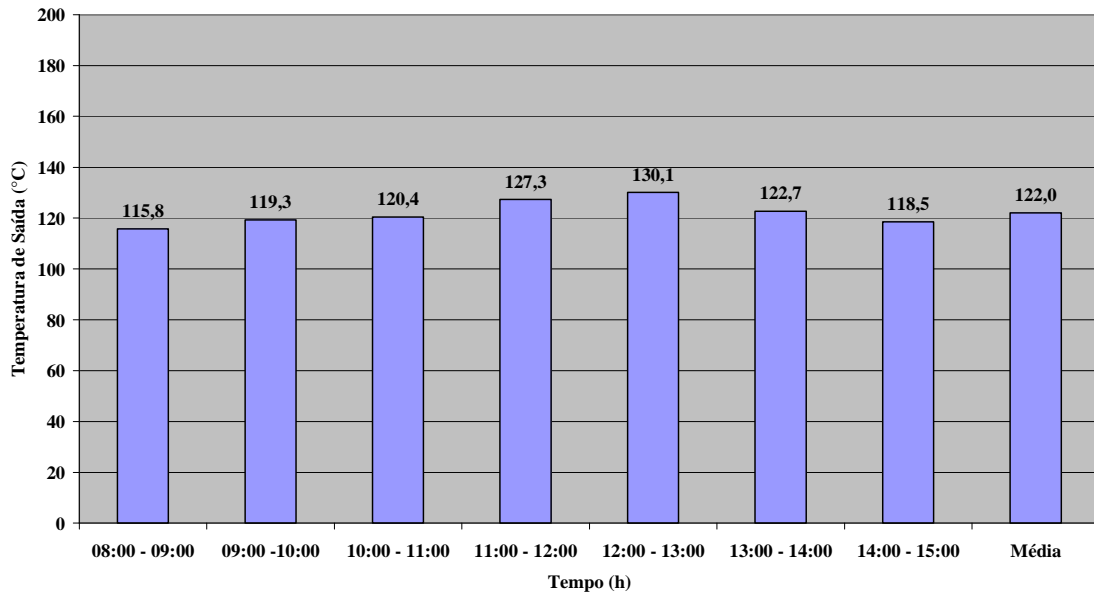


Figura 43. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.

A Figura 44 mostra o comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio, já a Figura 45 mostra o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor do concentrador em estudo durante a realização do ensaio.

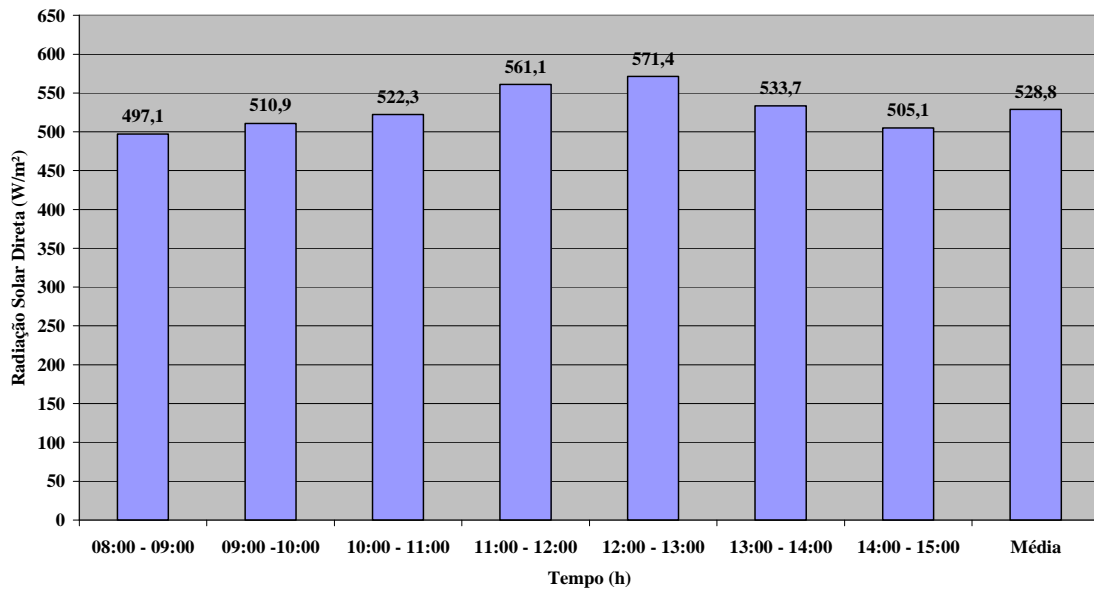


Figura 44. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

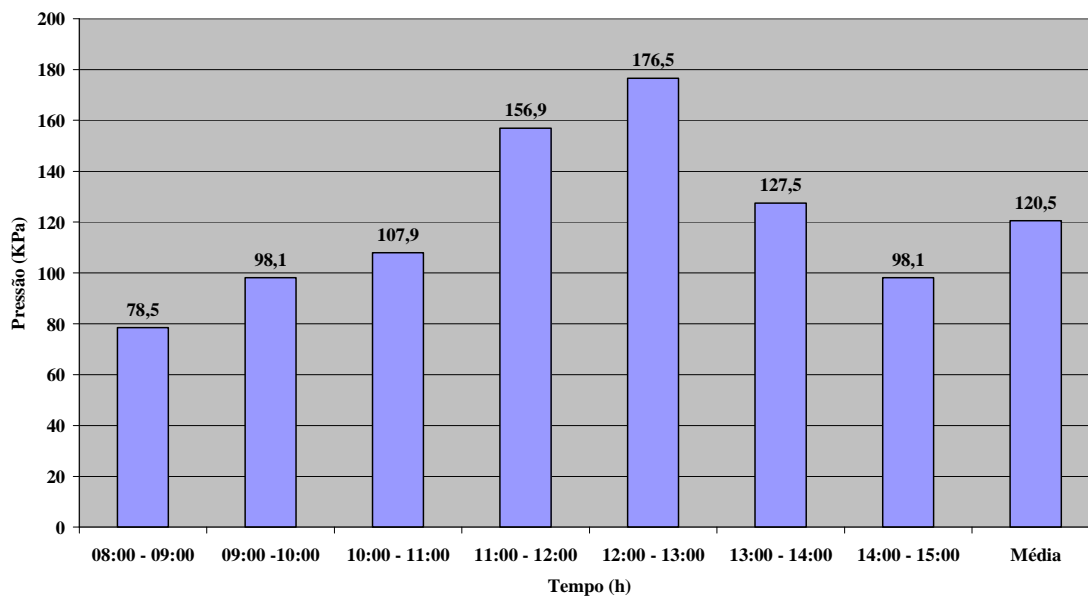


Figura 45. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

Dois outros testes **COM CARGA E SEM AUTOMAÇÃO** foram realizados e seus resultados estão contidos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Teste do concentrador em estudo – **COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO**.

Tempo (h)	Tabsorvedor (°C)	Tsaída (°C)	Radiação Solar Direta (W/m <sup>2</sup> )	Pressão (kPa)
08:00 - 09:00	120,5	118,4	533,7	98,1
09:00 - 10:00	140,3	137	558,9	235,4
10:00 - 11:00	145,1	141,8	568	274,6
11:00 - 12:00	150,7	148,2	571	362,8
12:00 - 13:00	155,5	153,4	588,6	431,5
13:00 - 14:00	145,5	143,3	540,5	294,2
14:00 - 15:00	138	135,5	510,4	225,6
<b>Média</b>	<b>142,2</b>	<b>139,7</b>	<b>553,0</b>	<b>274,6</b>

Os parâmetros medidos apresentam valores mais significativos em relação ao teste anterior nessa mesma configuração, **COM CARGA E SEM AUTOMAÇÃO**. Isso ocorreu devido a uma maior incidência de radiação solar direta, que cresceu em

torno de 5%, causando um aumento na temperatura do absorvedor e da água, em torno de 14%.

Com relação à pressão, houve um aumento significativo da pressão média pelo fato da liberação do vapor ocorrer para intervalos de 15 minutos. Os resultados demonstram que o volume de água vaporizado poderia ser maior que os 9,6 litros obtidos. A Figura 46 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor, já a Figura 47 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor do concentrador solar em estudo.

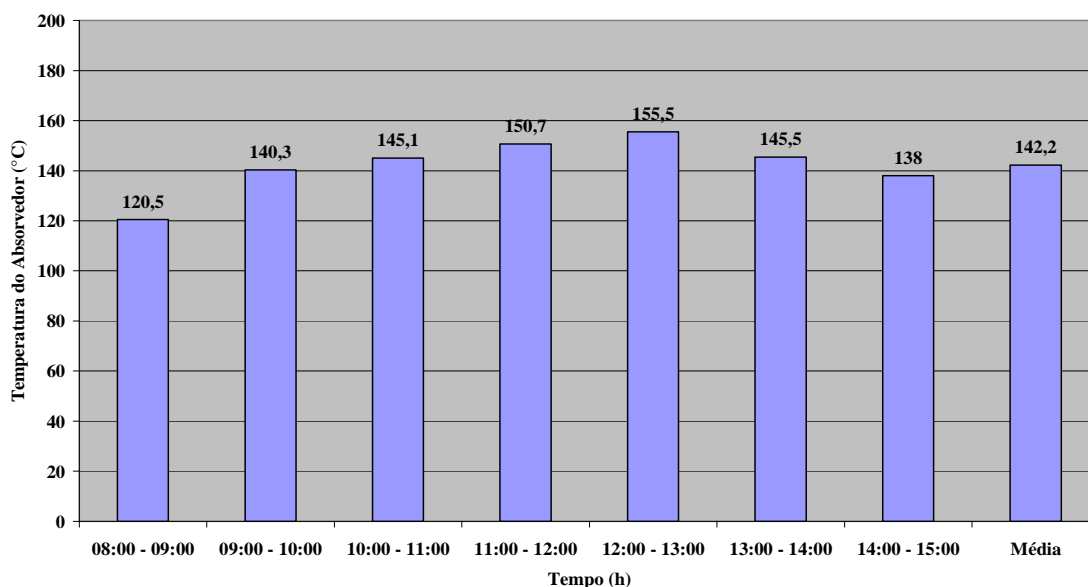


Figura 46. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

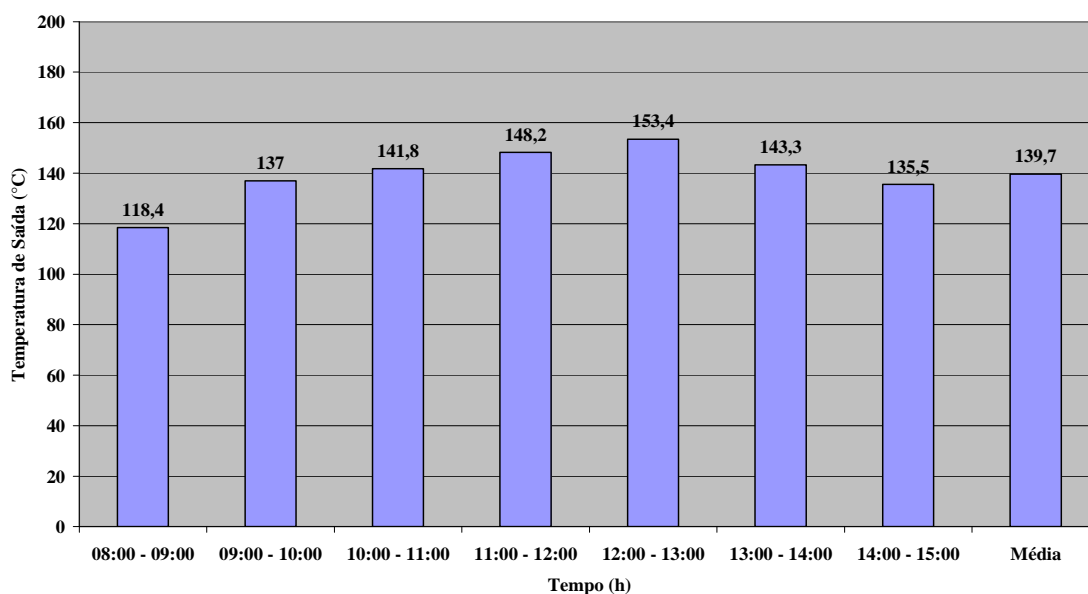


Figura 47. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.



A Figura 48 mostra o comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio, já a Figura 49 mostra o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor do concentrador em estudo durante a realização do ensaio.

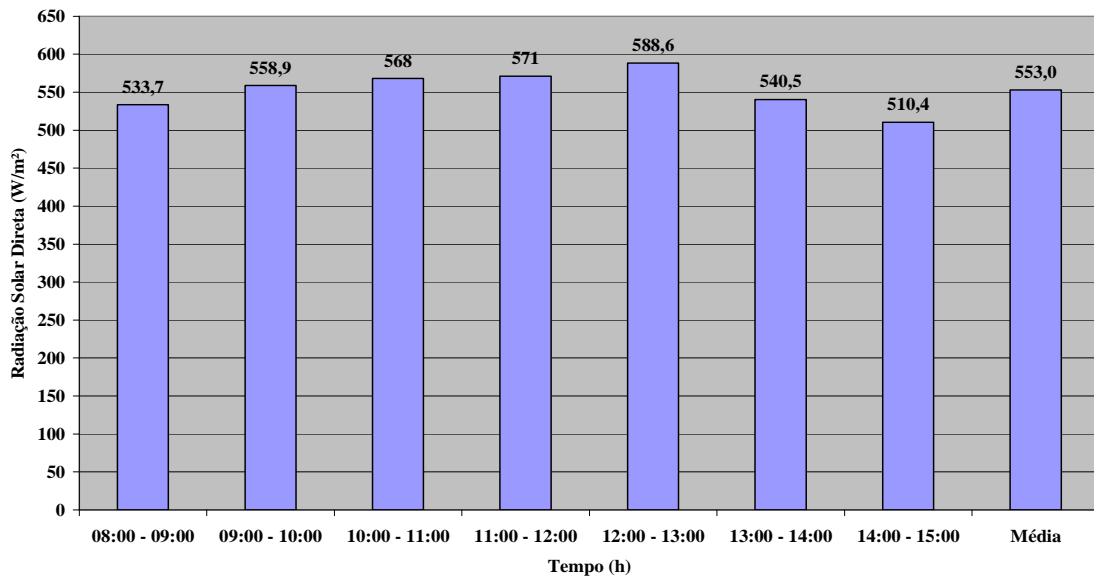


Figura 48. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

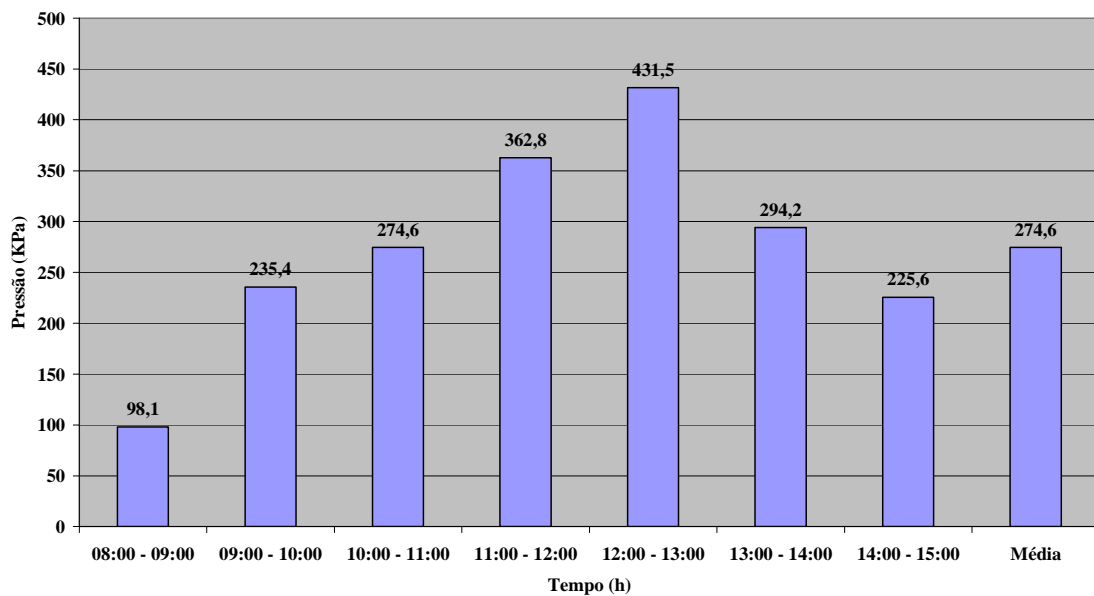


Figura 49. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

Tabela 6. Teste do concentrador em estudo - **COM CARGA/SEM AUTOMAÇÃO**

<b>Tempo (h)</b>	<b>T/absorvedor (°C)</b>	<b>T/saída (°C)</b>	<b>Radiação Solar Direta (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
08:00 - 09:00	120,9	118,1	497,1	88,3
09:00 - 10:00	123,3	120,6	516,6	107,9
10:00 - 11:00	138,3	135,4	568,0	245,2
11:00 - 12:00	157,7	154,0	585,1	490,3
12:00 - 13:00	141,6	138,9	577,1	264,8
13:00 - 14:00	160,1	157,5	585,1	196,1
14:00 - 15:00	123,2	120,2	539,4	107,9
<b>Média</b>	<b>137,9</b>	<b>135,0</b>	<b>552,6</b>	<b>214,4</b>

Os parâmetros medidos apresentam valores muito próximos ao teste anterior na mesma configuração, **COM CARGA E SEM AUTOMAÇÃO**, em função das condições solarimétricas similares para os dois dias de testes. A Figura 50 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor, já a Figura 51 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor do concentrador solar em estudo.

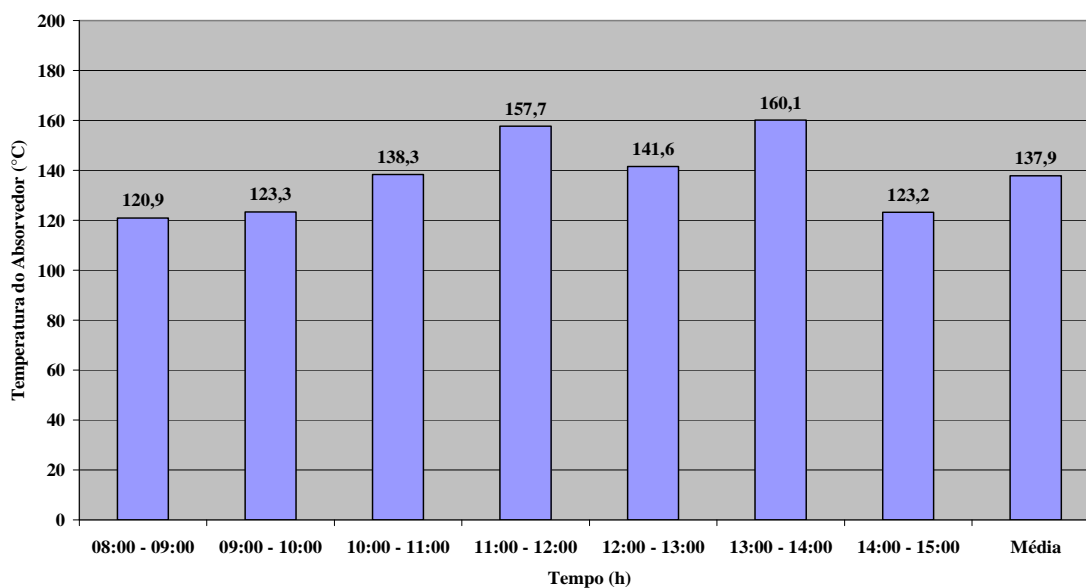


Figura 50. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

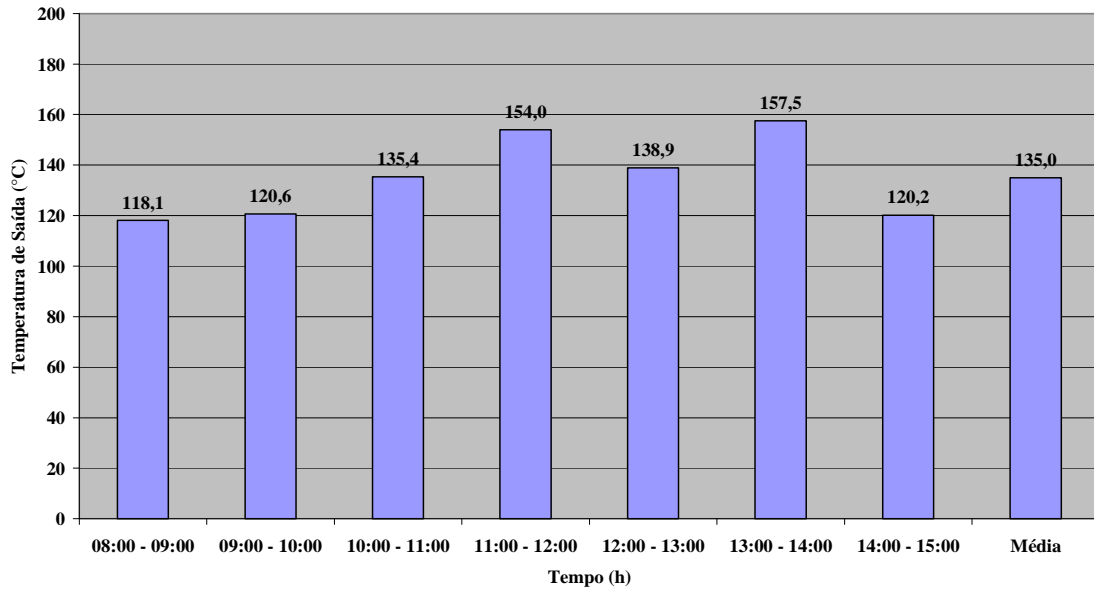


Figura 51. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.

As Figuras 52 e 53 mostram respectivamente, o comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio e o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor do concentrador em estudo durante a realização do ensaio.

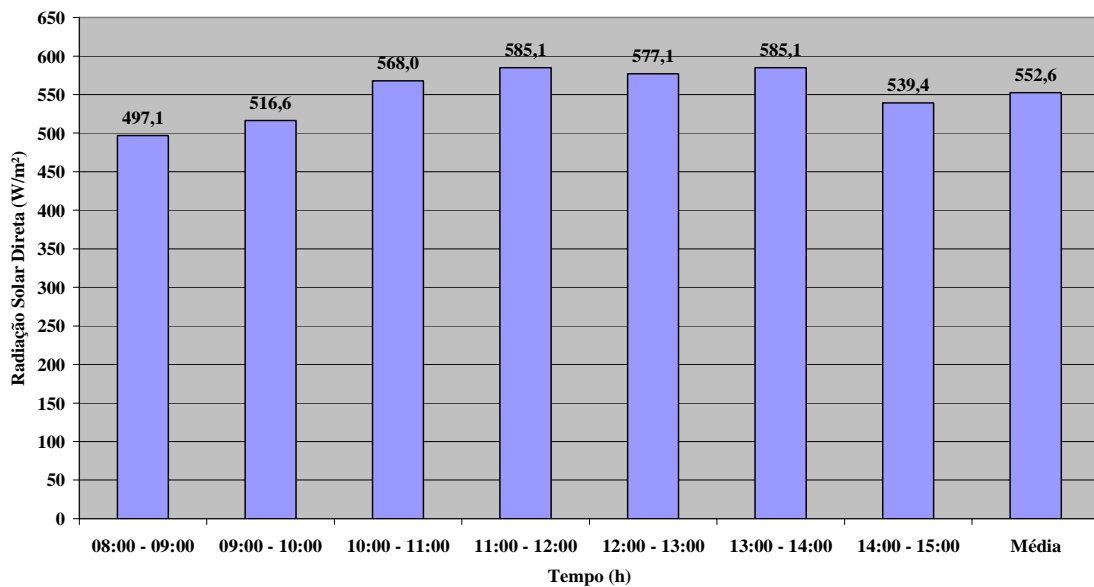


Figura 52. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

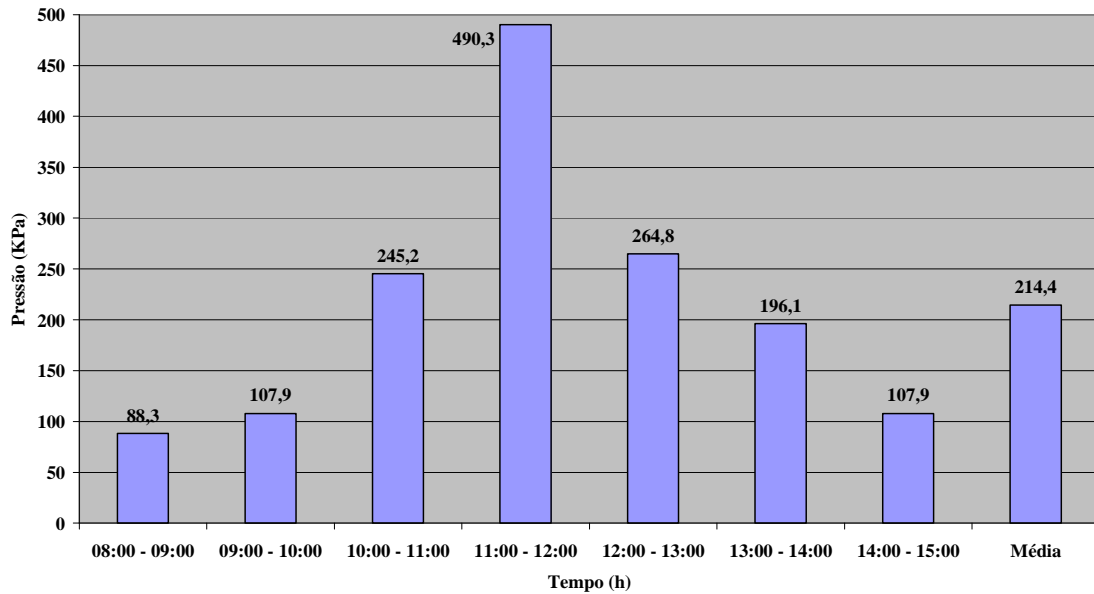


Figura 53. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor

Com relação ao teste que apresentou melhores resultados com a configuração, **COM CARGA E SEM AUTOMAÇÃO**, percebeu-se que nesse dia a velocidade de vento esteve em torno de 2,0 m/s, ao contrário dos outros dois onde a velocidade média esteve acima dos 2,5m/s.

O teste seguinte foi realizado com mecanismo automático de seguimento do movimento aparente do sol e seus resultados encontram-se mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. Teste do concentrador em estudo - **COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO**

Hora	T/absorvedor (°C)	T/saída (°C)	Radiação Solar Direta (W/m <sup>2</sup> )	Pressão (kPa)
08:00 - 09:00	108,8	106,5	467,4	39,2
09:00 - 10:00	115,0	112,5	488,0	98,1
10:00 - 11:00	132,3	129,9	529,1	245,2
11:00 - 12:00	126,8	124,6	504,0	225,6
12:00 - 13:00	162,1	159,5	568,0	529,6
13:00 - 14:00	171,2	170,2	581,7	706,1
14:00 - 15:00	167,9	165,6	587,4	637,4
<b>Média</b>	<b>140,6</b>	<b>138,4</b>	<b>532,2</b>	<b>354,5</b>

Os dados medidos revelam uma temperatura de saída de vapor, muito acima da temperatura de vaporização da água, demonstrando que o concentrador em estudo apresenta significativa eficiência térmica. Esse parâmetro apresentou um aumento percentual da ordem de 13,5%. Com relação à temperatura do absorvedor o aumento foi de 13%.

Esse aumento nas temperaturas está associado ao uso do mecanismo automático de seguimento do movimento aparente do sol, uma vez que o aumento da radiação solar direta foi de apenas 0,6%.

A pressão da água contida no tubo absorvedor esteve muito acima dos valores registrados no teste anterior em função da liberação do vapor acontecer nesse teste a cada quinze minutos ao invés de dez minutos do teste anterior, alcançando valor máximo em torno de 706 kPa.

A Figura 54 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor, já a Figura 55 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor do concentrador solar em estudo.

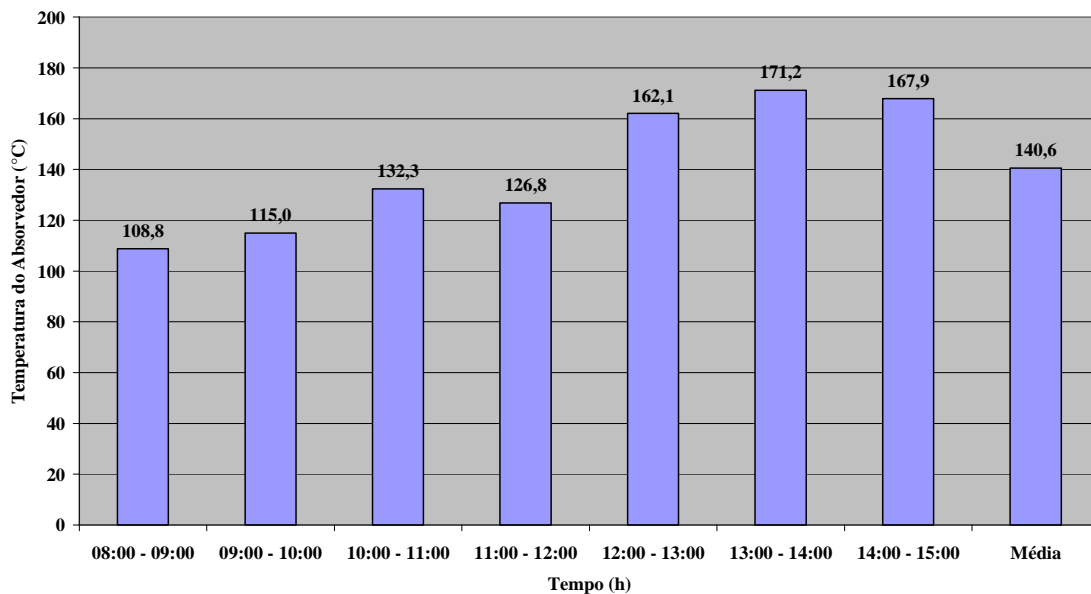


Figura 54. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

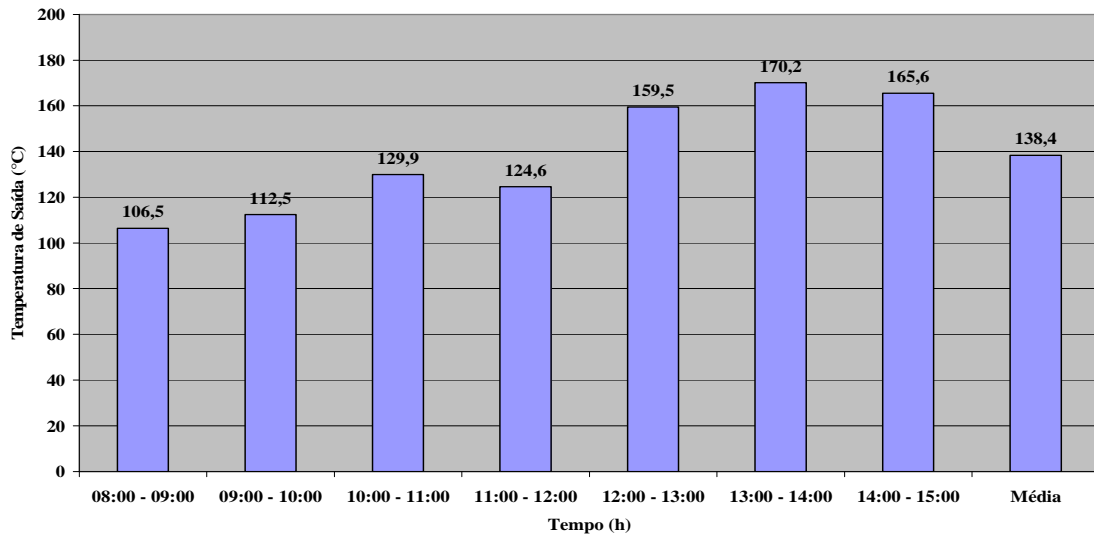


Figura 55. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.

A Figura 56 mostra o comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio, já a Figura 57 mostra o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor do concentrador em estudo durante a realização do ensaio.

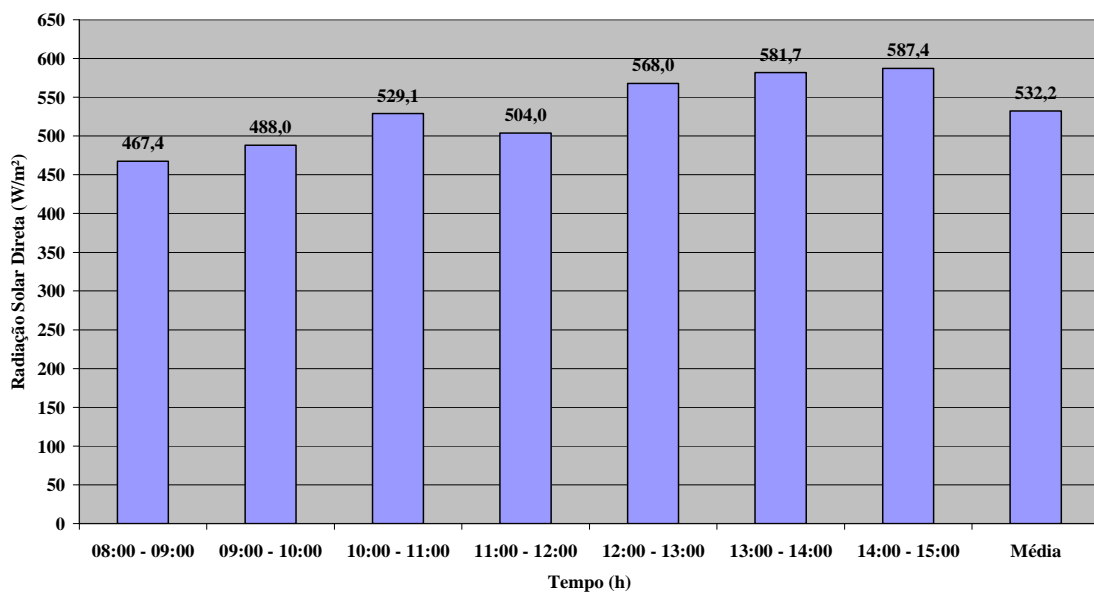


Figura 56. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

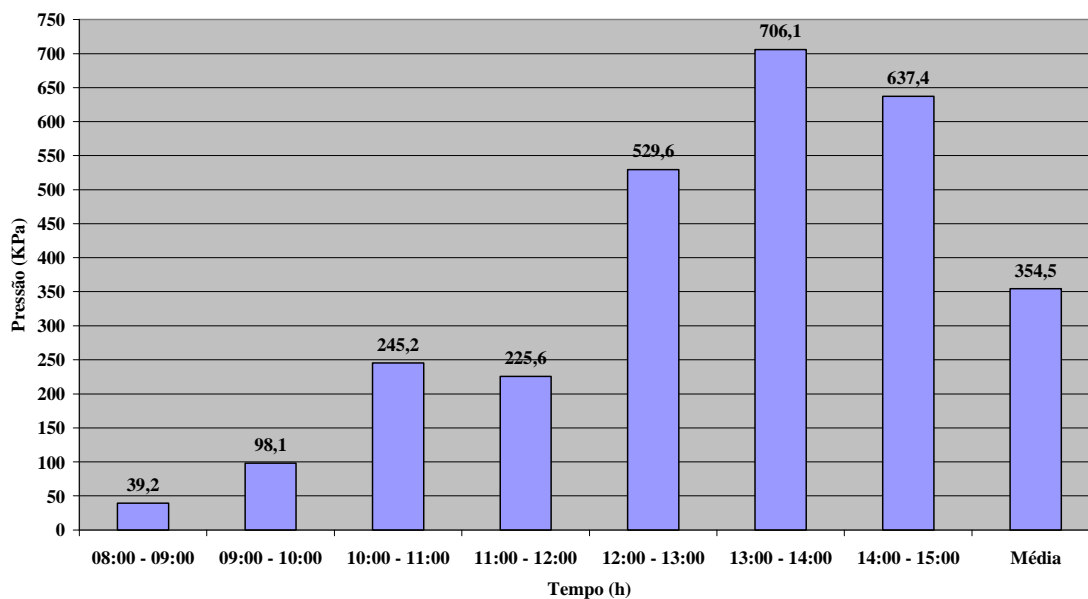


Figura 57. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

Tabela 8. Teste do concentrador em estudo - **COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO**

<b>Tempo (h)</b>	<b>Tabsorvedor (°C)</b>	<b>Tsaída (°C)</b>	<b>Radiação Solar Direta (W/m2)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
08:00 - 09:00	138,4	135,1	536,0	333,4
09:00 - 10:00	160,0	157,1	568,0	509,9
10:00 - 11:00	153,5	150,7	550,9	411,9
11:00 - 12:00	125,0	121,9	508,6	175,5
12:00 - 13:00	137,9	134,5	528,0	402,1
13:00 - 14:00	158,2	154,6	603,4	637,4
14:00 - 15:00	132,0	128,8	486,9	245,2
<b>Média</b>	<b>143,6</b>	<b>140,4</b>	<b>540,3</b>	<b>387,9</b>

Os dados medidos revelam resultados similares aos do teste anterior na mesma configuração, **COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO**, devido à semelhança das condições solarimétricas para os dois dias de teste.

Houve um aumento na radiação de 1,5%, gerando um aumento de 2% na temperatura do absorvedor e 1,4% na temperatura de saída do vapor.

A pressão máxima obtida foi 637,4 kPa, enquanto que a pressão média teve um aumento de 9,4% em relação ao teste anterior.

A Figura 58 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor, já a Figura 59 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor do concentrador solar em estudo.

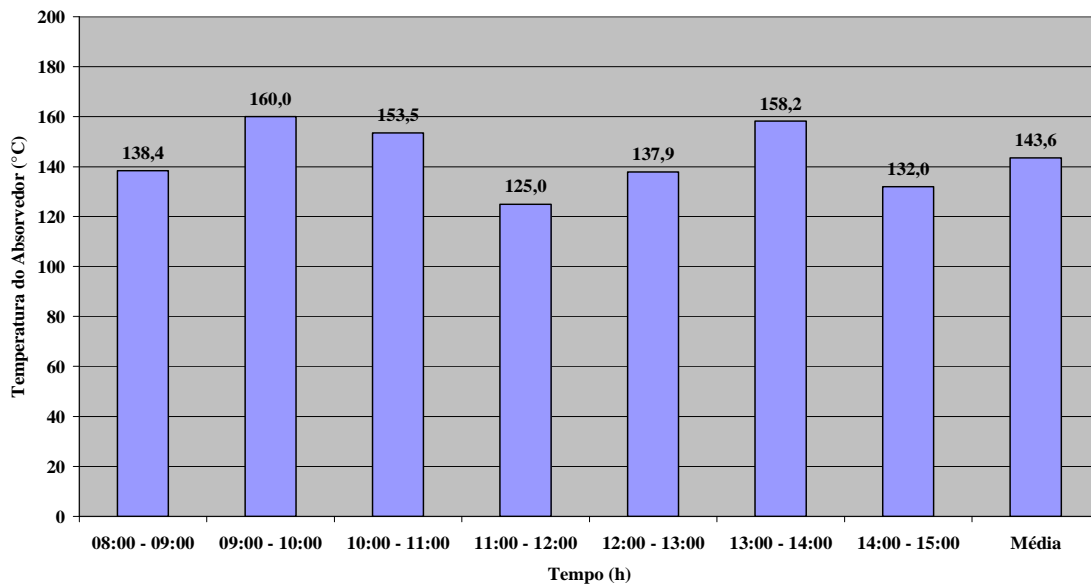


Figura 58. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

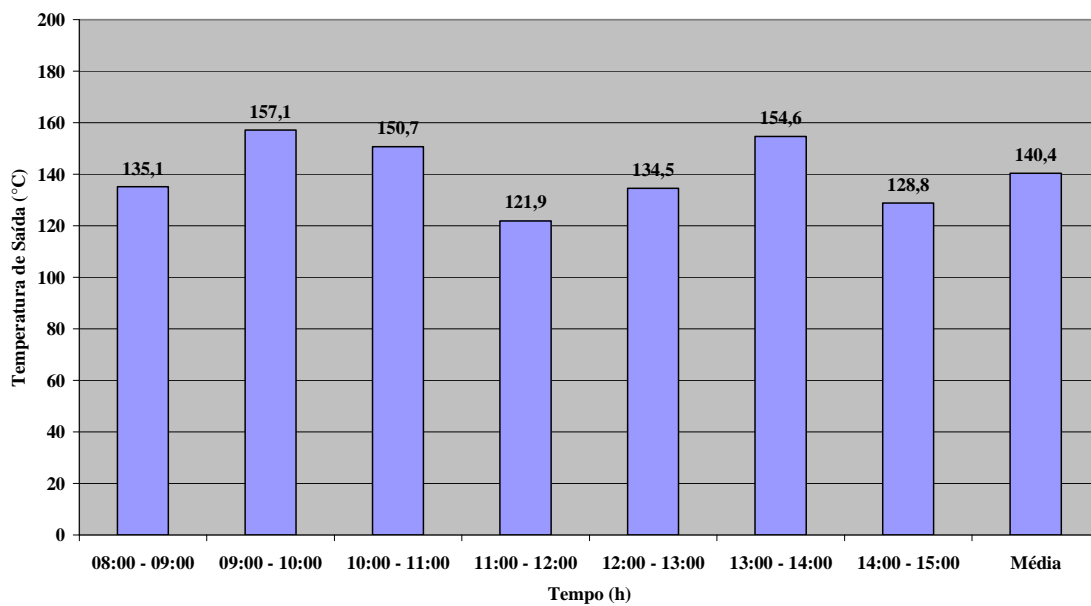


Figura 59. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.



A Figura 60 mostra o comportamento assumido pela radiação solar direta durante a realização do ensaio e a Figura 61, o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor do concentrador em estudo durante a realização do ensaio.

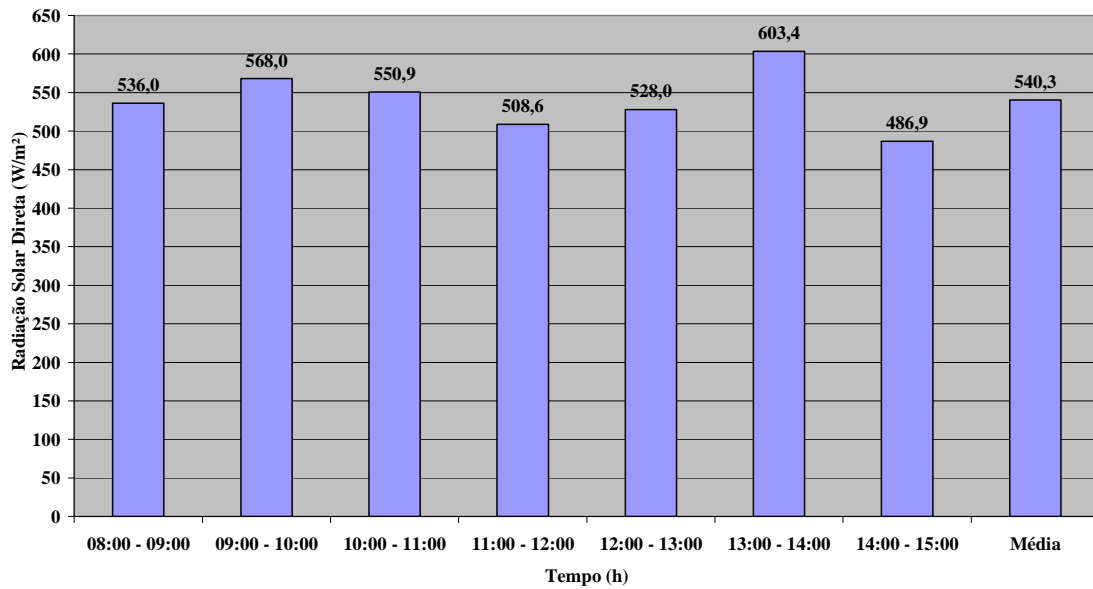


Figura 60. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

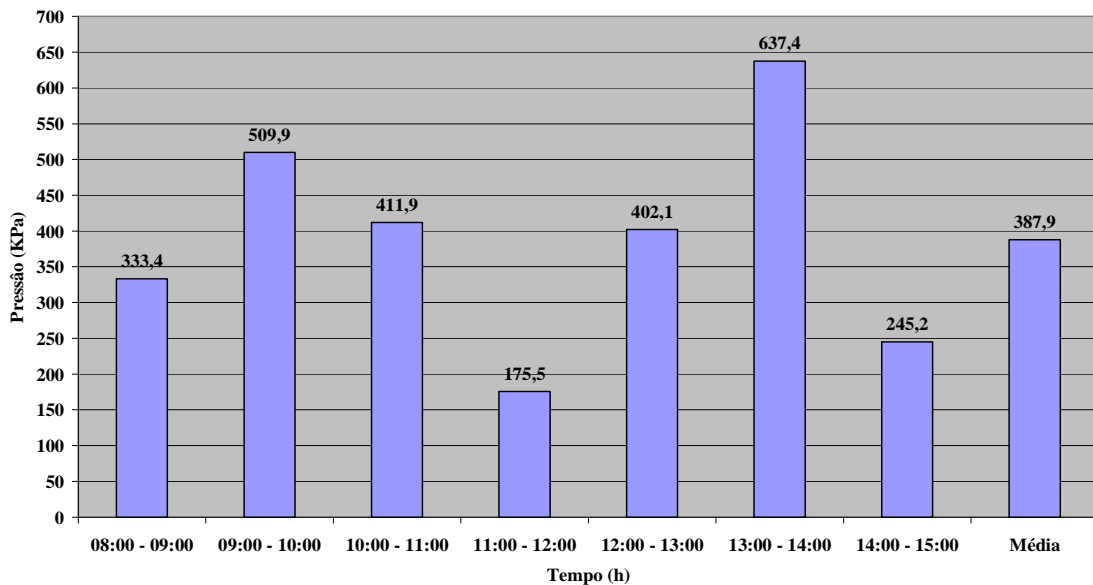


Figura 61. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

A Tabela 9 mostra os dados médios gerais obtidos para todas as configurações ensaiadas quando da realização dos testes com o concentrador solar em estudo.

Tabela 9. Resultados médios gerais obtidos nos testes com o concentrador em estudo.

Tipo de Configuração	Tabsorvedor (°C)	Tsaída (°C)	Rad. Direta (W/m <sup>2</sup> )	Pressão (kPa)	Volume (L)
Sem Carga/Sem Automação	150,6	-	538,6	-	-
Sem Carga/Com Automação	156,5	-	554,8	-	-
Com Carga/Sem Automação	124,5	122	528,8	120,5	8
Com Carga/Sem Automação	142,2	139,7	553	274,6	9,6
Com Carga/Sem Automação	137,9	135	552,6	214,4	8,5
Com Carga/Com Automação	140,6	138,4	532,2	354,5	9,8
Com Carga/Com Automação	143,6	140,4	540,3	387,9	11

Os dados demonstram que para a configuração **COM CARGA** o sistema automático de seguimento do movimento aparente do sol propiciou a obtenção de melhores resultados para todos os parâmetros levantados, mesmo trabalhando com níveis de radiação um pouco inferiores aos dias de ensaio com seguimento manual do movimento aparente do sol. Demonstrou-se, portanto, que a utilização do seguimento automático pode vir a ser fundamental para propiciar uma boa eficiência com conforto e comodidade para quem está operando o concentrador proposto.

No que diz respeito ao volume de água vaporizado o dia que apresentou um melhor desempenho foi para a configuração **COM CARGA/COM AUTOMAÇÃO** onde houve a vaporização de 11 litros de água em 07 h de operação.

A Figura 62 mostra o comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

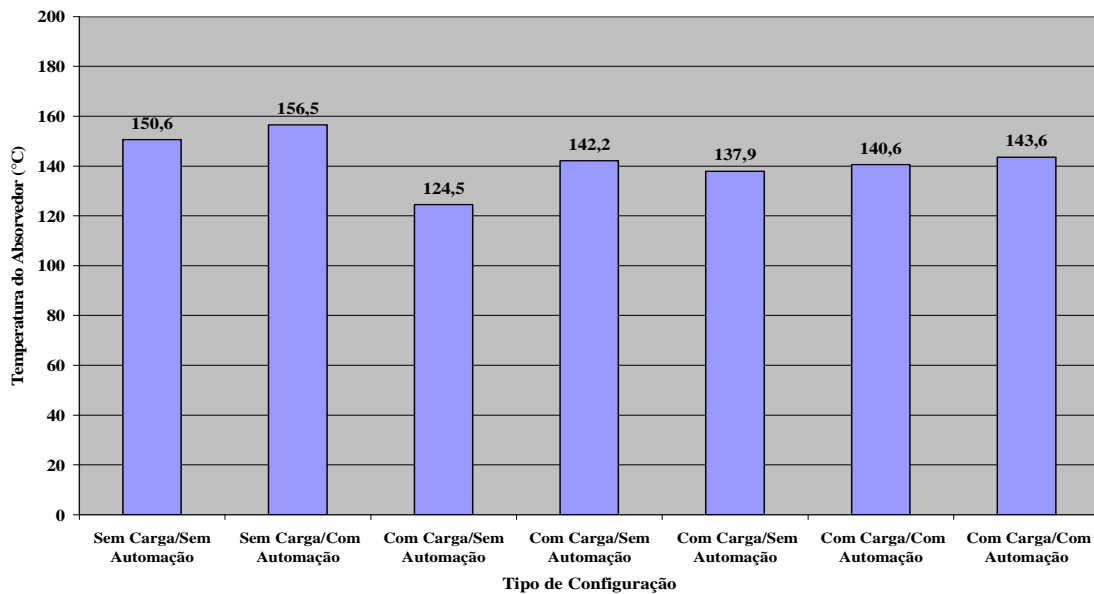


Figura 62. Comportamento assumido pela temperatura do absorvedor.

A Figura 63 mostra o comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.

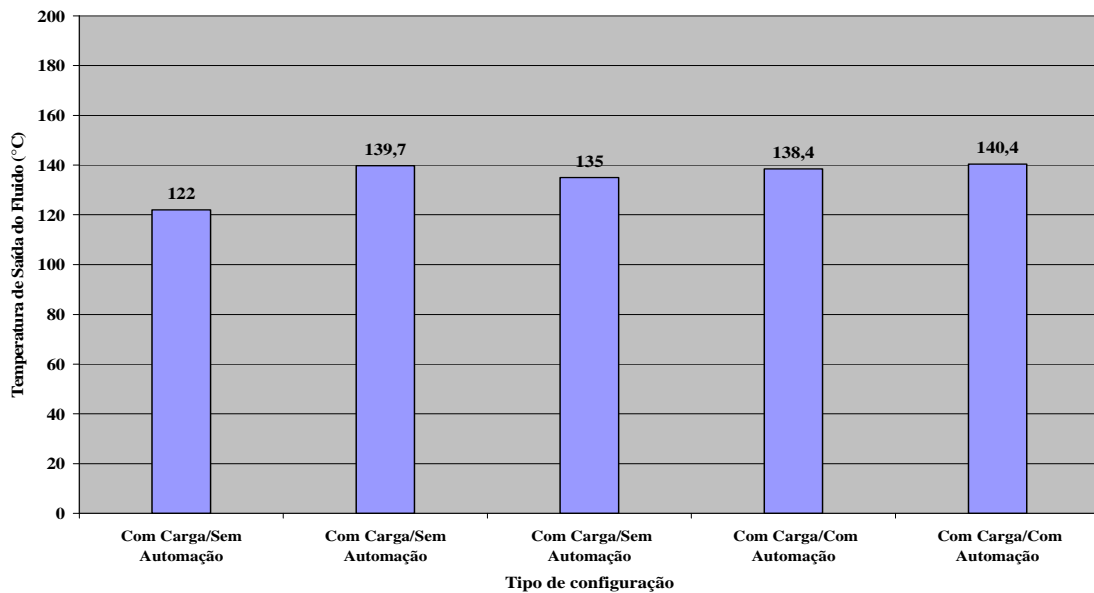


Figura 63. Comportamento assumido pela temperatura de saída do vapor.

A Figura 64 mostra o comportamento assumido pela radiação solar direta.

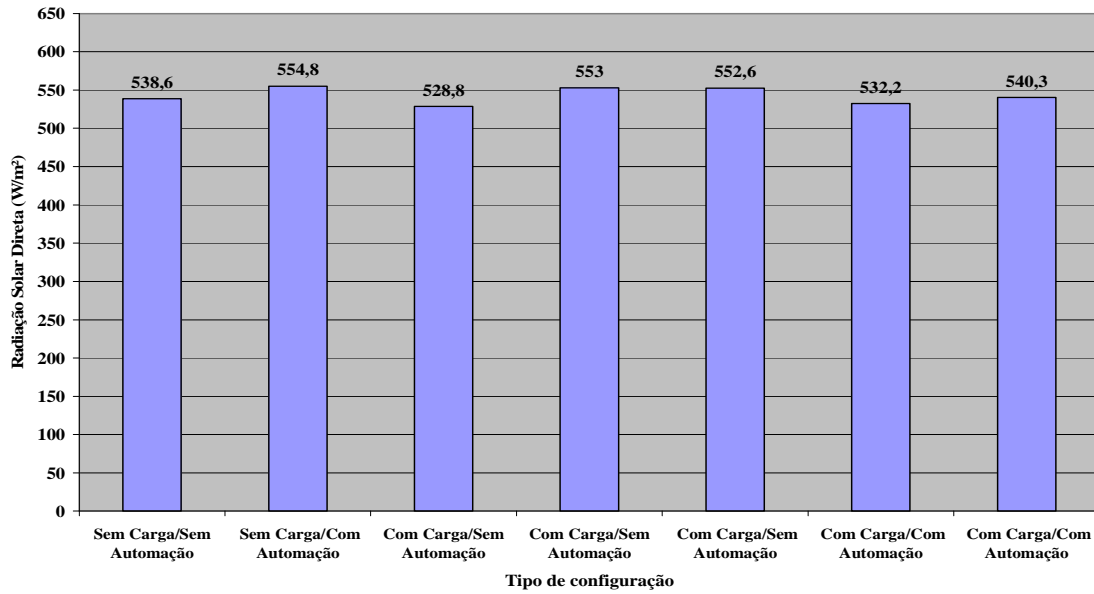


Figura 64. Comportamento assumido pela radiação solar direta durante o ensaio.

A Figura 65 mostra o comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

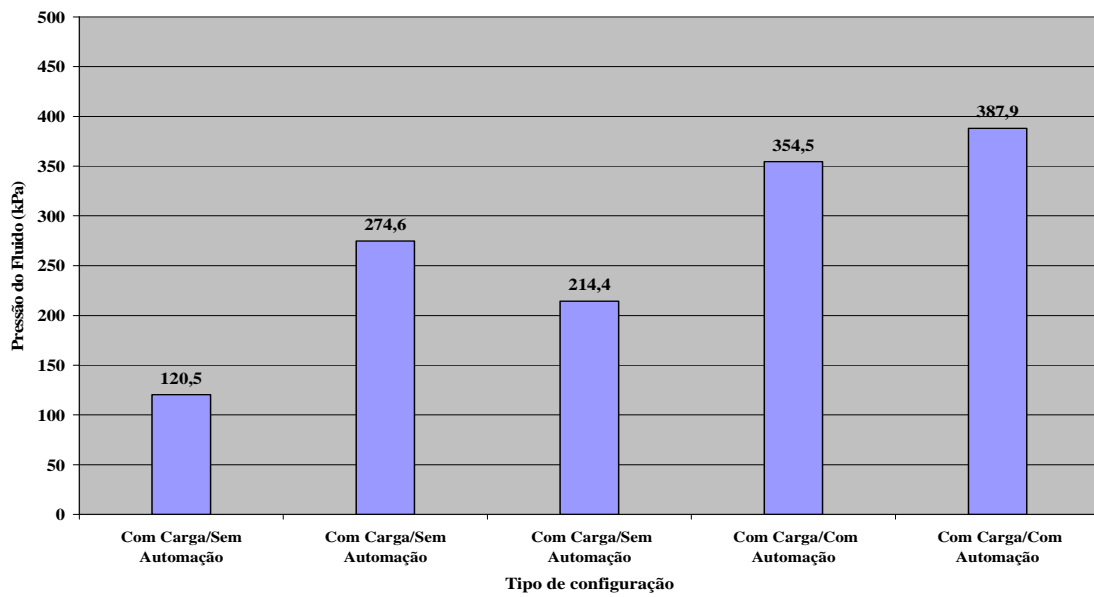


Figura 65. Comportamento assumido pela pressão da água contida no tubo absorvedor.

A Figura 66 mostra o comportamento assumido pelo volume de água vaporizado para cada dia de teste.

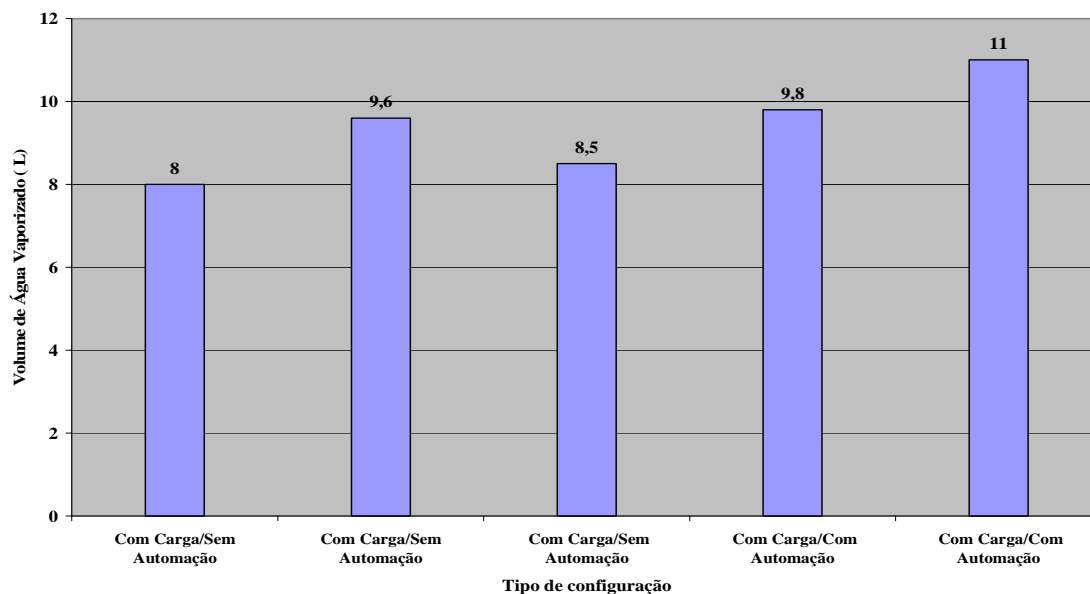


Figura 66. Comportamento assumido pelo volume de água vaporizado.

Foi diagnosticada a área de sombra no tubo absorvedor do concentrador em função do mesmo não estar em alinhamento direto com o movimento do sol na direção leste-oeste. Percebeu-se que no início e no fim do teste, as 8:00 e 15:00 horas, área de sombra correspondeu a 0,08 m e 0,07 m respectivamente, o que correspondem a 4% e 3,5% em relação ao comprimento total do tubo absorvedor. Ao meio dia essa área de sombra correspondeu a 2%, o que representa um percentual muito baixo de área perdida do tubo absorvedor.

### 4.3. Viabilidade econômica

O custo do concentrador foi bastante reduzido pelo fato de utilizarmos uma estrutura de um birô utilizado pelo professor em sala de aula. Utilizou-se também um tubo encontrado em sucata para constituir o eixo do concentrador, o que também serviu para diminuir o custo de fabricação do concentrador proposto.

O preço dos materiais comprados para a construção de 2,24 m<sup>2</sup> de concentrador foi R\$ 418,50, o que corresponde aproximadamente €\$ 160,35.

Os materiais comprados para a fabricação do concentrador foram: espelho, fibra de vidro, cera desmoldante, resina ortofítica, líquido catalizador, cola fórmica, tubo de

cobre, conexões de cobre, válvula de retenção unidirecional, mancais, tinta óleo, bateria de moto, componentes eletrônicos e outros.

O custo de fabricação do sistema, concentrador + sistema de rastreamento, ficou em torno de R\$ 186,84 o metro quadrado, o equivalente a €\$ 71,58 que representa um custo bem baixo em relação aos concentradores disponíveis no mercado que custam €\$ 315,00/m<sup>2</sup>.

De acordo com os dados obtidos, a potência útil do concentrador em estudo equivale a 488,6 W. Isso quer dizer que a cada hora o fluido de trabalho recebe 488,6 W de energia.

Obtendo-s 488,6 W/h, em 7 horas de funcionamento por dia, teremos 3420,2 W/dia = 3,4 kW/ dia.

Tem-se que o preço do kW/h custa R\$ 0.37 podemos calcular a economia que se fará em um ano de uso do concentrador.

$$3,4 \text{ kW/dia} \times 365 \text{ dias} \times \text{R\$ } 0,37/\text{kW} = \text{R\$ } 459,00$$

Sabendo que o valor gasto para a fabricação do concentrador foi de aproximadamente R\$ 418,50; observa-se que o retorno do capital investido ocorrerá em menos de 12 meses. Isso mostra claramente que concentrador solar projetado é viável economicamente.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos processos de dimensionamento, construção, montagem, bem como nos ensaios efetuados durante o levantamento de desempenho térmico, serão apresentadas as seguintes conclusões.

1. O concentrador proposto mostrou-se viável termicamente produzindo vapor que foi a finalidade para a qual foi construído;
2. O molde construído para a obtenção da superfície do concentrador permitiu a obtenção de um cilindro-parábola com um acentuado grau de perfeição, não apresentando rugosidades ou deformações na superfície onde foram colados os espelhos;
3. Os segmentos de espelho de 1,0 m de comprimento por 0,002 m de largura permitiram a obtenção de uma superfície refletora que se adequou ao perfil parabólico da superfície do concentrador, além do foco em uma área mais reduzida, produzindo o aumento do fator de interceptação dos raios oriundos da superfície refletora;
4. Os processos de fabricação e montagem do concentrador mostraram-se simples e podem ser repassados para pessoas com um mínimo de conceitos técnico-científicos;
5. O concentrador apresentou viabilidade econômica uma vez que o retorno do capital investido se dá em menos de 12 meses de utilização. Seu preço está muito abaixo dos concentradores comercialmente disponíveis, embora essa comparação não possa ser feita de forma generalizada uma vez que tais concentradores têm superfície refletora formada por espelhos contínuos tensionados e mecanismo de rastreamento do movimento aparente do sol bastante sofisticado;
6. O preço do mecanismo de rastreamento automático do movimento aparente do sol não ultrapassou R\$ 32,00 (US\$ 19.00) por ser composto por componentes eletrônicos simples, baratos e de fácil aquisição, e propicia uma comodidade ao usuário do concentrador uma vez que o mesmo não precisa estar sendo regulado, para que seu foco esteja sempre no centro do tubo absorvedor;

7. O circuito eletrônico do mecanismo de rastreamento apresentou, em alguns instantes, dificuldades para acionar o motor, devido ao aumento do torque no eixo ocasionado pelo desbalanceamento da superfície do concentrador;

8. O sistema manual de acompanhamento mostrou-se eficiente permitindo a regulação do concentrador com um mínimo de esforço e de forma simples, acessível a usuários de quaisquer níveis sócio-intelectuais;

9. O mecanismo automático de rastreamento do movimento aparente do sol permitiu a obtenção de valores mais elevados para todos os parâmetros medidos, o que demonstra que o seguimento automático, além de propiciar comodidade ao usuário, conduz a uma melhor eficiência térmica do concentrador em estudo;

10. O aumento da abertura do concentrador em 12% permitiu o aumento do fator de concentrador de 22 para 25, correspondendo a 12,8%, proporcionando a obtenção de maiores temperaturas no tubo absorvedor e em consequência na água nele contida;

11. Pode-se observar que a velocidade do vento exerce uma influência fundamental na temperatura do tubo absorvedor quando ultrapassa 3,0 m/s. Para minimizar esse efeito o concentrador foi ensaiado num local onde a velocidade de vento raramente ultrapassava esse limite;

12. O regime de ensaio onde a água permanecia presa no tubo absorvedor por períodos entre 10 e 15 minutos produziu variações bruscas na temperatura, aumentando em certos intervalos, consideravelmente a pressão, chegando a produzir a quebra de vários manômetros;

Com base nos processos de dimensionamento, construção, montagem, bem como nos ensaios efetuados durante o levantamento de desempenho térmico, serão apresentadas a seguir, sugestões para otimizações e efetivação de futuros trabalhos com concentradores cilindro-parabólicos.

1. Para uma melhor eficiência do concentrador, que permitiria a obtenção de um volume de fluido vaporizado maior, tornar-se-ia necessária a construção de um concentrador de maior área, com uma abertura bem mais significativa, o que permitiria um aumento significativo no



seu fator de concentração, a otimização do mecanismo de rastreamento automático e a diminuição das perdas térmicas do absorvedor;

2. O sistema de alimentação do concentrador precisa ser substituído por outro de maior capacidade para evitar a realimentação contínua do mesmo;

3. É preciso melhorar o isolamento da superfície superior do tubo absorvedor para permitir uma diminuição de suas perdas térmicas;

4. O balanceamento do cilindro-parábola precisa ser otimizado para permitir um melhor funcionamento do sistema automático de rastreamento do movimento aparente do sol;

5. O concentrador deve ser testado em regime de fluxo contínuo, com a utilização do registro apenas para regulagem da vazão, uma vez que foi demonstrada que as temperaturas médias obtidas foram sempre superiores à temperatura de vapor da água;

6. No que diz respeito ao mecanismo de rastreamento automático do movimento aparente do sol, um motor de passo poderia substituir o motor de corrente contínua utilizado, por possibilitar uma maior precisão de movimento;

7. É importante que sejam feitos vários dias de ensaios, em torno de um ano, para um diagnóstico mais real do desempenho do concentrador. Os dados devem ser medidos através de um sistema eletrônico que permita a aquisição de dados instantaneamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Bezerra, A.M., **Aplicações Térmicas da Energia Solar**, Editora Universitária, João Pessoa, Pb, 2001.
- 2 - Bhowmik, N. C., Mathur, S. S., Kandpal, T. C., **Operating temperatures of linear solar concentrators for optimum power output**, Energy Conversion and Management, Volume 25, Issue 2, 1985, Pages 175-177.
- 3 - Censolar (Centro de Estudios de la Energia Solar) **Avances em Energías Solar**, PROGNSA, Sevilha, 2001, Espana.
- 4 - Centro de Energias Renováveis – UNESP, 2005.
- 5 - Duarte, H. V. **“Contribuição ao desenvolvimento de tubos de calor”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1985.
- 6 - Duff, W. S., Lameiro, G. F., Löf, G. O. G., **Parametric performance and cost models for solar concentrators**, Solar Energy, Volume 17, Issue 1, 1975, Pages 47-58.
- 7 - Duffie, J.A., Beckman, W.A., **Solar Engineering of Thermal Processes**, II edition, New York, John & Sons, 757 p., 1991..
- 8 - Fraidenreich, N., Lyra, F., Energia solar: Fundamentos e Tecnologias de conversão heliotérmelétrica e fotovoltaica, Ed. Universitária, Recife, 1995.
- 9 - Gil, M. C., Santos, A.C.,2001, **Low-temp Thermal Solar Energy**, Censolar (Study Center of the Solar Energy), Sevilla.
- 10 - Grald, E. W., Kuehn, T. H. **Performance analysis of a parabolic trough solar collector with a porous absorber receiver**, Solar Energy, Volume 42, Issue 4, 1989, Pages 281-292.

- 11 - Hamad, F. A. W., **The performance of a cylindrical parabolic solar concentrator**, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Basrah, University, 2003.
- 12 - Incropera, F.P., de Witt, D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, Guanabara Koogan, 4ª edição, Rio de Janeiro, 2003.
- 13 - Leutz, R., Annen, H. P., **Reverse ray-tracing model for the performance evaluation of stationary solar concentrators**, Physics Department, Philipps-University, Renthof 5, Germany, 2006.
- 14 - Lion, C. A. P. Q., **Construção e análise de desempenho de um fogão solar à concentração utilizando dois focos para cozimento direto**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2007.
- 15 - Lotker, M., **Barriers to Commercialization of Large Scale Solar Electricity. The luz experience**. Informe técnico publicado por Sandia National Laboratories, 1991.
- 16 - Mendes, F.; Collares, M., **“Tubo de calor para extração de energia captada por um coletor do tipo CPC”**. 2º Congresso Ibérico de Energia Solar, Lisboa, Portugal, 1984.
- 17 - Mullick, S. C., Nanda S. K., **Heat loss factor for linear solar concentrators**, *Applied Energy*, Volume 11, Issue 1, 1982, Pages 1 – 13.
- 18 - Negi, B. S., Mathur, S. S. and Kandpal, T. C., **Annual useful energy collection by linear solar concentrators**, *Solar & Wind Technology*, Volume 2, Issues 3-4, 1985, Pages 205-207.
- 19 - Pérez, M. S., **Sistemas Termosolares de Concentración**, – Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla, Curso 2005.
- 20 - Queiróz, W. F., **Construção de um fogão solar à concentração para cozimento direto e indireto**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN – Natal/RN, 2005.

21 - Richter, J. L., **Optics of a two-trough solar concentrator**, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1999.

22 - Riveros, H. G., Oliva, A. I., **Graphical analysis of sun concentrating collectors**, *Solar Energy*, Volume 36, Issue 4, 1986, Pages 313-322.

23 - Rocha, J. M. G. **“Tubo de calor com leito poroso metálico sinterizado”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, 1988.

24 - Souza, L.G.M., Gomes, U.U., **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.

25 - Souza, T. M., **Solar parabolic cylindrical heater with film of polyethylene for heating of water and drying of grains**, COBEM, 2005.

26 - Spirk W., Ries H., Muschaweck J. and Timinger A., **Optimized compact secondary reflectors for parabolic troughs with tubular absorbers**, *Solar Energy*, Volume 61, Issue 3, September 1997, Pages 153-158.

27 - Winston, R. **“Principles of solar concentrators of novel design”**, *Solar Energy*, vol. 16, pp. 89-95, 1974.

28 - [www.inpe.gov.br](http://www.inpe.gov.br).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)