



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**



**Vicente de Vasconcelos Claudino Filho**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR FRESNEL PARA  
SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DESSECANTE**

**JOÃO PESSOA – PB**  
**2016**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N°**

**Vicente de Vasconcelos Claudino Filho**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR FRESNEL PARA SISTEMA DE  
CLIMATIZAÇÃO DESSECANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

**JOÃO PESSOA – PB**

**2016**

C615d Claudino Filho, Vicente de Vasconcelos.  
Desenvolvimento de um coletor Fresnel para sistema de climatização dessecante / Vicente de Vasconcelos Claudino Filho.- João Pessoa, 2016.  
106f. : il.  
Orientador: José Maurício Alves de Matos Gurgel  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR  
1. Energias renováveis. 2. Energia solar. 3. Coletor Fresnel.  
4. Concentrador solar.

UFPB/BC

CDU: 620.91(043)

**Vicente de Vasconcelos Claudino Filho**

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR FRESNEL PARA SISTEMA DE  
CLIMATIZAÇÃO DESSECANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de junho de 2016.

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel UFPB  
Prof. Dr. João Manoel Dias Lira UFPB  
Prof. Dr. \_\_\_\_\_ IFPB  
Prof. Dr. \_\_\_\_\_ IFPB

Orientador(a)  
Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

**JOÃO PESSOA - PB  
2016**

## DEDICATÓRIA

*A minha mãe Luzimar Pereira dos Santos e a minha namorada  
Erika Ellen Bezerra Figueirêdo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor José Maurício Alves de Matos Gurgel pela orientação e apoio para a realização deste trabalho, ao professor Jobson Francisco da Silva e sua esposa Maria Clea Cavalcante da Silva, além de seus colaboradores Roberto, Sérgio e Ricardo, pela enorme ajuda na fabricação da máquina utilizada neste trabalho, aos professores João Marcelo Dias Ferreira, Márcio Gomes da Silva e Alberdan Santiago de Aquino.

Aos meus amigos de mestrado, em especial a “turma da salinha” Ester Melo Cavalcanti, Alysso Domingos Silvestre, Ivan de Almeida Machado, Anderson Moreira Sá, Thiago Freire Melquiades, Flávio de Melo Luna, Maria Izabel da Silva Guerra e Ithyara D. Machado de Medeiros.

Aos doutorandos José Josimar Soares e Francisco José Araujo Melo e ao aluno de PiBic David Domingos Soares da Silva.

A minha mãe Luzimar Pereira dos Santos, a minha namorada Erika Ellen Bezerra Figueirêdo, e a Deus pelo dom da inteligência para que eu pudesse chegar ao fim desse caminho.

## **RESUMO**

O Brasil tem como fonte principal para produção de energia elétrica as hidrelétricas que utilizam água para movimentar as turbinas e como fonte complementar são utilizadas as termoeletricas que usam óleo combustível para produção de energia elétrica. Ambas geram um grande impacto ambiental, devido ao fato das hidrelétricas necessitarem de enormes áreas para a construção das represas, o que muitas vezes acarreta na destruição de ecossistemas importantes para a região onde irá ser instalada a hidrelétrica, além do fato que elas necessitam do ciclo das chuvas para que as represas possuam capacidade de operação, enquanto que as termoeletricas queimam combustíveis fósseis, aumentando assim as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Uma alternativa para a solução dos problemas citados anteriormente é a utilização de fontes renováveis de energia, dando ênfase neste trabalho a energia solar. A energia solar pode ser dividida em duas vertentes: térmica e fotovoltaica. Este trabalho está voltado para a utilização térmica da energia solar, através da utilização de um concentrador solar do tipo Fresnel para o aquecimento de água, a qual irá acionar um sistema de refrigeração de ambientes com a utilização de rotores dessecantes. A escolha do coletor do tipo Fresnel se deu pelo campo de desenvolvimento deste concentrador estar ainda em constante crescimento e pelo fato do mesmo ocupar uma área relativamente pequena quando comparado com outros concentradores solares térmicos, além de sua construção ser simples e de baixo custo quando novamente comparada a outros concentradores solares.

Palavras-chave: Energia solar, Fresnel, concentrador solar.

## **ABSTRACT**

Brazil has as a main source for production of electricity the dams using water to drive the turbines and as a secondary source are used the thermoelectric power plants that use fuel oil for electric power production. Both generate a large environmental impact, due to the fact of the dams need huge areas for its construction, which often leads to destruction of important ecosystems in the region where it will be installed the hydroelectric plant, besides the fact that they need the rainfall cycle so that the dams have the operating capacity, while the thermoelectric power plants burn fossil fuels thus increasing emissions of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. An alternative to the solution of the problems mentioned above is the use of renewable sources of energy, with emphasis on this work. Solar energy can be divided into two parts: thermal and photovoltaic. This work it is focused on thermal use of solar energy, with a Fresnel-type solar concentrator to heat water, which will trigger a cooling system environment with the use of desiccant rotors. The choice of type Fresnel collector gave the field of development of this hub is still in constant growth and by the fact that even occupy a relatively small area when compared to other solar thermal concentrators, in addition to its construction be simple and low cost when again compared to other solar concentrators.

Keywords: Solar energy, Fresnel, solar concentrator.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Gráfico da oferta de energia elétrica por fonte.....	2
<b>Figura 2</b> Radiação Solar Diária Média Anual para a Alemanha.....	3
<b>Figura 3.</b> Radiação Solar Média para o Brasil Wh/m <sup>2</sup> .....	3
<b>Figura 4.</b> Radiação Solar Média para o Brasil Wh/m.....	4
<b>Figura 5.</b> O Sol.....	8
<b>Figura 6.</b> Transferência de calor por radiação entre dois corpos e um ambiente com menor temperatura.....	9
<b>Figura 7.</b> Espectro eletromagnético.....	10
<b>Figura 8.</b> Esquema de um refletor linear Fresnel.....	14
<b>Figura 9.</b> Esquema de um refletor linear Fresnel compacto.....	16
<b>Figura 10.</b> Esquema de tubo absorvedor e receptáculo.....	17
<b>Figura 11.</b> Variação anual da declinação solar com norte positivo.....	23
<b>Figura 12.</b> Posição da Terra nos solstícios e equinócios.....	24
<b>Figura 13.</b> Mapa dos fusos horários.....	25
<b>Figura 14.</b> Ilhas Diomedes.....	26
<b>Figura 15.</b> Linha internacional da data.....	27
<b>Figura 16.</b> Ângulo de zênite.....	29
<b>Figura 17.</b> Parâmetros de dimensionamento.....	40
<b>Figura 18.</b> Ângulo de inclinação dos espelhos.....	41
<b>Figura 19.</b> Ângulo transversal da altitude solar $\alpha_T$ .....	42
<b>Figura 20.</b> Tamanho da sombra.....	44
<b>Figura 21.</b> Sombreamento entre espelhos.....	46
<b>Figura 22.</b> Gráfico da área de sombreamento dos espelhos.....	47
<b>Figura 23.</b> Bloqueio da reflexão da luz solar entre espelhos.....	48
<b>Figura 24.</b> Gráfico da área de bloqueio entre espelhos.....	49
<b>Figura 25.</b> Gráfico da área de bloqueio entre espelhos na configuração B.....	50
<b>Figura 26.</b> Gráfico da área de bloqueio entre espelhos na configuração B.....	51
<b>Figura 27.</b> Gráfico da área de sombreamento entre espelhos na configuração C.....	52
<b>Figura 28.</b> Gráfico da área de bloqueio entre espelhos na configuração C.....	52
<b>Figura 30.</b> Especificações técnicas do motor.....	53
<b>Figura 31.</b> Encoder rotativo.....	54
<b>Figura 32.</b> Esquema de uma ponte H.....	56
<b>Figura 33.</b> Representação do fluxo de corrente.....	57
<b>Figura 34.</b> Situação a ser evitada em uma ponte H.....	58
<b>Figura 35.</b> Esquema de uma placa com ponte H.....	58
<b>Figura 36.</b> Gráfico da curva teórica que alcança o absorvedor.....	60
<b>Figura 37.</b> Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo.....	61
<b>Figura 38.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel.....	62
<b>Figura 39.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel.....	63
<b>Figura 40.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura de 1 m.....	64

<b>Figura 41.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor com altura do absorvedor de 10 m.....	65
<b>Figura 42.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10 m.....	66
<b>Figura 43.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor com altura do absorvedor de 20 m.....	67
<b>Figura 44.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 20 m.....	67
<b>Figura 45.</b> Gráfico da curva teórica do fluxo de potência que alcança o absorvedor para a cidade de Sorocaba – SP.....	69
<b>Figura 46.</b> Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo para a cidade de Sorocaba – SP.....	70
<b>Figura 47.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de Sorocaba – SP.....	71
<b>Figura 48.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de Sorocaba – SP.....	72
<b>Figura 49.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de Sorocaba – SP com altura do absorvedor de 10 m .....	73
<b>Figura 50.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10 m para a cidade de Sorocaba – SP .....	74
<b>Figura 51.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a produção de vapor na cidade de Sorocaba – SP com altura de absorvedor de 20 m .....	75
<b>Figura 52.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura de 20 m para a cidade de Sorocaba – SP.....	76
<b>Figura 53.</b> Gráfico da curva teórica do fluxo de potência que alcança o absorvedor para a cidade de São Gonçalo – PB.....	77
<b>Figura 54.</b> Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo para a cidade de São Gonçalo – PB .....	78
<b>Figura 55.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de São Gonçalo – PB.....	79
<b>Figura 56.</b> Gráfico da energia cumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de São Gonçalo – PB.....	80

<b>Figura 57.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de São Gonçalo – PB com altura do absorvedor de 10 m .....	81
<b>Figura 58.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10 m para a cidade de São Gonçalo – PB.....	82
<b>Figura 59.</b> Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a produção de vapor na cidade de São Gonçalo – PB com altura do absorvedor de 20 m.....	83
<b>Figura 60.</b> Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 20 m para a cidade de São Gonçalo – PB.....	84

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Cores e seus comprimentos de onda. ....	11
----------------------------------------------------------	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$\alpha$  – ângulo formado entre o eixo do coletor e o eixo N-S

$\alpha_{\text{abs}}$  – absorvidade do material do tubo receptor

$\delta$  – declinação solar

$\beta_i$  – ângulo de inclinação da  $i$ -ésima fileira de espelhos

$\eta_0$  – fração de radiação que alcança o absorvedor

$\Delta\lambda$  – intervalo de comprimento de onda

$\mu\text{m}$  – micrometro

$\theta$  – ângulo de incidência de radiação solar

$\theta_n$  – inclinação dos espelhos

$\theta_z$  – ângulo de zênite

$\omega$  – ângulo horário

$\omega_s$  – ângulo horário do pôr do sol

$\xi_0$  – meio ângulo de subtensão solar

$\gamma$  – azimute solar

$\gamma_{\text{si}}$  – azimute de superfície

$\psi$  - ângulo formado pelo plano transversal (plano perpendicular ao eixo do coletor) entre a vertical e a projeção dos raios solares no plano transversal

$\chi_i$  - o ângulo formado pelo plano transversal (plano perpendicular ao eixo do coletor) entre a vertical e a projeção do raio refletido pela  $i$ -ésima fileira de espelhos no plano transversal

$a_r$  – azimute da sombra do tubo absorvedor

$A_{b,i}$  – área de bloqueio entre espelhos

$A_{s,i}$  – área de sombreamento entre espelhos

$b_{\text{abs}}$  – largura da sombra projetada pelo tubo absorvedor

BEN – balanço energético brasileiro

$d_i$  – distância do  $n_i$  espelho até o absorvedor

$G_s$  – constante solar

$G_0$  – radiação extraterrestre

$h$  – altura solar

$H_0$  – radiação solar diária

$H_{abs}$  – altura do tubo absorvedor

$H_{b,i}$  – altura do bloqueio entre espelhos

$H_d$  – energia difusa

$h_{comb}$  – coeficiente de calor combinado

$h_{conv}$  – coeficiente de calor por convecção

HL – hora legal

$h_{rad}$  – coeficiente de calor por radiação

HS – hora solar

$H_{s,i}$  – altura de sombreamento entre espelhos

$(\overline{H})$  - estimativa de medida de radiação solar

$I_d$  – irradiação difusa

$I_{dir}$  – radiação solar direta instantânea

$I_g$  – radiação solar global instantânea

K – Kelvin

$K_t$  – índice de claridade

kWh – quilowatt hora

$l$  – comprimento da sombra do tubo absorvedor

$l_a$  – largura da sombra do tubo absorvedor

$L$  – comprimento da fileira de espelhos

$L_{b,i}$  – comprimento do bloqueio entre espelhos

$L_l$  – Longitude local

$L_p$  – longitude padrão

$L_{s,i}$  – comprimento do sombreamento entre espelhos

$L_t$  – Latitude padrão

$m$  – metro

$MWh$  – megawatt hora

$N$  – insolação teórica máxima

$N_E$  – número de espelhos

$n_f$  – número de fileiras de espelhos

$p$  – distância de centro a centro entre espelhos consecutivos

$Q_a$  – quantidade de energia que alcança o absorvedor

$Q_h$  – localização dos espelhos

$W$  – largura dos espelhos

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO.....	1
--------------------	---

## CAPÍTULO II

2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
2.2. Objetivos Específicos.....	5
3. ENERGIA.....	6
3.1. Conceito de Energia.....	6
3.2. O Sol.....	7
3.3. Radiação.....	8
3.4. Radiação Térmica.....	10
3.5. História da Energia Solar.....	12

## CAPÍTULO III

4. CONCENTRADOR SOLAR DO TIPO FRESNEL.....	14
4.1. A Tecnologia.....	14
4.2. Espelhos e Corpo Estrutural.....	16
4.3. Tubo Absorvedor.....	17

## CAPÍTULO IV

5. PESQUISAS RECENTES SOBRE REFLETOR LINEAR FRESNEL.....	19
----------------------------------------------------------	----

## CAPÍTULO V

6. PRINCIPAIS FATORES SOLARES.....	22
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36

## CAPÍTULO VI

8. O COLETOR.....	37
8.1. Dimensionamento.....	38
8.1.1. Espaçamento entre os Espelhos.....	38

8.1.2. Localização dos Espelhos.....	39
8.1.3. Ângulo de Inclinação.....	39
8.1.4. Ângulo Efetivo de Inclinação dos espelhos.....	40
8.1.5. Energia que Alcança o Absorvedor.....	42
8.1.6. Perdas de Energia no Absorvedor.....	43
8.1.7. Balanço de Energia no Absorvedor.....	43
8.2. O Tubo Absorvedor.....	44
8.3. Sombreamento dos espelhos.....	45
8.4. Bloqueio da luz solar nos espelhos.....	47
8.5. Simulação de sombreamento e bloqueio com alterações nas configurações.....	50

## CAPÍTULO VII

9. MECÂNICA E CONSTRUÇÃO DO COLETOR.....	53
10. ELETRÔNICA.....	55
10.1. Ponte H.....	55
10.2. Funcionamento do coletor.....	59

## CAPÍTULO VIII

11. RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO.....	60
11.1. Simulações para outras localidades.....	68
12. CONCLUSÕES.....	84
13. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
REFERÊNCIAS.....	86
ANEXOS.....	90

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

Desde o início da vida humana no planeta Terra, o homem vem procurando por fontes de energia para prover suas necessidades. Várias foram descobertas e aproveitadas, desde o fogo até a energia nuclear, mas muitas das fontes de energia utilizadas são poluentes e afetam o meio ambiente liberando substâncias tóxicas como o CO<sub>2</sub> e enxofre, além de serem fontes não renováveis, ou seja, são fontes que, com o passar do tempo, perderão sua capacidade produtiva, forçando assim a procura de uma nova solução para o problema da geração de energia. Diante disso o homem passou então a pesquisar por fontes de energias que não provocassem danos ao meio ambiente e que ao mesmo tempo não houvesse a preocupação com o fim da capacidade produtiva dessa fonte, e descobriu que poderia utilizar fontes das quais ele não fazia ideia que produzissem energia, como a biomassa, a força das marés (energia marémotriz), o hidrogênio utilizado em células a combustível, e é claro, a energia solar que será o foco do presente trabalho, dentre outras. Podemos definir a energia solar como a capacidade de converter a luz solar em energia elétrica ou térmica por meio da utilização de painéis fotovoltaicos, de coletores solares e de concentradores solares. A energia solar se manifesta por meio de radiação, que tem como mecanismo físico as ondas eletromagnéticas. A partir do estudo do espectro eletromagnético da radiação solar, temos que a faixa onde encontramos energia para a conversão em elétrica ou térmica vai de 0,1µm a 100µm, o que compreende o final do espectro ultravioleta, todo o espectro visível e todo o espectro infravermelho (ÇENGEL, 2009).

Devido ao aumento populacional e a crescente industrialização, a demanda por energia aumentou vertiginosamente nas últimas décadas. Esse aumento na demanda foi outro motivo para que fossem buscadas novas formas de produção de energia para que não houvesse um colapso do sistema energético. O Brasil por exemplo teve um aumento do consumo de energia elétrica de 2,9% no ano de 2014, totalizando 531,1 TWh, em comparação com o ano de 2013 (BEN, 2015). Ainda segundo o BEN (2015), a maior parte da matriz energética brasileira provém de usinas hidrelétricas, que correspondem à 65,2% total de produção, como se pode ver na Figura 1. Apesar da geração hidrelétrica ser uma

fonte renovável, ela é dependente dos ciclos hidrológicos, ou seja, da água das chuvas. Por esse motivo e ao fato do país estar passando por um período de secas, o sistema de geração de energia elétrica vem passando por dificuldades de geração em algumas usinas, principalmente as localizadas no Nordeste. Alia-se ainda ao fator da seca, o fato do governo federal não tomar nenhuma providência a curto ou longo prazo para a solução definitiva desse problema. A solução paliativa que o governo encontra é o acionamento das centrais termoelétricas, que utilizam óleo combustível para gerar energia elétrica, sendo que o óleo tem um preço elevado, o que encarece a produção e reflete no preço final do kWh, que é repassado ao consumidor final.

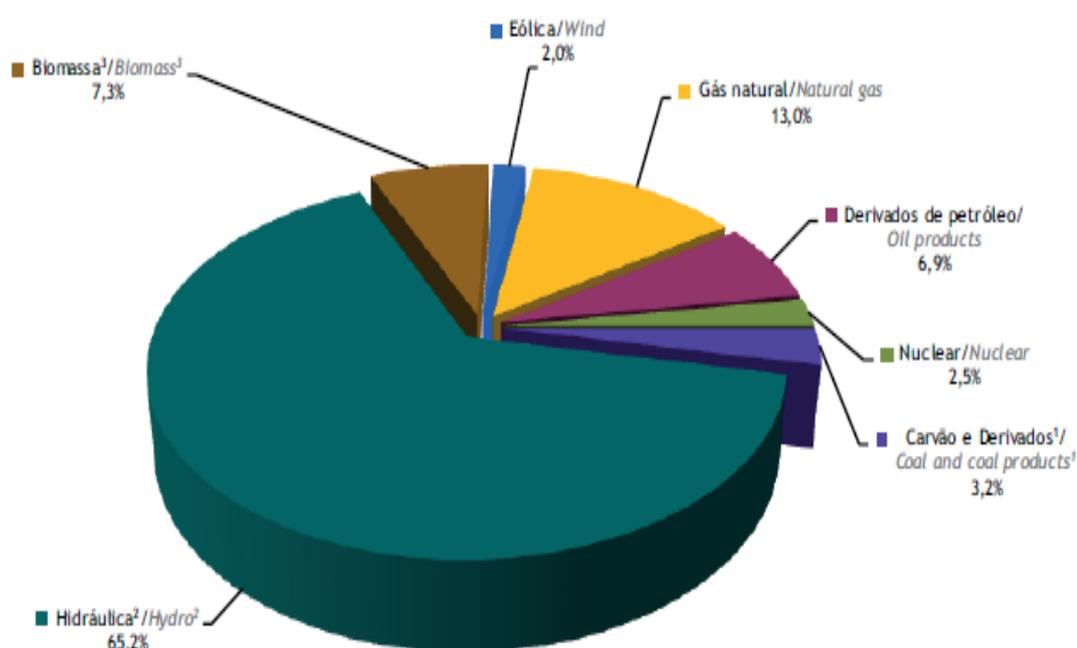


Figura 1. Gráfico da Oferta de Energia Elétrica por Fonte.

Fonte: BEN, 2015

Uma solução viável para o problema energético do país é o uso da energia solar, já que o Brasil se localiza em uma região do globo terrestre que possui uma boa incidência de radiação solar. Para se ter uma ideia, comparando o Brasil com a Alemanha, um dos países com maior utilização da energia solar como fonte de energia, a região com maior incidência solar da Alemanha é 40% menor que a região com menor incidência solar no Brasil (MANOEL, 2010), como mostrado na Figura 2.

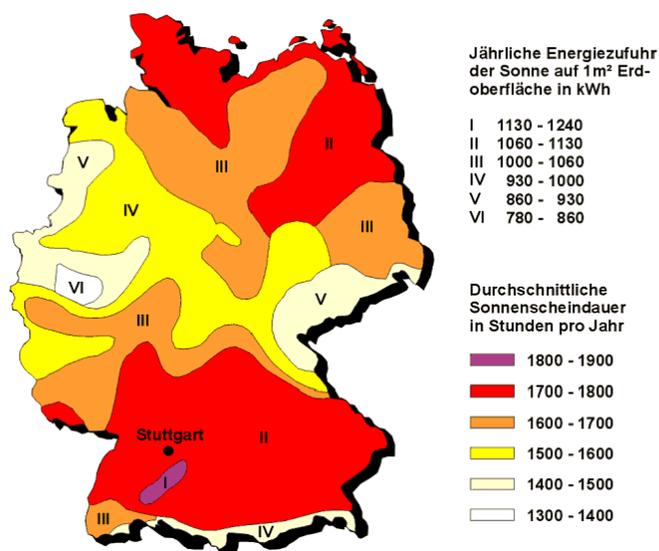


Figura 2. Radiação Solar Diária Média Anual para a Alemanha.

Fonte: Bayrisches Staatsministerium des Inneren (2010) *apud* Städtebauliche Klimafibel Online.

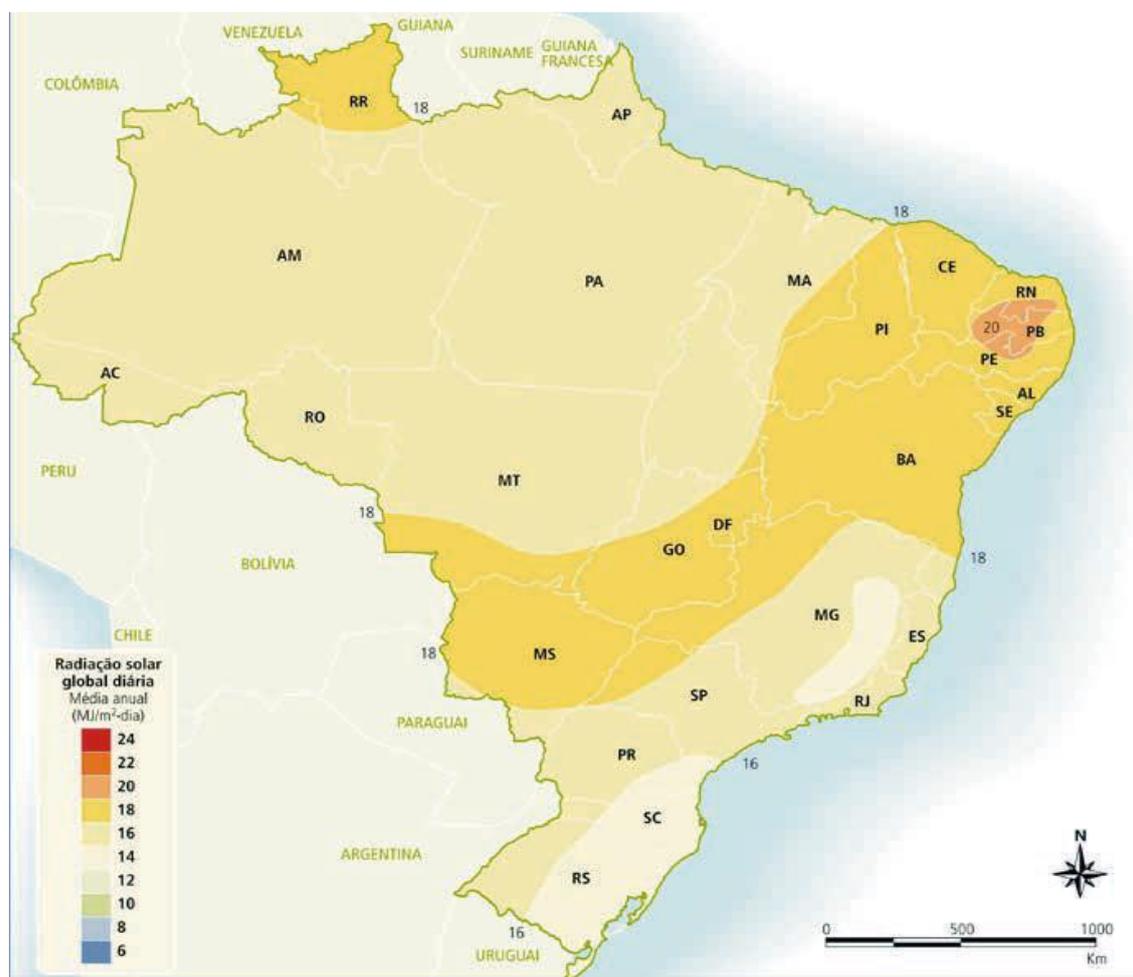


Figura 3. Radiação Solar Média Anual para o Brasil Wh/m<sup>2</sup>

Fonte: ATLAS de Irradiação Solar no Brasil (1998) *apud* ANEEL Energia Solar (20--).

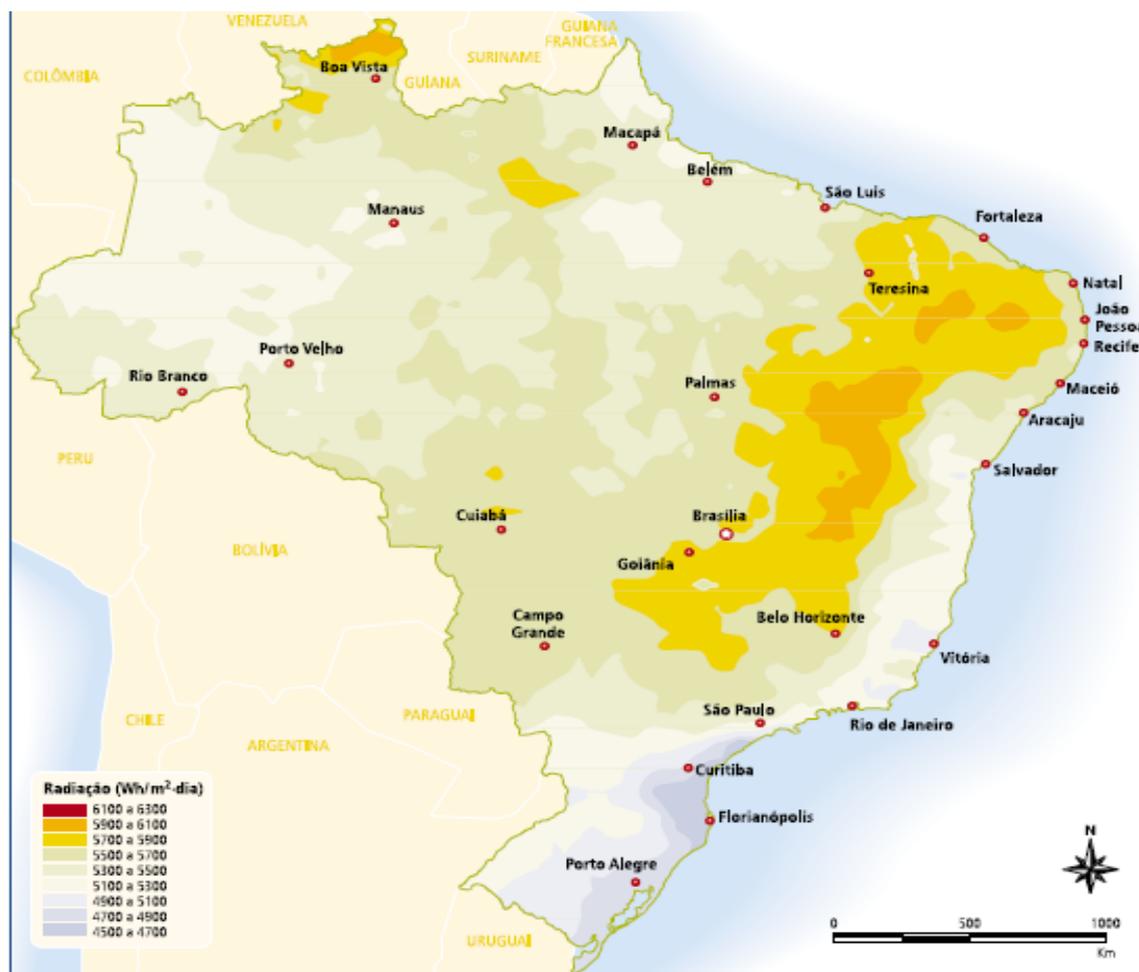


Figura 4. Radiação Solar Média para o Brasil Wh/m<sup>2</sup>

Fonte: ATLAS de Irradiação Solar no Brasil (1998) *apud* ANEEL Energia Solar (20--).

Como se pode ver na Figura 1, o aproveitamento da energia solar é tão baixo que nem aparece no gráfico, sendo que nas Figuras 3 e 4 se pode ver o quanto é bom o potencial para a utilização dessa fonte de energia.

Em suma, se pode dizer que a energia solar é hoje uma das fontes das quais o campo de desenvolvimento é dos mais abertos com o aprimoramento das tecnologias já existentes na área de captação de energia solar, além do fato do Sol ser uma fonte gratuita de energia.

## CAPÍTULO II

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo Geral

Simular um protótipo de concentrador do tipo linear Fresnel para captação de energia solar através de espelhos planos comuns e tubo absorvedor para transformação do fluido de trabalho em vapor, com inovação um absorvedor móvel de um grau de liberdade, com a finalidade de reduzir o sombreamento nos espelhos pelo absorvedor e com isso proporcionar um aumento da eficiência na captação da energia solar e transformação do fluido de trabalho em vapor.

#### 2.2. Objetivos Específicos

Realizar um estudo sobre o concentrador solar Fresnel, visando focar nas vantagens de sua utilização.

Mostrar a viabilidade da utilização de um coletor móvel no aumento da eficiência na captação de energia solar através de simulações.

Simular um coletor Fresnel com grandes proporções e que utilize um absorvedor móvel instalado em cidades com baixo a alto índice de radiação solar.

### 3. ENERGIA

#### 3.1. Conceito de Energia

A palavra energia tem sua origem em duas línguas; o grego (enérgea) e o latim (energia). Em ambas o significado era o mesmo: trabalho e era utilizado para explicar os fenômenos “vis viva” ou força viva, e o calórico. Foi apenas em 1807 que a palavra energia apareceu através do médico e físico inglês Thomas Young, devido ao fato dele acreditar que a energia era a capacidade de realização de algum trabalho mecânico (Wilson, 1968 *apud* Bucussi, 2007).

O termo “vis”, ou força, era usado até antes de 1800 de forma bem ampla, e abrangendo a força elétrica, força gravitacional e a força magnética, mas isso não significava dizer que essas forças estavam próximas umas das outras. Alguns cientistas estavam aprofundando seus estudos para que fossem identificadas relações tanto ao fenômeno do movimento quando ao fenômeno do calor. Alguns desses cientistas foram:

- Galileu Galilei (1564 – 1642): Galileu fez algumas considerações a respeito de regularidades observadas em alguns processos de transformação envolvendo força gravitacional, mais especificamente no estudo do funcionamento do bate-estacas. Ele também afirmava que o “ímpeto” presente nos corpos em movimento era conservado. Tudo isto está presente em sua obra *Diálogo Sobre Duas Novas Ciências*;
- Huygens (1629 – 1695) e Leibniz (1646 – 1716): ambos deram contribuições para o desenvolvimento da ideia de conservação do “vis viva” quando há a ocorrência de colisões;
- Lagrange (1736 – 1813): estabeleceu em 1788 o princípio da conservação da energia mecânica;
- Joseph Black (1728 – 1799), Rumford (1753 – 1814) e Carnot (1796 – 1832): contribuíram para o desenvolvimento da ideia de conservação dentro da própria Teoria do Calórico.

É no início do Século XIX que o termo energia passa a ser utilizado mais frequentemente se sobrepondo aos termos “vis viva” e calórico, mas apenas nos anos antes

de 1850 é que ocorre o aprofundamento sobre o conceito de energia, o qual vai provocar uma revolução no pensamento científico europeu, e de onde veio o Princípio da Conservação da Energia (Kuhn, 1977 *apud* Bucussi, 2007).

Temos também que, segundo o dicionário da Língua Portuguesa Aurélio, a energia é definida como:

*“Propriedade de um sistema que lhe permite realizar trabalho. A energia pode ter várias formas (calorífica, cinética, elétrica, eletromagnética, mecânica, potencial, química, radiante), transformáveis umas nas outras, e cada uma capaz de provocar fenômenos bem determinados e característicos nos sistemas físicos. Em todas as transformações de energia há completa conservação dela, i. e., a energia não pode ser criada, mas apenas transformada (primeiro princípio da termodinâmica). A massa de um corpo pode se transformar em energia e a energia sob forma radiante pode transformar-se em um corpúsculo com massa [símbo.:E].”*

### 3.2. O Sol

O sol é uma esfera intensamente quente de material gasoso com um diâmetro de  $1,30 \times 10^9$  m e a uma distância média de  $1,5 \times 10^{11}$  m da Terra. (DUFFIE, 2006). Ainda segundo Duffie (2006) o Sol tem uma temperatura de núcleo variando entre  $8 \times 10^6$  K e  $40 \times 10^6$  K e com uma densidade 100 vezes superior à da água, e o mesmo pode ser considerado como um corpo negro a 5800 K. O Sol trabalha como um imenso reator nuclear, fazendo basicamente a fusão do hidrogênio com hélio, e devido a essas inúmeras fusões é que ocorre a liberação de energia do interior para o espaço. O núcleo do Sol opera no espectro dos raios-X e raios gama, e o comprimento de onda dessas radiações vai aumentando à medida que se afastam do núcleo e a temperatura diminui.

O sol é dividido em camadas, mostradas na Figura 5, conhecidas como zona convectiva, fotosfera, camada de reversão, cromosfera e coroa. A zona convectiva é a mais interna das zonas citadas, e a temperatura nessa zona cai para cerca de 5000 K e a densidade para  $10^{-5}$  kg/m<sup>3</sup>. Após a zona convectiva existe a fotosfera, onde ocorre o fenômeno da granulação fotosférica, ou seja, a superfície da fotosfera apresenta grânulos com dimensões entre 1000 e 3000 km e duram apenas alguns minutos. As manchas solares também se apresentam na fotosfera. A fronteira da fotosfera é bem definida, embora possua uma densidade de  $10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> da densidade do ar ao nível do mar (Duffie, 2006), e ela é essencialmente opaca. Os gases que a formam são fortemente ionizados e

podem absorver e emitir radiação no espectro contínuo, fazendo assim com que a fotosfera seja a fonte da maior parte da radiação solar. Acima da fotosfera está a camada de reversão, onde os gases presentes nessa camada estão menos quentes e que tem centenas de quilômetros de extensão. Logo após a camada de reversão está a cromosfera, que possui 10.000 quilômetros de extensão e os gases estão com uma temperatura levemente acima dos gases encontrados na fotosfera, mas com uma densidade menor. É possível vê-la durante os eclipses solares. A coroa é a camada mais externa do Sol. Possui baixíssima densidade e alta temperatura, em torno dos 10<sup>6</sup> K e também está visível durante os eclipses solares totais.

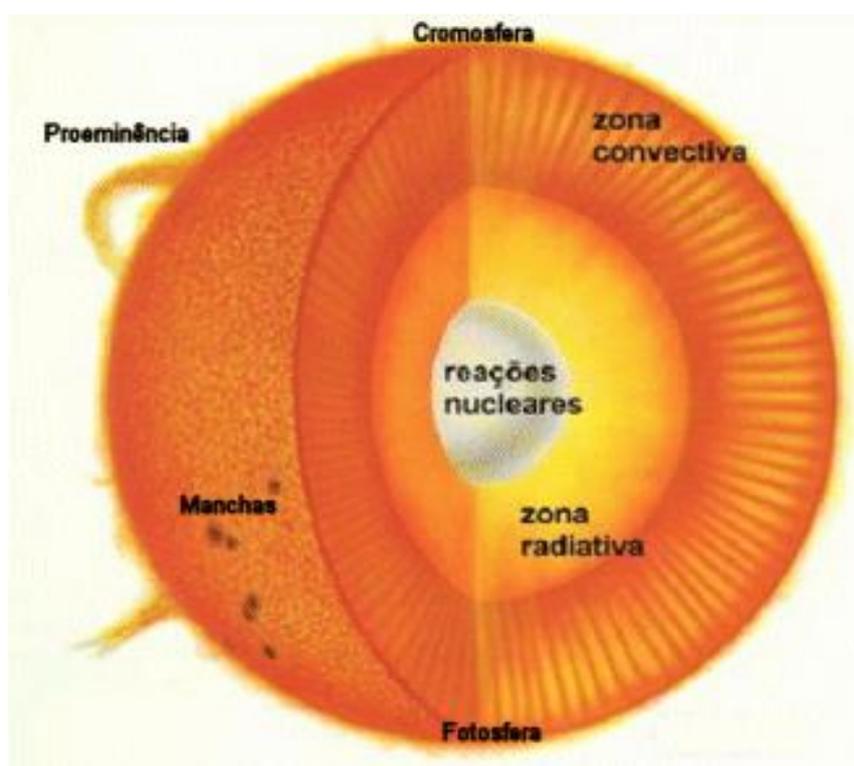


Figura 5. O Sol

Fonte: Estrutura do Sol – Ache Tudo e Região

### 3.3. Radiação

A radiação é o único fenômeno de transferência de calor que não precisa de um meio físico para que ocorra. A radiação se dá pela propagação de ondas

eletromagnéticas, as quais viajam na velocidade da luz e não sofrem atenuação no vácuo, e ela atua tanto em sólidos, como em líquidos e gases (ÇENGEL, 2009).

Outra característica da radiação é que ela não segue as características de transferência de calor como na condução e na convecção, onde o calor flui de um corpo com maior temperatura para um corpo com menor temperatura. A transferência de calor pela radiação pode ocorrer entre dois corpos que estejam em um meio com temperatura menor que ambos, como pode ser visto na Figura 6.

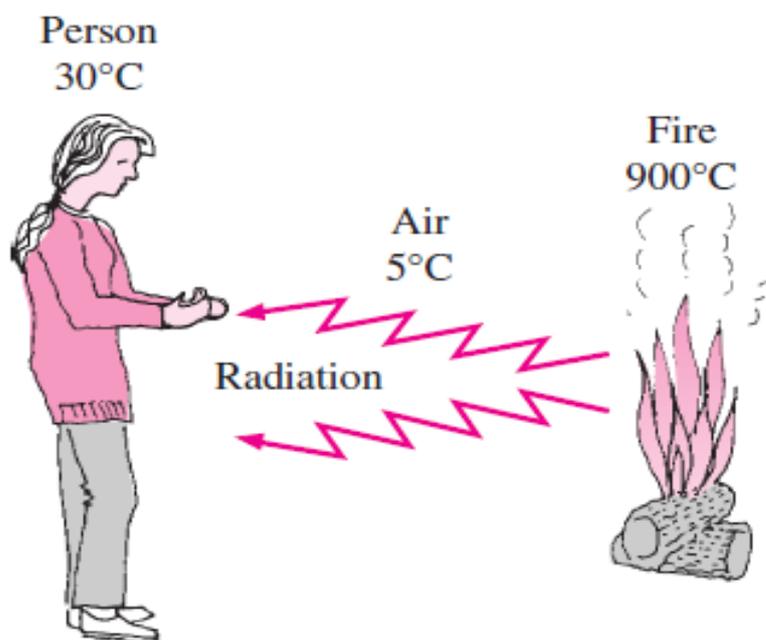


Figura 6. Transferência de calor por radiação entre dois corpos e um ambiente com menor temperatura  
Fonte: ÇENGEL (2009)

James Clerk Maxwell postulou em 1864 que cargas aceleradas ou variações de corrente dão origem à campos elétricos e campos magnéticos, e que quando ambos os campos estão em movimento rápido, eles passam a se chamar de ondas eletromagnéticas ou radiação eletromagnética. As ondas eletromagnéticas ou radiação eletromagnética representam a energia que é emitida por toda e qualquer matéria como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. Assim, estava criada a fundamentação teórica da radiação. Heinrich Hertz, em 1887, fez a demonstração experimental para a existência das ondas eletromagnéticas. Já Max Planck propôs em 1900 que a radiação eletromagnética se propagava por meio de pacotes de energia chamados de fótons ou quanta (ÇENGEL, 2009).

### 3.4. Radiação Térmica

A radiação possui uma ampla faixa de comprimentos de onda que variam de valores menores que  $10^{-10}$   $\mu\text{m}$  a valores maiores que  $10^{10}$   $\mu\text{m}$  como mostra a Figura 7. A essa faixa de comprimentos de onda damos o nome de espectro eletromagnético, o qual inclui, em ordem crescente de comprimento de onda, os raios cósmicos, raios gama ( $\gamma$ ), raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, micro-ondas e ondas de rádio (ÇENGEL, 2009).

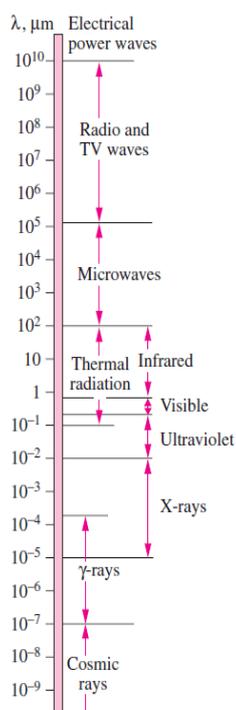


Figura 7. Espectro eletromagnético.

Fonte: ÇENGEL (2009)

A faixa do espectro eletromagnético que pode ser utilizada para a transferência de calor está no intervalo entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , o que pela Figura 7 acima nos mostra que compreende o final da radiação ultravioleta, toda a radiação visível, e toda a radiação infravermelha e é chamada de radiação térmica. Todos os corpos com temperatura acima de 0 K ( $-273,15$  °C) emitem radiação.

Na faixa entre 0,01  $\mu\text{m}$  e 0,40  $\mu\text{m}$  temos a radiação ultravioleta. Esse tipo de radiação deve ser evitado devido ao fato de seu pequeno comprimento de onda

que pode interagir com a estrutura atômica, que leva a destruição de microorganismos, e pode causar danos aos seres vivos, como queimaduras e câncer de pele nos seres humanos quando são expostos por um tempo prolongado a esse tipo de radiação. A radiação ultravioleta corresponde a 12% do espectro da radiação solar (ÇENGEL, 2009).

A partir de 0,40  $\mu\text{m}$  e até 0,76  $\mu\text{m}$  temos o espectro visível, ou simplesmente luz. A luz é responsável pela percepção do olho humano as cores, e o Sol é a principal fonte de luz do planeta, e a radiação solar compreende de 0,3  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$ , ou seja, quase 50% da radiação solar é basicamente luz. Na Tabela 1 estão apresentadas as cores e seus respectivos comprimentos de onda (ÇENGEL, 2009).

Tabela 1. Cores e seus comprimentos de onda

Cor	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
Violeta	0,40 – 0,44
Azul	0,44 – 0,49
Verde	0,49 – 0,54
Amarelo	0,54 – 0,60
Laranja	0,60 – 0,67
Vermelho	0,63 – 0,76

Fonte: ÇENGEL (2009)

Como já foi citado antes, todos os corpos emitem radiação. Os corpos a temperatura ambiente emitem essa radiação no espectro infravermelho, que compreende a faixa de 0,76  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . Para um corpo na temperatura ambiente começar a emitir radiação no espectro visível, esse corpo tem que ser aquecido a no mínimo 800 K (1073,15 °C). Dois exemplos clássicos desse fenômeno são o aço em temperatura maior que 1773,15 K (1500 °C) e o filamento de tungstênio de uma lâmpada, que precisa estar acima de 2000 K (1726,85 °C) para que possam emitir qualquer radiação no espectro visível (ÇENGEL, 2009).

### 3.5. História da Energia Solar

A história do uso do Sol como fonte de energia não é tão recente como se imagina. Já em 212 A.C. o grego Arquimedes utilizou de espelhos metálicos côncavos para queimar uma frota romana, e segundo o historiador grego Plutarch (46 – 120 D.C.), os romanos ao verem seus navios em chamas e o brilho do Sol refletido nos espelhos, pensaram estar lutando contra os deuses. Arquimedes teria escrito um livro chamado “Em Espelhos Ardentes”, mas não há nenhuma evidência de tal livro ou de que essa lenda seja real.

Inspirado na lenda citada acima, Athanasius Kircher (1601 – 1680) realizou alguns experimentos para comprovar a veracidade da lenda de Arquimedes. Athanasius tentou queimar a distância, usando a luz solar, uma pilha de madeira, mas também não há nenhum registro válido que comprove os experimentos de Athanasius.

As primeiras utilizações as quais realmente se tem registros datam do Século XVIII na Europa e no Oriente Médio, com o uso de coletores solares para suprir fornos solares para derretimento de ferro, cobre e outros materiais. Esses coletores eram fabricados com ferro polido, lentes de óculos e espelhos. O francês Antoine Lavoisier projetou um desses fornos utilizando uma lente primária de 1,32m de diâmetro e uma lente secundária de 0,2m de diâmetro. A temperatura atingida por esse forno foi de 1750°C, a qual levou cem anos para ser atingida novamente pelo homem.

Já no Século XIX inicia-se as tentativas de usar a energia solar para gerar vapor e assim acionar máquinas, sendo August Monchort o pioneiro nesse campo de estudos. Entre os anos de 1864 e 1878 ele construiu e operou várias máquinas a vapor gerado por energia solar. Mas o governo francês disse que uma das suas máquinas era muito cara e impossível de operar. Em 1875 Monchort projetou um coletor solar em forma de cone truncado constituído por placas de metal folheadas a prata com um diâmetro de 5,4m e ocupando uma área de 18,6m<sup>2</sup> e com partes móveis que pesavam 1400kg. Esse coletor foi considerado um grande avanço para a área.

Outro cientista da mesma época de Monchot, Abel Pifre projetou um coletor solar utilizando espelhos muito pequenos em forma de parábola, mas que lembrava o cone truncado de Monchot.

No início do Século XX, mais precisamente em 1901, A. G. Eneas instalou em uma fazenda na Califórnia um coletor solar no formato de um guarda-chuva invertido e era utilizado para mover um sistema de bomba d'água. Esse aparato tinha 10m de diâmetro e 1788 espelhos que refletiam a luz solar em um ponto focal de uma caldeira, gerando assim vapor para acionamento e operação do sistema de bombas.

Em 1904 o padre português Himalaya construiu um enorme forno solar que foi exibido na Feira Mundial de St. Louis nos Estados Unidos, o qual tinha uma estrutura bastante moderna, sendo enorme, sem eixos e em formato de cilindro parabólico.

Shuman e C. V. Boys projetaram em 1912 a maior usina de bombeamento em Meadi no Egito, mas o sistema só entrou em operação no ano de 1913, consistindo de vários coletores cilindro parabólico com um tubo absorvedor de 62m de comprimento cada e ocupando uma área 1200m<sup>2</sup>. Esse sistema produzia entre 37 e 45kW e funcionada diariamente por um período de 5h até ser desativado em 1915 devido a Primeira Guerra Mundial e a baixa no preço dos combustíveis.

Na metade da década de 1930 iniciou-se ideia de aquecer água e casas com o uso de energia solar, mas essa ideia só veio mesmo à tona na última metade da década de 1940, sendo até essa data utilizado carvão para o aquecimento da água e das casas.

Apenas no começo da década de 1960 é que se começou a fabricação de aquecedores de água solares, tecnologia que alcançou muitos países muito rápido, utilizando um coletor plano com uma superfície absorvedora com área entre 3 e 4m<sup>2</sup> e um tanque de armazenagem com capacidade entre 150 e 180l, além do tanque de armazenagem de água fria, tudo isso montado num mesmo aparelho.

## CAPÍTULO III

### 4. CONCENTRADOR SOLAR DO TIPO FRESNEL

#### 4.1. A Tecnologia

O refletor linear Fresnel (LFR, Linear Fresnel Reflector) é um concentrador que utiliza espelhos planos e um tubo absorvedor para a captação de energia solar. Seu funcionamento é semelhante ao do concentrador de cilindro parabólico, mas com a vantagem de utilizar espelhos de produção em massa e ter uma estrutura mais próxima do solo, o que faz com que os custos de produção sejam menores, além de ter uma melhor resistência as intemperes do clima. A Figura 8 mostra um esquema de um refletor linear Fresnel

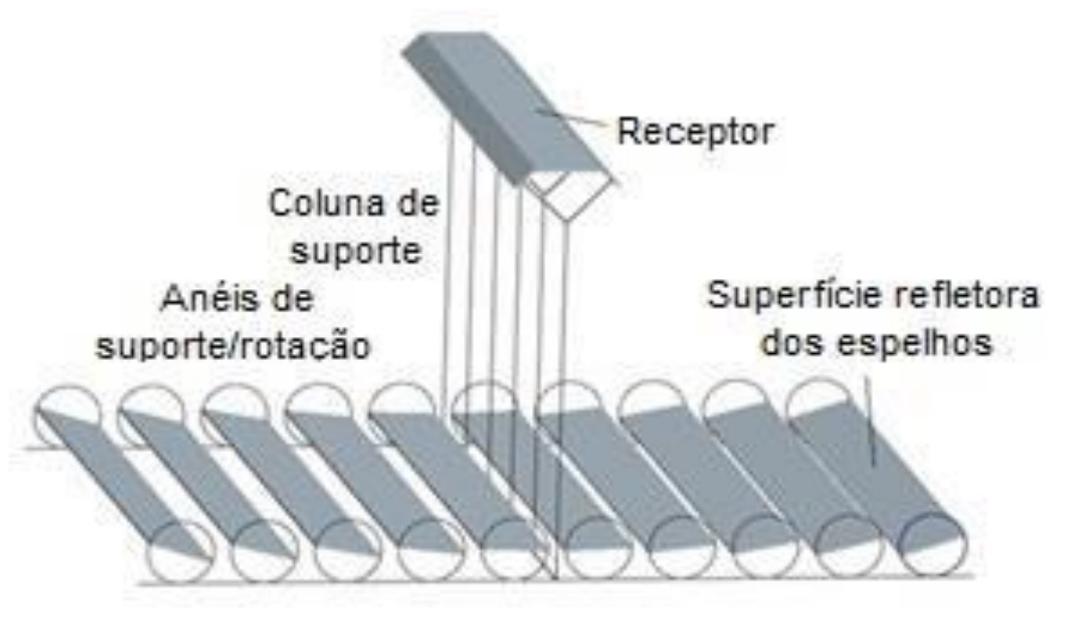


Figura 8. Esquema de um refletor linear Fresnel.

Fonte: [www.areva.com](http://www.areva.com) *apud* Bianchini (2013)

Giorgio Francia foi o pioneiro em aplicar o princípio de Fresnel. Em 1968, em Genova, na Itália, ele desenvolveu o sistema linear de rastreamento solar de dois eixos. (Kalogirou, 2009 *apud* Bianchini, 2013).

Ambos sistemas mostraram que podia ser alcançada uma elevada temperatura, mas possivelmente por falta de uma superfície seletiva e de ótica secundária, foi trabalhado mais nessa época o sistema de dois eixos. (KALOGIROU, 2004).

A FMC Corporation no ano de 1979 produziu um estudo detalhado para a construção de usinas com geração entre 10 e 100 MW<sub>e</sub> utilizando refletores linear Fresnel para o Departamento de Energia dos Estados Unidos. A planta teria 1,68km e os absorvedores estariam a uma altura de 61m. O projeto nunca foi posto em prática. Nos anos 90, Feuermman e Gordon a pedido da empresa israelense Paz, produziram um refletor linear Fresnel com rastreamento em um eixo, utilizando uma ótica secundária e um tubo absorvedor com superfície seletiva. (KALOGIROU, 2004).

Um dos maiores desafios de se trabalhar com um refletor linear Fresnel é o sombreamento e o bloqueio dos espelhos, seja pelos próprios espelhos ou pelo tudo absorvedor. Esse efeito faz com que a eficiência da planta caia devido à baixa refletividade dos raios solares. Uma solução é aumentar o espaçamento entre os espelhos, conseqüentemente aumentando o tamanho da planta, e aumentar a altura da torre onde o tubo absorvedor se encontra, mas isso gera um aumento dos custos. (BIANCHINI, 2013).

A Universidade de Sidney na Austrália, visando reduzir ou até mesmo eliminar esse revés do refletor linear Fresnel, desenvolveu uma tecnologia chamada de refletor linear Fresnel compacto (CLFR, Compact Linear Fresnel Reflector), com esquema demonstrado na Figura 9, consistindo em uma configuração onde utiliza de dois tubos absorvedores posicionados em paralelo um com o outro, e os espelhos estão colocados

em uma posição alternada entre um e outro, sendo possível que os espelhos reflitam para ambos os tubos alternadamente, diminuindo assim o tamanho da planta e o custo de montagem e operação.

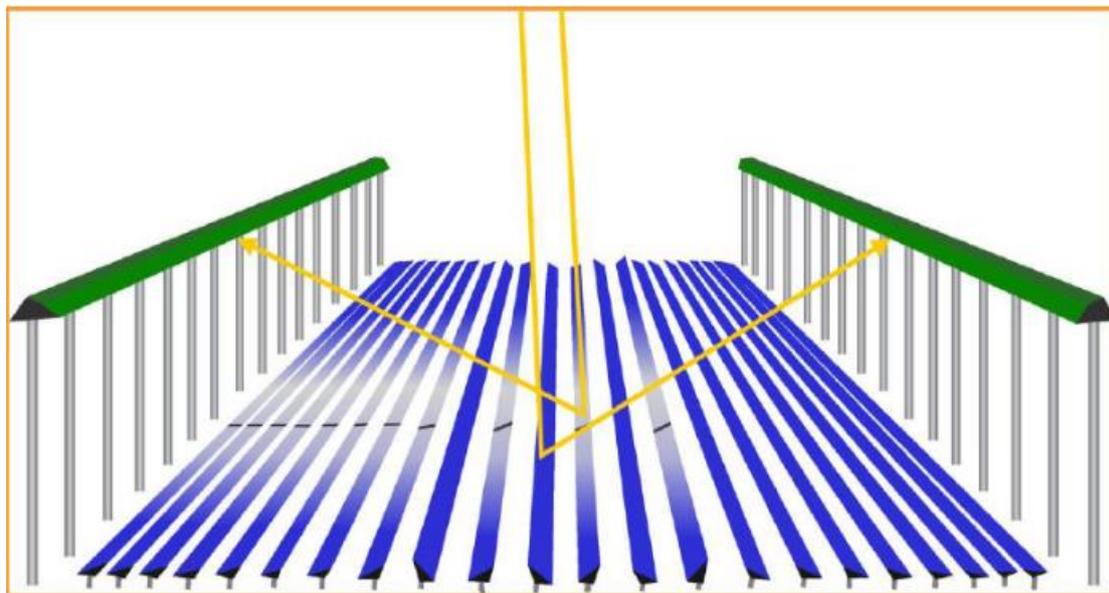


Figura 9. Esquema de um refletor linear Fresnel compacto.

Fonte: [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov) apud Bianchini, 2013

#### 4.2. Espelhos e Corpo Estrutural

Como mencionando anteriormente, os espelhos utilizados no refletor linear Fresnel são espelhos de produção em massa, o que os torna baratos, de fácil fabricação e com espessura variando entre 1 e 2 mm, o que minimiza os custos se comparado aos espelhos do cilindro parabólico, os quais devem ser espelhos curvados com alta precisão para evitar perdas térmicas. Segundo Miller e Lumby (2012) *apud* Bianchini (2013), os espelhos do refletor linear Fresnel têm um custo em torno de US\$9,80/m<sup>2</sup>, correspondendo a aproximadamente um terço do espelho utilizado no cilindro parabólico, mas com maiores perdas óticas devido a menor faixa de ângulos de incidência favoráveis.

### 4.3. Tubo Absorvedor

De acordo com Bianchini (2013), o refletor linear Fresnel dentre todas as tecnologias existentes em plantas solares térmicas, é a que trabalha na menor faixa de temperatura, além de usar vapor d'água como fluido de trabalho.

O tubo absorvedor é feito em aço e coberto com uma superfície seletiva, ou seja, uma superfície cujo material possui uma alta absorvidade e uma baixa emissividade. O tubo está contido por um receptáculo e o receptáculo é constituído por um vidro transparente na parte inferior para que os raios solares possam atravessar e chegar até o tubo absorvedor, e por um metal com um isolante térmico voltado para o tubo absorvedor. Podem existir espelhos secundários dentro do receptáculo para refletir os raios solares que não chegam diretamente ao tubo absorvedor. A Figura 10 demonstra como os raios solares alcançam o tubo absorvedor.

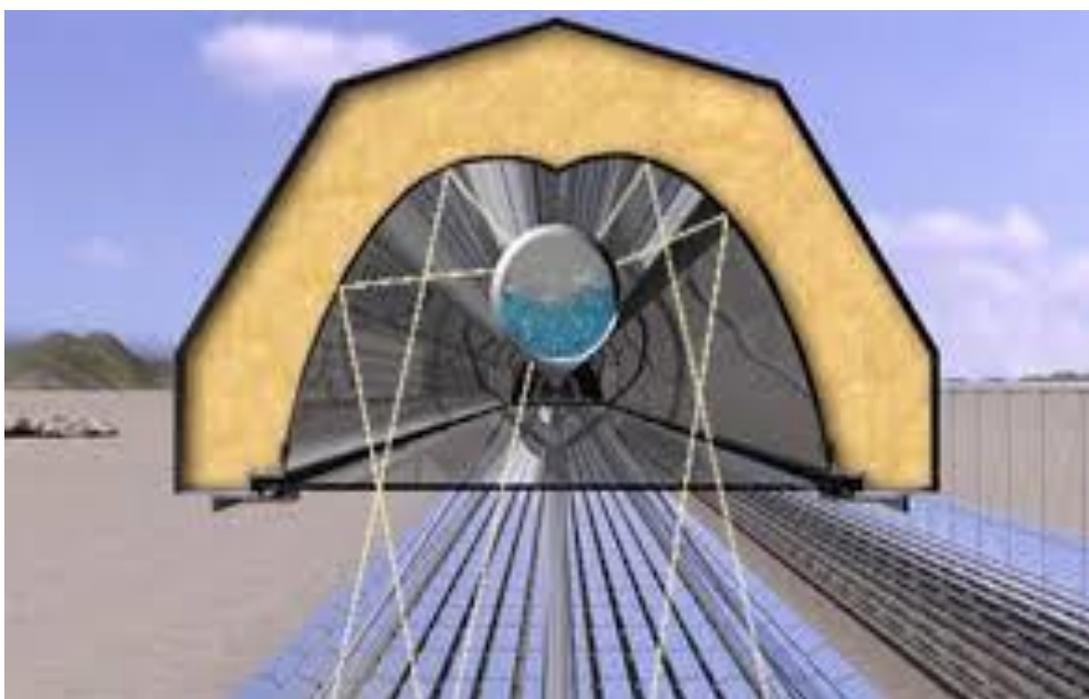


Figura 10. Esquema de tubo absorvedor e receptáculo.

Fonte: CSP Science

Segundo Miller e Lamby (2012) *apud* Bianchini (2013), a vaporização da água acontece no interior do tubo absorvedor e então esse vapor segue direto para onde se

deseja que seja útil, como na produção de energia elétrica, aumento do vapor ou processos industriais.

Bianchini (2013) diz que a instalação de um campo solar de refletor linear Fresnel possui maior simplicidade em comparação ao de um campo de cilindro parabólico por causa da estrutura mais leve, da simplicidade do receptor (tubo absorvedor + receptáculo), e pela ausência de fluídos de trabalhos com sejam agressivos ao meio ambiente, além de que o desing modular do refletor, das unidades receptoras e dos componentes pré-fabricados fazem com que a necessidade de mão de obra qualificada seja reduzida.

## CAPÍTULO IV

### 5. PESQUISAS RECENTES SOBRE REFLETOR LINEAR FRESNEL

- 2009: CHEMISANA *et al.* fizeram uma comparação entre um sistema estacionário fotovoltaico e um sistema integrado fotovoltaico/concentrador Fresnel e mostrou que em climas favoráveis, a radiação recebida em um sistema integrado é 50% maior do que em um sistema estacionário.
- 2011: VALMIKI *et al.* construíram um protótipo de forno solar utilizando lentes Fresnel para a concentração da luz solar em um ponto focal. Essa tecnologia mostrou-se segura e eficiente, e com um baixo custo de construção e operação. O protótipo utiliza um sistema de rastreamento que permite utilizar os ângulos de zênite e azimute ao mesmo tempo.
- 2012: LARSEN *et al.* realizou em estudo em laboratório sobre as perdas de calor de um protótipo coletor Fresnel utilizando cinco tubos absorvedores e um receptáculo com cavidade trapezoidal, e fez simulações térmicas utilizando o regime permanente com o software EnergyPlus.
- 2012: HE *et al.* fez um estudo utilizando o rastreamento dos raios solares e uma análise geométrica para desenvolver um novo método para ser utilizado nos espelhos do coletor linear Fresnel variando a largura dos espelhos e a altura do tubo absorvedor, além de calcular a eficiência do sistema a cada 5° de inclinação dos espelhos, a partir de 30° até 150° de inclinação.
- 2013: MUÑOZ-ANTÓN *et al.* propuseram o uso de um refletor linear Fresnel que utiliza vários tubos absorvedores com um sistema ótico que permita adequar o mapeamento do fluxo térmico no receptor, pelo uso de um sistema de pré-aquecimento do fluido de trabalho.
- 2013: SHARMA usou expressões analíticas para encontrar áreas de abertura entre o sombreamento o bloqueio dos espelhos para o período de cada hora do dia e de cada mês utilizando diferentes orientações do campo e diferentes valores de espaçamento entre os espelhos.

- 2013: LIN *et al.* estudaram a teoria e a prática de um refletor linear Fresnel com uma cavidade em forma de V. Em uma simulação CFD mostrou que a temperatura chegaria a faixa de 90° a 150°C e resultados experimentais mostraram que as perdas térmicas ficam na faixa de 6,25 a 7,52W/m<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 12% na comparação dos resultados obtidos nas simulações. Ainda em comparação com a simulação, a eficiência caiu de 45% para 37% quando a temperatura média da superfície subiu de 90°C para 150°C.
- 2013: SEN *et al.* projetou e desenvolveu um concentrador solar espelho linear Fresnel que utiliza longas tiras de espelhos finos. O sistema possui um sistema de rastreamento inovador, onde os espelhos são montados em tubos fixados em uma base, e podem ser rotacionados para alinhar as tiras de espelhos com o tubo absorvedor.
- 2013: GOUTHAMRAJ *et al.* desenvolveu um coletor linear Fresnel para instalação em telhados de residências para ser utilizado no aquecimento de água.
- 2013: HAAGEN realizou um estudo sobre o potencial de geração de calor utilizando coletores linear Fresnel para as regiões do Norte da África e para o Oriente Médio.
- 2014: MONTES *et al.* estudou o problema da caracterização do campo de espelhos tomando como referência o arquivo de horas de um dia de um determinado ano, usando como critério de comparação a eficiência do uso de energia.
- 2014: Cau e Cocco compararam usinas de médio porte baseadas em Ciclo Rankine Orgânico utilizando concentradores cilindro parabólico e refletor solar Fresnel, mostrando como resultado que o refletor linear Fresnel gera maiores valores para a geração de energia elétrica por unidade de área.
- 2014: Zhu e Huang propuseram o uso de refletor linear Fresnel semi-parabólico, que em uma simulação do rastreamento solar, mostrou que a eficiência do Fresnel semi-parabólico é a mesma que um cilindro parabólico, devido ao fato de não existir sombreamento e bloqueio dos espelhos no refletor linear Fresnel semi-parabólico.
- 2014: ZHU *et al.* fez um estudo sobre a história, o estado atual e o futuro dos coletores linear Fresnel, utilizando como base vários conceitos de projetos.

- 2014: ZHENG *et al.* desenvolveram um concentrador Fresnel em formato cilíndrico utilizando lentes de Fresnel e espelhos de Fresnel, com um absorvedor evacuado. O experimento mostrou que 90% da luz solar incidente foi absorvida e que o erro de rastreamento solar foi de 1,5°.
- 2014: Reddy e Kumar realizaram um estudo sobre as perdas convectivas e radiativas em um coletor Fresnel que utiliza um absorvedor instalado em um receptáculo com cavidade trapezoidal invertida.
- 2014: HEFNI utilizou o software ThermoSysPro, que provém em sua biblioteca vários modelos para simulações de usinas elétricas e outros tipos de sistemas de energia. Hefni simulou usinas elétricas utilizando coletores de cilindro parabólico e também um ciclo combinado de um sistema híbrido de energia solar com um campo de que coletores Fresnel.
- 2014: LIN *et al.* realizou um estudo experimental utilizando lentes de Fresnel e um tubo absorvedor em uma cavidade triangular para determinar as eficiências ótica e térmica.
- 2014: CANAVARRO *et al.* realizou um estudo experimental sobre um novo modelo de coletor Fresnel que utiliza múltiplas superfícies simultâneas e duas superfícies reflexivas, além de um tubo absorvedor em uma cavidade tubular. Além disso, houve a comparação desse novo sistema com um coletor Fresnel convencional e um coletor do tipo cilindro parabólico.
- 2015: SAIT *et al.* realizou um estudo comparando um concentrador Fresnel e um concentrador do tipo cilindro parabólico em termos de custos e otimização da performance para o uso em plantas de usinas térmicas.

## CAPÍTULO V

### 6. PRINCIPAIS FATORES SOLARES

Para saber qual a orientação que os espelhos terão e a quantidade de energia que chegará ao refletor linear Fresnel é necessário a realização de alguns cálculos solares. Os fatores dependem em sua maioria da posição geográfica do local (latitude ( $\Phi$ ) e longitude), do dia e da hora do ano. Com relação a latitude e a longitude, seus valores podem ser positivos ou negativos, dependendo em que posição se encontram com relação a Linha do Equador e ao Meridiano de Greenwich respectivamente. Para localidades a leste do Meridiano de Greenwich se tem que os valores para a longitude são positivos, enquanto que a oeste são negativos. Já para o valor da latitude, se a localidade estiver acima da Linha do Equador, ou seja, no hemisfério Norte, seus valores são positivos, e se estiver abaixo, no hemisfério Sul, seus valores são negativos.

- **Declinação Solar ( $\delta$ )**

É definida como sendo o ângulo formado pela reta que une os centros do Sol e da Terra, com a projeção da mesma no plano do equador, e tem como intervalo  $-23,5^\circ \leq \delta \leq 23,5^\circ$ , sendo a responsável pela maior ou menor exposição dos hemisférios ao Sol. Tem como equação a Equação de Cooper (1969) *apud* Duffie (2013);

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[ 360 \times \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

onde “n” é o número do dia considerado, contado a partir do dia 1º de janeiro. Na Figura 11 se pode ver a variação anual da declinação solar.

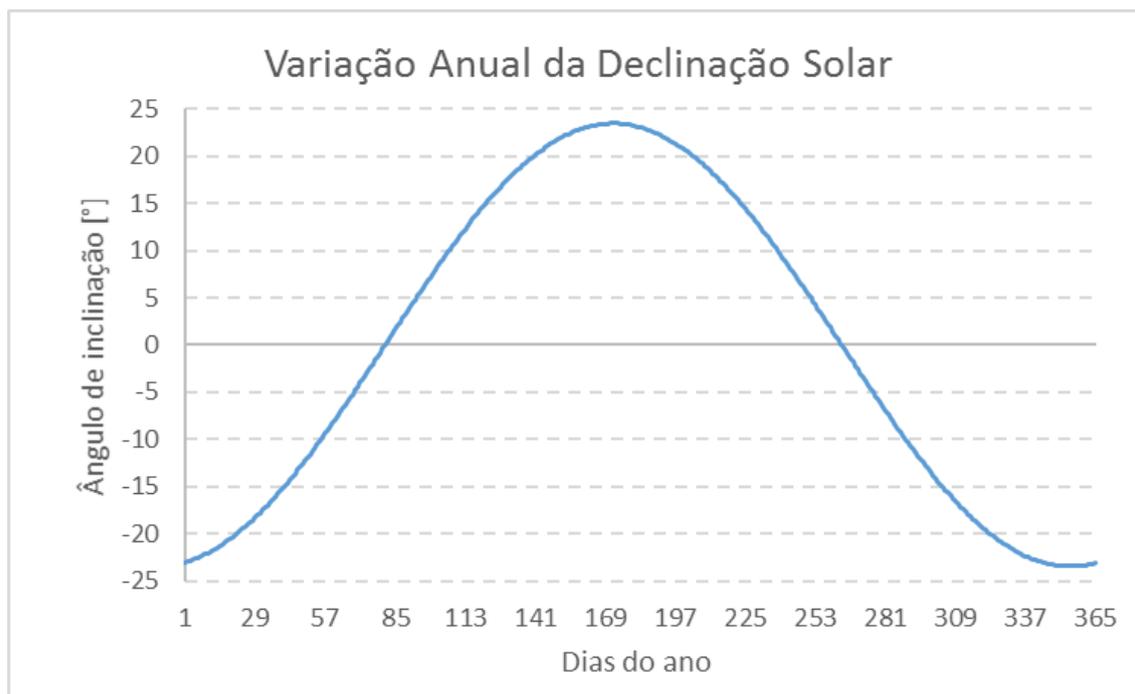


Figura 11. Variação anual da declinação solar com norte positivo.

Na figura acima os pontos de máximo e mínimo correspondem aos solstícios de verão e de inverno. Para o hemisfério Sul temos que os solstícios de inverno e de verão tem suas datas nos dias 21 de junho e 21 de dezembro respectivamente. Os pontos nulos correspondem aos equinócios, sendo que para o hemisfério Sul as datas dos equinócios de outono e de primavera são, respectivamente, 21 de março e 23 de setembro (KLÜPELL, 1985). A Figura 12 mostra a posição da Terra nos solstícios e equinócios.

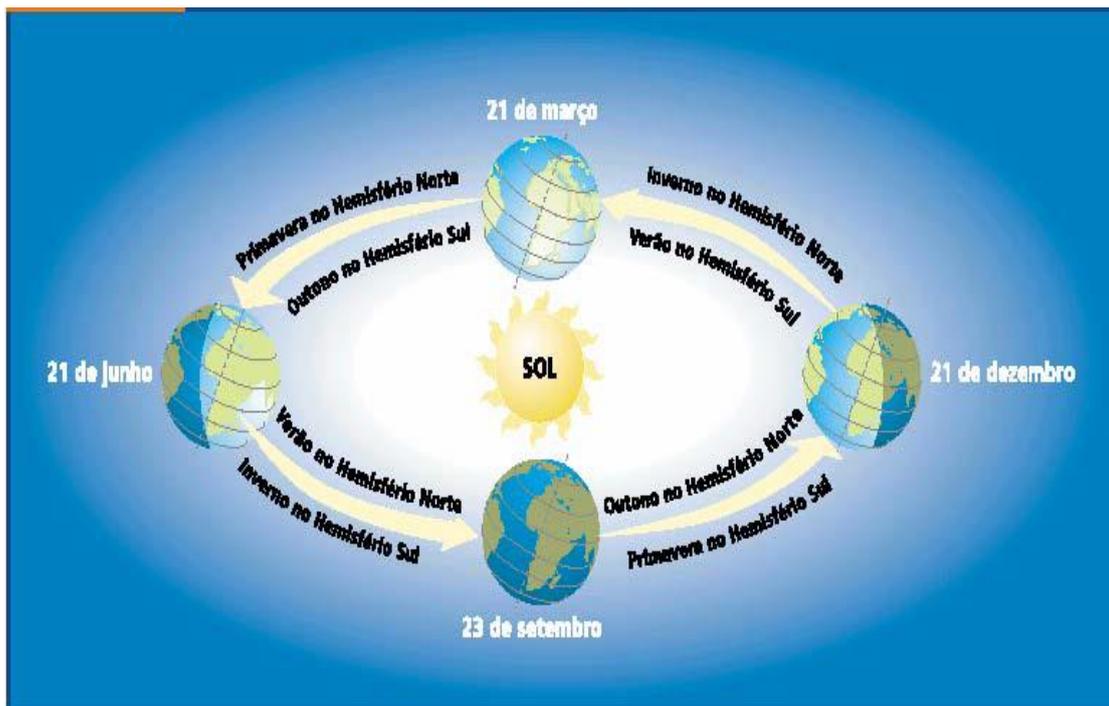


Figura 12. Posição da Terra nos solstícios e equinócios  
 Fonte: ANEEL, 2006 apud Carvalho, 20--.

- **Hora Solar (HS)**

Para um melhor entendimento do que é a hora solar, é preciso primeiramente conhecer algumas definições.

- Tempo solar verdadeiro: Klüppel (1985), define o tempo solar verdadeiro como sendo o tempo baseado no movimento aparente do Sol através do céu e tendo como a zero hora solar o exato momento em que o Sol atravessa o meridiano local.

- Tempo solar médio: Ainda segundo Klüppel (1985), o tempo solar médio é obtido quando se divide o ano em 365,2422 dias com exatamente 24 horas de duração cada dia. O globo terrestre foi dividido assim em 24 zonas conhecidas como fusos horários, tendo uma diferença de  $15^\circ$  de longitude entre cada fuso. Dessa forma, a diferença de tempo entre cada fuso horário contíguo é de 1 hora. O Meridiano de Greenwich (longitude  $0^\circ$ ) é o ponto de referência para a contagem dos fusos horários, sendo positivos a leste e negativos a oeste. A Figura 13 mostra as divisões dos fusos horários no planeta.

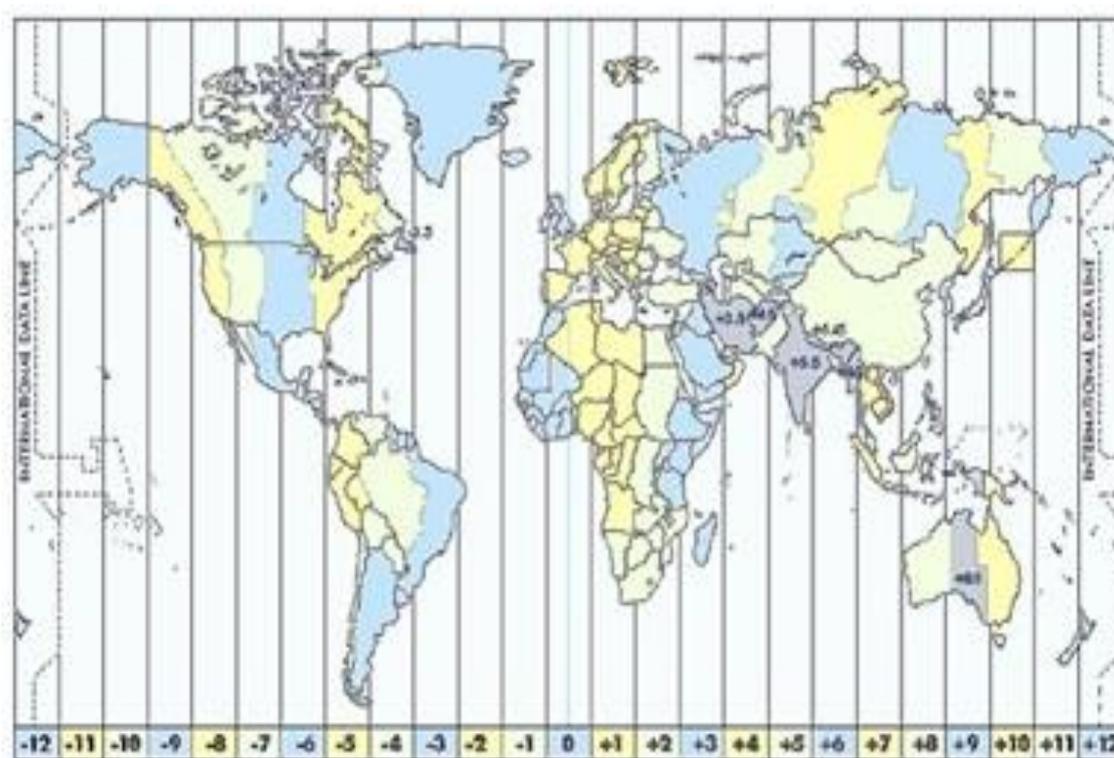


Figura 13. Mapa dos fusos horários.

Fonte: Esquadrão do conhecimento

- Tempo civil: Klüppel (1985) diz que o tempo civil é o tempo solar médio correspondente ao meridiano central do fuso horário considerado acrescido de 12 horas. O tempo universal ou G.M.T. (Greenwich Mean Time) é a hora legal ou tempo civil de Greenwich. A partir dele se tem a contagem dos fusos como foi citado anteriormente. É também a partir do G.M.T., a  $180^\circ$  de longitude, no meio do Oceano Pacífico, que está localizada a Linha Internacional da Data. Atravessando essa linha

imaginária, dependendo do sentido em que se atrevesse, se pode adiantar ou atrasar a data. Por exemplo, a ilha Grande Diomedes é o ponto mais a leste da Rússia, enquanto que a ilha Pequena Diomedes é o ponto mais a oeste dos Estados Unidos, sendo separadas por apenas quatro quilômetros de distância. Mas exatamente entre as duas ilhas passa a Linha Internacional da Data, ou seja, se na Grande Diomedes for dia 1º de janeiro, na Pequena Diomedes ainda será 31 de dezembro. As Figuras 14 e 15 mostram as ilhas e a diferença de fuso horário.



Figura 14. Ilhas Diomedes

Fonte: Das Culturas.



Figura 15. Linha internacional da data.

Fonte: Das Culturas.

- Tempo legal ou hora legal: seguindo o que fala Klüppel (1985), a hora legal é o tempo definido por cada nação sobre seu território, coincidindo com os fusos horários. Mas devido a grandes extensões territoriais de algumas nações, essas podem possuir mais de um fuso horário, como é o caso do Brasil, dos Estados Unidos, Canadá e Rússia por exemplo. Para se ter uma ideia, a Rússia possui 9 fusos horários, enquanto o Brasil possui 3 fusos horários. Assim, a hora solar é dada pela equação:

$$HS = HoraLegal + \frac{(L_p - L_l)}{15} + \frac{E}{60} - 12 \quad (2)$$

onde a Hora Legal é a hora definida por cada país, geralmente calculado a partir da hora do Meridiano de Greenwich (GMT 0h),  $L_p$  é a longitude do meridiano padrão para a hora legal que para o Brasil é o meridiano  $-45^\circ$  referente a cidade de Brasília – DF,  $L_l$  é a longitude local e  $E$  é a equação do tempo. A hora legal é negativa antes do meio dia e positiva após o meio dia. A equação do tempo é

$$E = 9,87\text{sen}2B - 7,53\text{cos} B - 1,5\text{sen}B \quad (3)$$

Onde:

$$B = \frac{360 \times (n - 81)}{364} \quad (4)$$

e “n” é o número do dia considerado, contado a partir do dia 1º de janeiro. A equação do tempo representa a variação do dia solar verdadeiro, que é o espaço de tempo que separa duas passagens consecutivas do Sol sobre um mesmo meridiano (KLÜPPEL, 1985).

- **Ângulo Horário ( $\omega$ )**

Duffie (2013) define o ângulo horário como sendo o deslocamento angular do Sol para Leste ou para Oeste do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra à 15° por hora, tendo valor negativo antes do meio dia solar, e positivo após o meio dia solar.

Klüppel (1985) complementa a definição de ângulo horário dizendo que é o ângulo formado pela projeção no plano do equador da linha centro a centro com a projeção do meridiano local, ou seja, é a hora solar expressa em deslocamento angular. É dado pela equação:

$$\omega = 15(HL - 12) + L_p - L_l + \frac{E}{4} \quad (5)$$

onde HL é a hora legal,  $L_p$  a longitude do meridiano padrão para a hora legal,  $L_l$  o meridiano local e E é a equação do tempo.

- **Ângulo de Zênite ( $\theta_z$ )**

Segundo Duffie (2013) o ângulo de zênite, visto na Figura 16, é o ângulo formado entre a normal a superfície horizontal e a linha até o centro do Sol, sendo também o ângulo de incidência de radiação sobre uma superfície horizontal. A equação que rege o ângulo de zênite é a seguinte:  $\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$ , onde  $\phi$  é a latitude do meridiano local,  $\delta$  é a declinação solar e  $\omega$  é o ângulo horário.

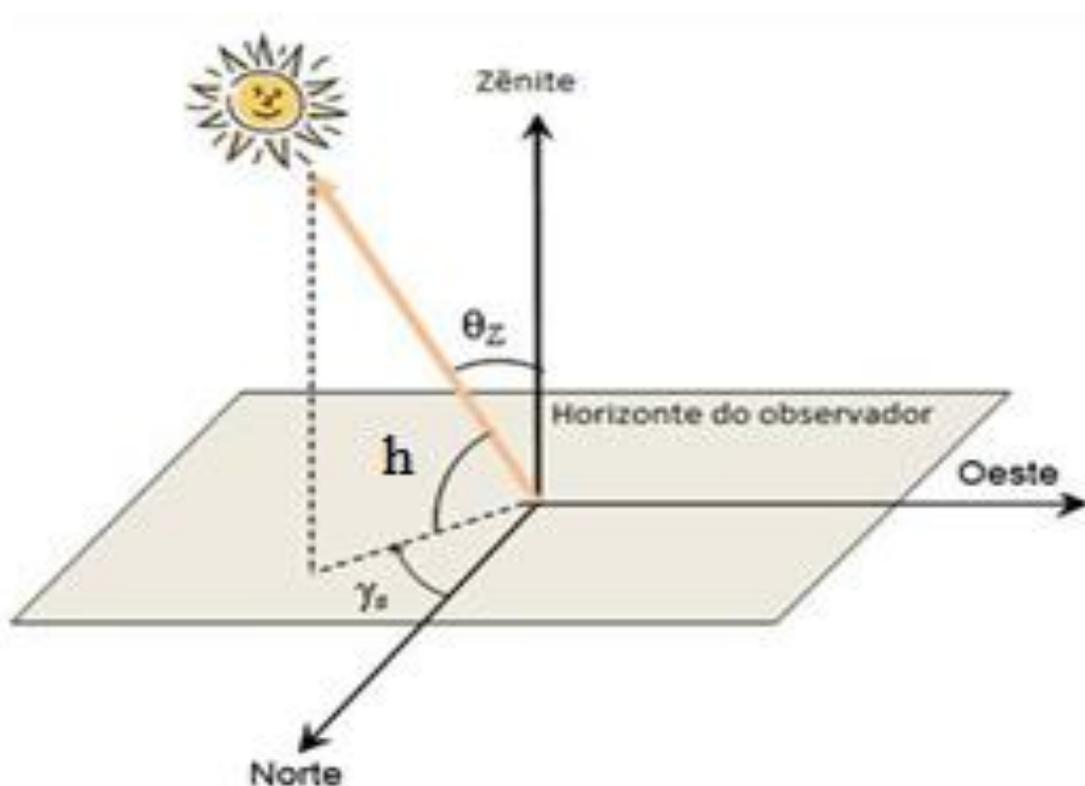


Figura 16. Ângulo de zênite.

Fonte: GALDINO (2014)

- **Azimute Solar ( $\gamma$ )**

Klüppel (1985) e Duffie (2013) definem o azimute solar como sendo o deslocamento a partir do Sul da projeção da direção da radiação numa superfície horizontal, sendo  $0^\circ$  para o Sul,  $180^\circ$  para o Norte, negativo no Leste e positivo no Oeste.

Klüppel (1985) utiliza para o cálculo da posição solar utilizamos as equações:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (6)$$

onde “h” é altura do sol, ou seja, o ângulo formado pela direção da radiação solar com sua projeção no plano horizontal,

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\omega)\cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (7)$$

e

$$\cos(\gamma) = \frac{\cos(\delta)\cos(\omega) - \cos(\phi)\text{sen}(h)}{\text{sen}(\phi)\cos(h)} \quad (8)$$

A partir do cálculo do arcsen ( $\gamma$ ), encontraremos valor de  $\gamma$ , onde  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ . Para saber-se o verdadeiro valor de  $\gamma$ , calcula-se o valor de  $\cos(\gamma)$ , sabendo-se que  $\cos(\gamma) > 0$ , então  $\gamma < 90^\circ$ , e se  $\cos(\gamma) < 0$ , temos que  $\gamma > 90^\circ$ .

Já Duffie (2013) utiliza a equação

$$\gamma = \sin al(\omega) \left| \arccos \left( \frac{\cos \theta_z \text{sen} \phi - \text{sen} \delta}{\text{sen} \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (9)$$

que depende apenas de  $\omega$  ter valor positivo ou negativo, do ângulo de zênite, da latitude e da declinação solar, e onde  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

- **Azimute de Superfície ( $\gamma_s$ )**

Tendo-se uma superfície inclinada qualquer, é o ângulo formado com o meridiano a projeção no plano horizontal da normal a superfície, variando também entre  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ . Duffie (2013) mostra equações específicas para vários casos de superfícies que rastreiam o Sol.

Para o caso deste trabalho, o caso segundo Duffie (2013) que mais se adequa para o cálculo do azimute de superfície, é o de um plano de rotação sobre o eixo Norte-Sul tparalelo ao eixo da Terra com ajuste contínuo do ângulo de incidência  $\theta$ . Logo temos que:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (10)$$

Sharma (2014) diz que as equações de inclinação e de azimute de superfície para cara fileira de espelhos são as seguintes:

$$\beta = \left| \frac{\psi + \chi_i}{2} \right| \quad (11)$$

$$\gamma_{si} = \begin{cases} 90^\circ + \alpha & \text{se } \psi + \chi_i > 0^\circ \\ 270^\circ + \alpha & \text{se } \psi + \chi_i < 0^\circ \end{cases} \quad (12)$$

O termo  $\psi$  segundo Sharma (2014) “é o ângulo formado pelo plano transversal (plano perpendicular ao eixo do coletor) entre a vertical e a projeção dos raios solares no plano transversal”, e sua equação é:

$$\psi = \left| \arctan \left[ \tan \theta_z * \text{sen}(\gamma - \alpha) \right] \right| \quad (13)$$

Já o termo  $\chi_i$ , ainda segundo Sharma (2014), “é o ângulo formado pelo plano transversal (plano perpendicular ao eixo do coletor) entre a vertical e a projeção do raio refletido pela  $i$ -ésima fileira de espelhos no plano transversal”, sendo calculado pela equação:

$$\chi_i = \arctan \left[ \left( \frac{n_f}{2} - 1 + \frac{1}{2} \right) * \frac{P/W}{H/W} \right] \quad (14)$$

- **Insolação Teórica Máxima (N)**

A quantidade de horas de Sol aberto em um dia é chamada de insolação. Ela depende da latitude do local, da nebulosidade e da época do ano. Em regiões de nebulosidade nula a insolação é igual ao número de horas de brilho solar que é a duração do dia claro. (KLÜPPEL, 1985). A equação é a seguinte:

$$N = \frac{2 \arccos(-\operatorname{tg}(\delta)\operatorname{tg}(\phi))}{15} \quad (15)$$

onde  $\delta$  é a declinação solar e  $\phi$  é a latitude do local a ser estudado.

- **Ângulo de Incidência de Radiação Solar ( $\theta$ )**

É o ângulo que os raios solares formam com a normal à superfície. (KLÜPPEL, 1985). As equações utilizadas são

$$\cos(a_r) = \cos(\gamma)\cos(\gamma_s) + \operatorname{sen}(\gamma)\operatorname{sen}(\gamma_s) \quad (16)$$

e

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \operatorname{sen}(\delta)\operatorname{sen}(\phi)\cos(\beta) + \operatorname{sen}(\delta)\operatorname{sen}(\beta)\cos(\phi) \\ & + \cos(\delta)\cos(\omega)\operatorname{sen}(\phi)\operatorname{sen}(\beta) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)\cos(\beta) \end{aligned} \quad (17)$$

- **Potência Solar**

A potência solar nos diz a quantidade de energia que chega até o coletor. Utilizando a constante solar em que  $G_s = 1371 \text{ W/m}^2$ , e é dada pela equação

$$I = G_s \times \cos \theta \quad (18)$$

- **Radiação Extraterrestre ( $G_o$ )**

Levando-se em conta apenas o movimento orbital da Terra, temos que:

$$G_o = G_s \times \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \times \cos \theta_z \quad (19)$$

$$G_o = G_s \times \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \times (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \omega) \quad (20)$$

Onde  $G_s$  é a constante solar, e possui um valor de  $1371 \text{ W/m}^2$  e  $\cos \theta_z$  é o ângulo de zênite.

- **Radiação Solar Diária ( $H_o$ )**

É o quanto em média o planeta recebe de radiação em determinado local.

A equação que rege o cálculo é:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times G_s}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta \text{sen} \omega_s + \frac{\pi \times \omega_s}{180} \text{sen} \phi \text{sen} \delta\right) \quad (21)$$

- **Estimativa da Medida de Radiação Solar ( $\bar{H}$ )**

Algumas vezes não é possível saber os dados para a radiação global do local de instalação do coletor. Mas sabendo-se o total de horas de sol medido por um heliógrafo, é possível estimar a radiação solar do local. A equação é a seguinte:

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = a + b \frac{\bar{n}}{N} \quad (22)$$

$$\bar{H} = \bar{H}_o \times \left(a + b \frac{\bar{n}}{N}\right) \quad (23)$$

onde  $a$  e  $b$  são parâmetros que dependem da localidade e  $\bar{n}$  é a média de dias de sol.

No ANEXO I se pode encontrar um gráfico com a variação anual da estimativa da medida de radiação solar, assim como os valores de  $a$  e  $b$ .

- **Índice de Claridade ( $K_T$ )**

O índice  $K_T$  é a razão entre radiação global no solo e a radiação global extraterrestre, e pode variar entre 0,2 e 0,8. É dada pela equação:

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (24)$$

Segundo Duffie e Backman (2006), os valores de  $K_T$  nos dizem que:

Céu nublado:  $K_T < 0,35$

Parcialmente nublado:  $0,35 \leq K_T \leq 0,75$

Céu limpo:  $K_T > 0,75$

- **Energia Difusa ( $H_d$ )**

Utilizando a correlação de Collares-Pereira e Rabl mostrada abaixo, se pode calcular o valor da energia difusa a partir do índice de claridade.

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 & \text{se } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_t + 9,473K_t^2 - 21,865K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{se } 0,17 < K_t < 0,75 \\ -0,54K_t + 0,632 & \text{se } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{se } K_t \geq 0,80 \end{cases}$$

- **Irradiação Solar Difusa Instantânea ( $I_d$ )**

É a quantidade de energia difusa que atinge uma superfície horizontal e é dada pela relação de Liu e Jordan (DUFFIE, 2013).

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24 \times 3600} \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \left( \left( \frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \times \cos \omega_s \right)} \right] \quad (25)$$

- **Radiação Solar Global Instantânea ( $I_g$ )**

É dada pela seguinte equação:

$$\frac{I_g}{H} = \frac{\pi}{24 \times 3600} \left[ (a + b \cos \omega) \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \left( \left( \frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \times \cos \omega_s \right)} \right] \right] \quad (26)$$

Onde os fatores a e b são:

$$a = 0,409 + (0,5016 \text{sen}(\omega_s - 60)) \quad (27)$$

$$b = 0,6609 - (0,4767 \text{sen}(\omega_s - 60)) \quad (28)$$

- **Radiação Solar Direta Instantânea ( $I_{dir}$ )**

A radiação solar global instantânea apresenta a seguinte relação;

$$I_g = I_{dir} + I_d \quad (29)$$

onde a partir dela se pode calcular a radiação solar direta instantânea ( $I_{dir}$ ), que é a radiação total que chega até a superfície.

## 7. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no protótipo serão os seguintes:

- Seis motores de 96 RPM que serão responsáveis por girar os espelhos no rastreamento do Sol e para o acionamento da movimentação do coletor móvel;
- Cinco pares de espelhos de 885 x 120 mm;
- Chapas e cantoneiras em alumínio para montagem da estrutura do refletor linear Fresnel;
- Eixos de aço carbono para fixação e conexão dos espelhos e do absorvedor;
- Placas para montagem de circuitos elétricos e lógicos;
- Capacitores;
- Lâmpadas de LED;
- Fios elétricos;
- Terminais de pólo positivo, negativo e terra;
- Eixos de aço para montagem dos espelhos na estrutura;
- Tubo de cobre;
- Material isolante térmico;
- Fita dupla face;
- Computadores;
- Caixas de comando e controle;
- Software LabVIEW®.

Os espelhos estão fixados por meio de fitas dupla face sobre estruturas de alumínio que estão fixadas sobre eixos de aço por meio de parafusos, e os eixos também estão conectados a motores elétricos de 96 rpm por meio de parafuso, tendo sua rotação controlada e monitorada por encoders rotativos localizados no lado oposto aos motores.

O tubo absorvedor é feito em cobre e foi pintado de preto, com duas aletas também em cobre soldadas ao longo do tubo de modo a ficar uma oposta a outra e também pintadas de preto. O tubo absorvedor está fixado por meio de parafusos à um receptáculo em forma de trapézio feito com duas chapas de alumínio, e existe um isolamento térmico entre as duas chapas para minimizar perdas térmicas. Esse receptáculo está fixado por meio de parafusos a um tubo de seção quadrada feito em alumínio, com roldanas em suas

extremidades, as quais estão apoiadas sobre eixos de aço e um parafuso sem fim conectado a um dos motores, para que o tubo absorvedor possa se movimentar.

Uma estrutura de alumínio suporta toda a aparelhagem descrita acima, exceto pelos computadores e caixa de controle. O refletor linear Fresnel, quando posto em operação, será montado com uma orientação N-S, rastreando o Sol no sentido L-O, o que é, segundo a literatura, a orientação que tem um melhor aproveitamento dos raios solares. O software LabVIEW<sup>®</sup> é responsável pela simulação e o monitoramento, e também pela execução dos comandos de rastreamento do Sol. Os raios solares serão refletidos pelos espelhos para o tubo absorvedor que será montado acima dos espelhos, e a mobilidade em um grau de liberdade do receptor é uma inovação para tentar evitar o sombreamento dos espelhos pelo próprio receptor e assim melhorar a eficiência do sistema.

## CAPÍTULO VI

### 8. O COLETOR

#### 8.1. Dimensionamento

O dimensionamento é uma das fases críticas do projeto, devido ao fato de que todos os cálculos para construção são oriundos desta etapa.

No presente trabalho tomamos como base um artigo de Singh *et al.* (2010) e um artigo de Sen *et al.* (2013) para cálculo do espaçamento entre espelhos, a localização dos espelhos com relação ao absorvedor, o ângulo de inclinação dos espelhos e a energia absorvida pelo absorvedor. Singh *et al.* (2010) provém algumas condições iniciais para que se faça um cálculo iterativo do dimensionamento. Ele diz que  $\theta_0 = 0$ ,  $S_1 = 0$ ,  $Q_0 = -W/2$  e  $Q_1 = W/2$  e  $n = 1, 2, 3, \dots, m$ , onde  $m$  é o número total de espelhos em cada metade do coletor. As variáveis de espaçamento, localização e ângulo de inclinação podem ser vistas na Figura 23.

##### 8.1.1. Espaçamento entre os Espelhos

O cálculo do espaçamento entre espelhos é um dos itens mais importantes no dimensionamento, devido ao fato de que ele pode provocar sombreamento ou até mesmo bloquear a luz solar entre espelhos adjacentes. No caso de que haja um sombreamento ou um bloqueio da luz solar, a energia que chegará ao absorvedor será menor, e conseqüentemente haverá uma diminuição da eficiência do coletor.

A equação que Singh *et al.* (2010) utiliza para o cálculo do espaçamento entre espelhos é a seguinte:

$$S_n = W * \text{sen} \theta_{n-1} * \tan(2\theta_n + \xi_0) \quad (30)$$

Onde  $W$  é a largura de um espelho,  $\theta_n$  é o ângulo de inclinação do espelho e  $\xi_0$  é o meio ângulo de subtenção solar e tem um valor de  $16^\circ$ .

### 8.1.2. Localização dos Espelhos

A localização dos espelhos é um parâmetro importante para o cálculo do ângulo de inclinação dos espelhos. A referência da localização é o centro do absorvedor, e a partir daí se a distância que cada espelho possui da sua posição até o centro do absorvedor. Singh *et al.* (2010) utiliza a seguinte equação:

$$Q_n = Q_{n-1} + W * \cos \theta_{n-1} + S_n \quad (31)$$

Onde  $W$  é a largura do espelho e  $S_n$  é o espaçamento entre espelhos.

### 8.1.3. Ângulo de Inclinação

O ângulo de inclinação diz o quanto o espelho deve estar inclinado para que a maior parte da luz solar que incide no espelho alcance o absorvedor. A equação do ângulo de inclinação segundo Singh *et al.* (2010) é:

$$\theta_n = \frac{1}{2} * \arctan \left[ \frac{\left\{ Q_n + \left( \frac{W}{2} \right) * \cos \theta_{n-1} \right\}}{\left\{ f - \left( \frac{W}{2} \right) * \sin \theta_{n-1} \right\}} \right] \quad (32)$$

onde  $W$  é a largura do espelho,  $Q_n$  é a localização do espelho e  $f$  é a altura do absorvedor. Este item será usado apenas para o dimensionamento.

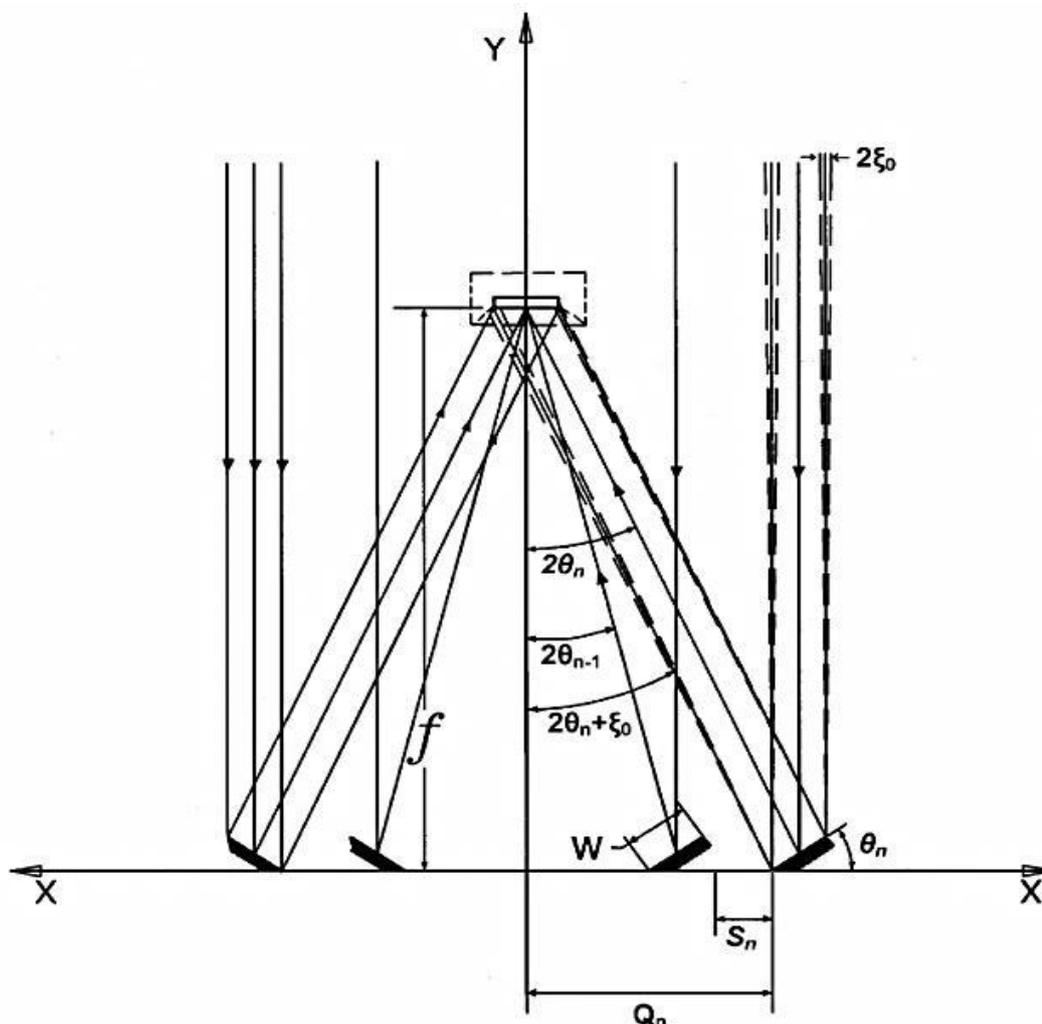


Figura 17. Parâmetros de dimensionamento.

Fonte: SINGH *et al.* (2010)

#### 8.1.4. Ângulo Efetivo de Inclinação dos Espelhos

Os ângulos de inclinação dos espelhos, vistos na Figura 18 e na Figura 19, devem ser ajustados constantemente de acordo com o movimento do Sol e do movimento do absorvedor durante as horas de operação do coletor. Por esse motivo a equação que pode ser utilizada e torna o cálculo mais fácil sem depender de um ângulo de espelhos inicial e nem do ângulo de espelhos adjacentes é a seguinte:

$$\Phi_i = \frac{\alpha_T - \beta_i}{2} \quad (33)$$

$$\alpha_T = \arctan \frac{\tan(h)}{\text{sen}(\gamma)} \quad (34)$$

$$\beta_i = \arctan \frac{H}{d_i} \quad (35)$$

Como se pode ver na equação (36), a dependência da distância dos espelhos com relação ao absorvedor torna a equação (34) a mais adequada para a correção constante da inclinação dos espelhos.

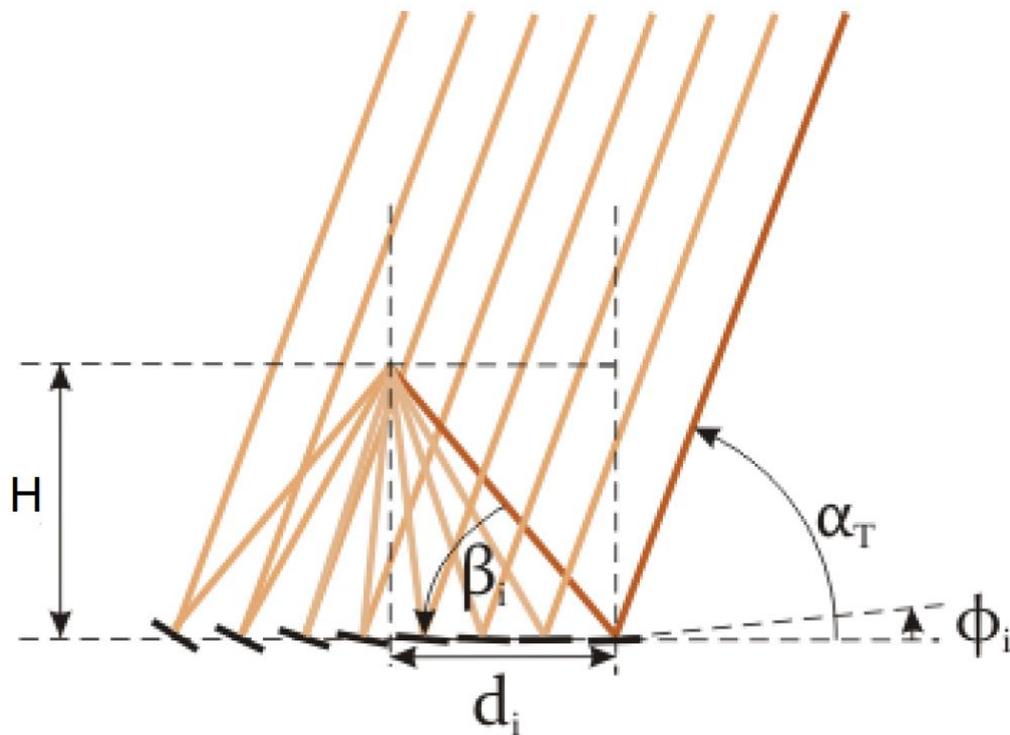


Figura 18. Ângulo de inclinação dos espelhos.  
Fonte: GÜNTHER (20--).

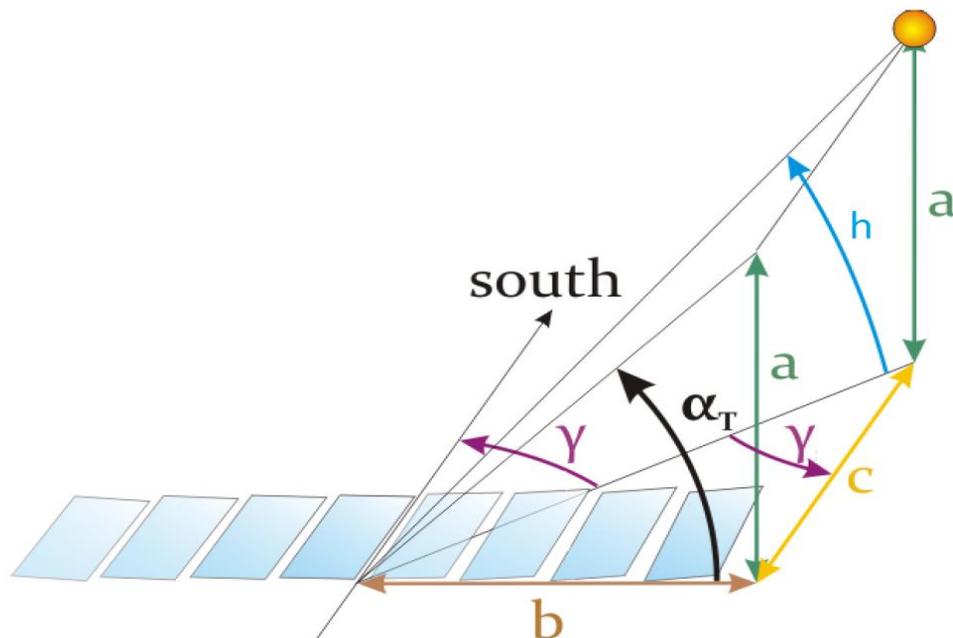


Figura 19. Ângulo transversal da altitude solar  $\alpha_T$ .

Fonte: GÜNTHER (20--).

### 8.1.5. Energia que Alcança o Absorvedor

Para que o fluído de trabalho alcance uma determinada temperatura é necessário que uma certa quantidade de energia alcance o absorvedor. Segundo Sen *et al.* (2013), a equação que fornece essa quantidade de energia é a seguinte:

$$Q_a = I_{dir} * A_m * \eta_0 * \alpha_{abs} \quad (36)$$

$$A_m = N_E * a_m \quad (37)$$

Onde  $Q_a$  é a quantidade de energia térmica que alcança o absorvedor,  $I_{dir}$  é a quantidade total de radiação,  $A_m$  é a área total dos espelhos,  $N_E$  é o número de espelhos,  $a_m$  é a área de um espelho,  $\eta_0$  é a fração solar no espelho e  $\alpha_{abs}$  é a absorvidade do material do tubo absorvedor.

### 8.1.6. Perdas de Energia no Absorvedor

As perdas de energia no absorvedor se darão por meios convectivos e radiativos. Duffie (2013) diz que para um absorvedor cilíndrico, as perdas são dadas pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_p = \pi DL * (h_w (T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_s - T_{c\acute{e}u})) \quad (38)$$

Onde  $h_w$  é o coeficiente de convecção devido aos ventos, calculado a partir do número de Nussel, o qual tem as seguintes condições:

$$Nu = \begin{cases} 0,40 + 0,54 * Re^{0,52} & se \ 0,1 < Re < 1000 \\ 0,30 * Re^{0,6} & se \ 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (39)$$

Assim:

$$h_w = \frac{Nu * D}{k} \quad (40)$$

L representa o comprimento do tubo absorvedor e D é o diâmetro da seção transversal do tubo. O fator k é o coeficiente de condutividade térmica do ar e Re é o número de Reynolds.

### 8.1.7. Balanço de Energia no Absorvedor

O balanço de energia realizado no absorvedor é de suma importância na determinação da temperatura de saída da água. Como o absorvedor não está isolado do ambiente, os efeitos de radiação e convecção devem ser considerados, principalmente pelo efeito do ar para o cálculo de perdas de energia.

Considerando o escoamento permanente tem-se que  $\dot{m}_e = \dot{m}_s$ , onde:

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad (41)$$

Çengel (2009) diz que quando as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis e que também não há trabalho envolvido no escoamento, o balanço de energia se resume a seguinte equação:

$$\dot{Q}_a = \dot{m} * c_p * (T_s - T_e) \quad (42)$$

A taxa líquida de calor  $\dot{Q}_a$  tem como unidade o Watt [W].

## 8.2. O Tubo Absorvedor

O projeto conta com a inovação, até agora única no mundo, da utilização de um tubo absorvedor móvel com 1 (um) grau de liberdade. A movimentação do tubo absorvedor irá acompanhar a movimentação do Sol, assim como os espelhos farão.

O intuito dessa inovação é fazer com que os espelhos não sofram sombreamento ou bloqueio da luz solar pelo próprio tubo absorvedor, promovendo assim um ganho de eficiência.

O tamanho da projeção da sombra pode ser encontrado calculando-se a altura solar dada pela equação (6).

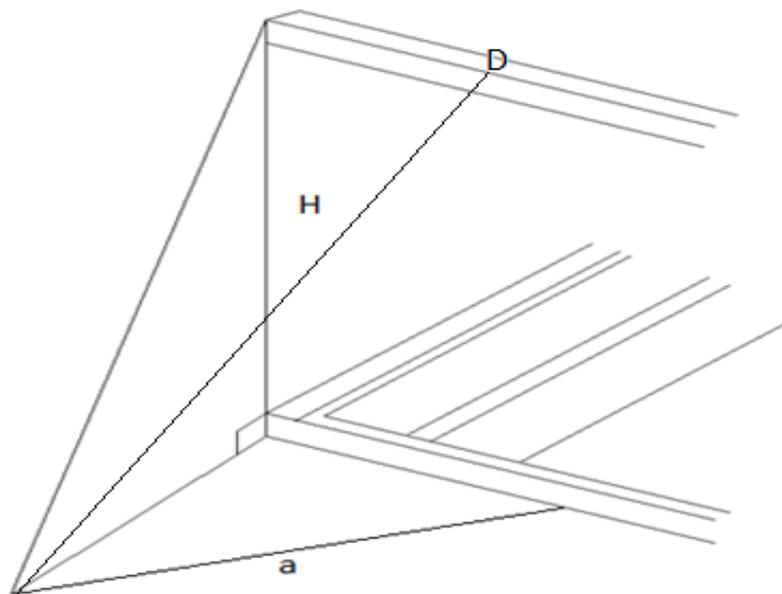


Figura 20. Tamanho da sombra.

Para se calcular o ponto onde o absorvedor deve ser posicionado para evitar o sombreamento dos espelhos, precisamos calcular os seguintes parâmetros:

O cálculo do parâmetro  $a$  se dá pela equação:

$$a = \frac{H}{\tan(h)} \quad (43)$$

Após calculado o valor de  $a$ , se pode obter o valor de  $D$  da seguinte forma:

$$D = \cos(\gamma) * a \quad (44)$$

$D$  é a distância de onde o absorvedor deve se encontrar, com relação ao ponto de origem, para que ele não cause sombreamento nos espelhos, como mostrado na Figura 20.

Esse cálculo da distância é necessário devido ao fato de que mesmo o absorvedor acompanhando o movimento do Sol, em determinadas épocas do ano ele vai causar sombra sobre os espelhos, fazendo-se necessária uma correção em sua posição.

### 8.3. Sombreamento entre espelhos

A formação de sombras de um espelho em outro é um efeito indesejável em um coletor Fresnel ou em qualquer outro tipo de coletor solar, devido ao efeito de diminuição da reflexão dos raios solares para o tubo absorvedor ou superfície absorvedora, causando assim perdas óticas e perdas térmicas no sistema. Sharma (2014) fornece equações que nos dá condições para o cálculo do sombreamento dos espelhos. Para o cálculo da largura da sombra tem-se a equação:

$$L_{s,i} = L \left[ 1 - \frac{p/w}{L/w} * |\tan(\gamma - 90^\circ - \alpha)| \right] \quad (45)$$

E para a altura da sombra tem-se a equação:

$$H_{s,i} = \begin{cases} w \left[ \frac{1}{2} - \frac{2(p/w) * \cos \psi - \cos\{\beta_{i+1} * \text{sen}(\gamma_{i+1} - \alpha) - \psi\}}{2 \cos\{\beta_i * \text{sen}(\gamma_i - \alpha) - \psi\}} \right] & \text{se } \alpha \leq \gamma \leq 180^\circ + \alpha \\ w \left[ \frac{1}{2} - \frac{2(p/w) * \cos \psi - \cos\{\beta_{i-1} * \text{sen}(\gamma_{i-1} - \alpha) - \psi\}}{2 \cos\{\beta_i * \text{sen}(\gamma_i - \alpha) - \psi\}} \right] & \text{se } 180^\circ + \alpha < \gamma < 360^\circ + \alpha \end{cases} \quad (46)$$

Essas equações são utilizadas para um coletor com absorvedor fixo. Para nosso projeto utilizando um absorvedor móvel, o cálculo da altura da sombra utiliza

apenas a primeira situação ( $\alpha \leq \gamma \leq 180^\circ + \alpha$ ) devido ao referencial da localização do absorvedor mudar com o tempo.

O cálculo da área sombreada de um espelho por outro é dado então pela equação:

$$A_{s,i} = L_{s,i} * H_{s,i} \quad (47)$$

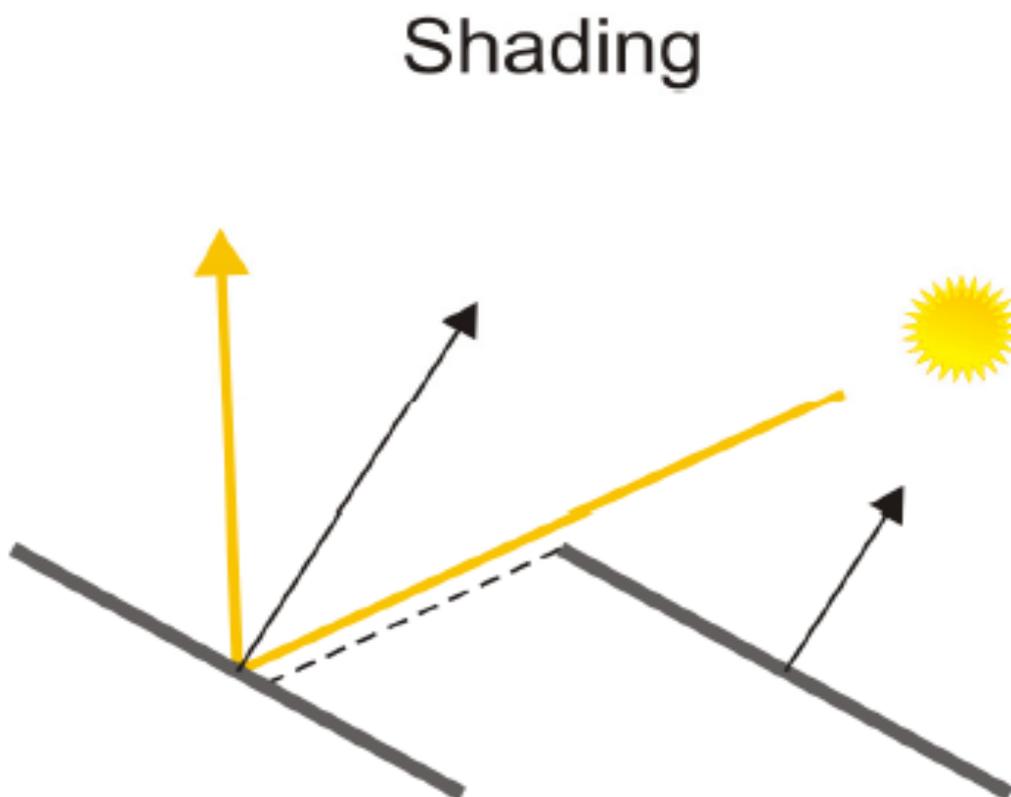


Figura 21. Sombreamento entre espelhos

Fonte: FELDHOFF (2012)

A Figura 21 acima mostra como é o efeito do sombreamento entre espelhos. Para garantir que o espaçamento calculado para o nosso coletor não irá ter problemas de sombreamento entre espelhos, foi realizada uma simulação para o dia 21 de dezembro (solstício de verão), no horário das 6:00h às 18:00h, que gerou o seguinte gráfico mostrado na Figura 26:

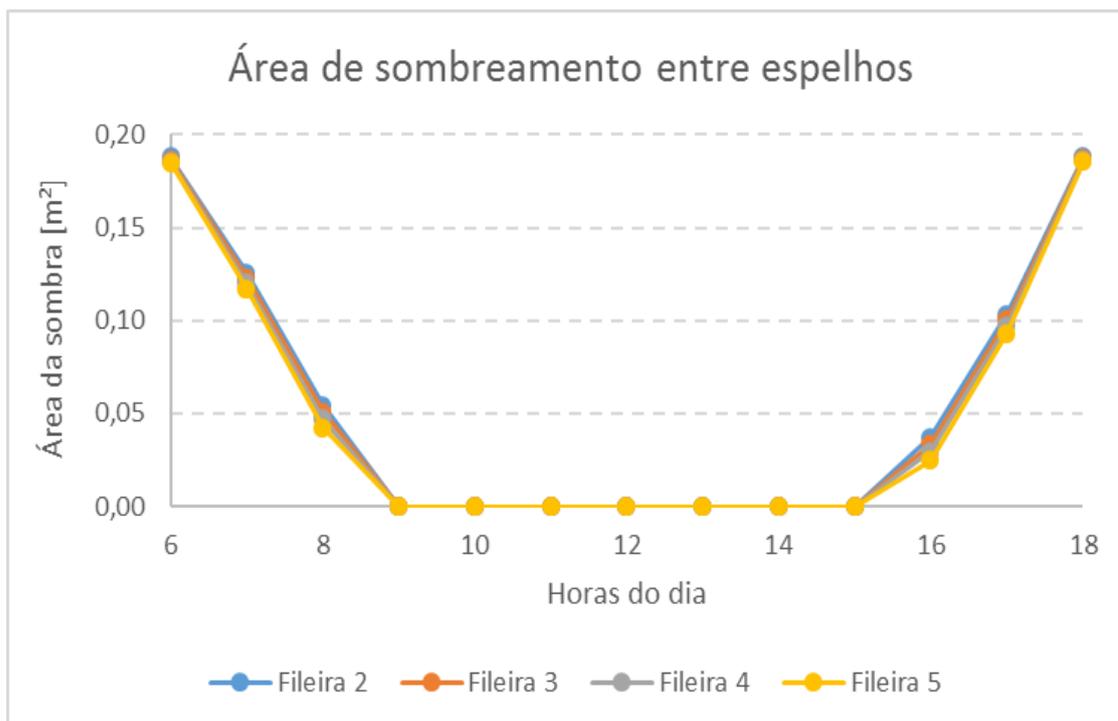


Figura 22. Gráfico da área de sombreamento dos espelhos.

Se pode ver que as áreas, em  $m^2$ , são pequenas e ocorrem nos horários de menor captação do dia, que são o nascer e o pôr do sol, o que não acarreta em grandes perdas, mas ainda assim pode ser realizado um estudo de otimização do sombreamento entre espelhos para que mesmo a essas horas de menor captação não ocorra o sombreamento. Nas outras horas do dia as curvas se sobrepõem ao nível 0 (zero) no gráfico da Figura 22, demonstrando que não há sombreamento entre espelhos nesse horário.

#### 8.4. Bloqueio da luz solar entre espelhos

Além da formação de sombras, outro efeito indesejável é o bloqueio da reflexão da luz solar devido a curta distância entre os espelhos. Esse efeito de bloqueio da reflexão da luz solar, assim como o sombreamento, causa perdas óticas e térmicas. A Figura 23 abaixo demonstra como ocorre esse efeito.

## Blocking

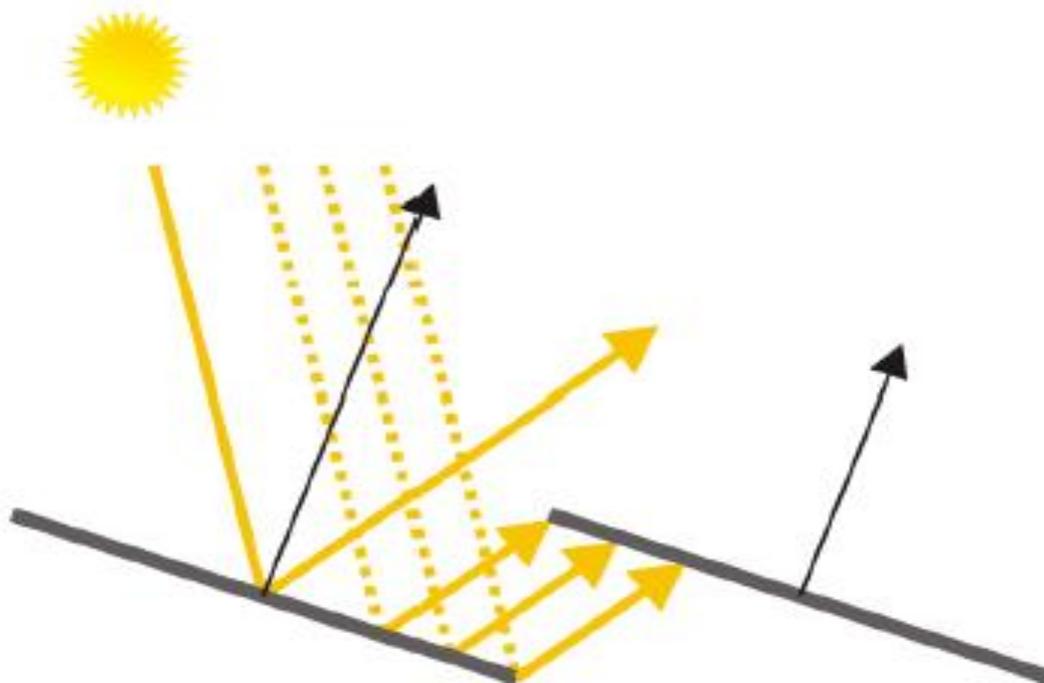


Figura 23. Bloqueio da reflexão da luz solar entre espelhos

Fonte: FELDHOFF (2012)

Sharma (2014) nos dá as condições de calcular o bloqueio entre espelhos através das seguintes equações:

$$L_{b,i} = L \left[ 1 - \frac{p/w}{L/w} * \left| \frac{\text{sen} \theta_z * \text{sen}(\gamma - \gamma_i)}{\text{sen} \chi_i * \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_z \text{sen}^2(\gamma - \gamma_i)}} \right| \right] \quad (48)$$

$$H_{b,i} = \begin{cases} w \left[ \frac{1}{2} - \frac{2(p/w) * \cos \chi_i - \cos \{\beta_{i+1} * \text{sen}(\gamma_{i+1} - \alpha) - \chi_i\}}{2 \cos \{\beta_i * \text{sen}(\gamma_i - \alpha) - \psi\}} - \frac{H_{s,i}}{w} \right] & \text{se } 1 \leq i < \frac{n_f}{2} \\ w \left[ \frac{1}{2} - \frac{2(p/w) * \cos \chi_i - \cos \{\beta_{i-1} * \text{sen}(\gamma_{i-1} - \alpha) - \chi_i\}}{2 \cos \{\beta_i * \text{sen}(\gamma_i - \alpha) - \psi\}} - \frac{H_{s,i}}{w} \right] & \text{se } \frac{n_f}{2} + 1 < i \leq n_f \end{cases} \quad (49)$$

Onde, assim como nas equações de sombreamento,  $L_{b,i}$  e  $H_{b,i}$  são a largura e a altura, respectivamente, do bloqueio dos raios solares entre espelhos.

A área bloqueada entre espelhos então é dada pela equação:

$$A_{b,i} = L_{b,i} * H_{b,i} \quad (50)$$

Para se saber se haverá bloqueio da reflexão da luz solar devido ao espaçamento entre espelhos, foi feita uma simulação para o dia 21 de dezembro (solstício de verão), gerando então o seguinte gráfico mostrado na Figura 24:

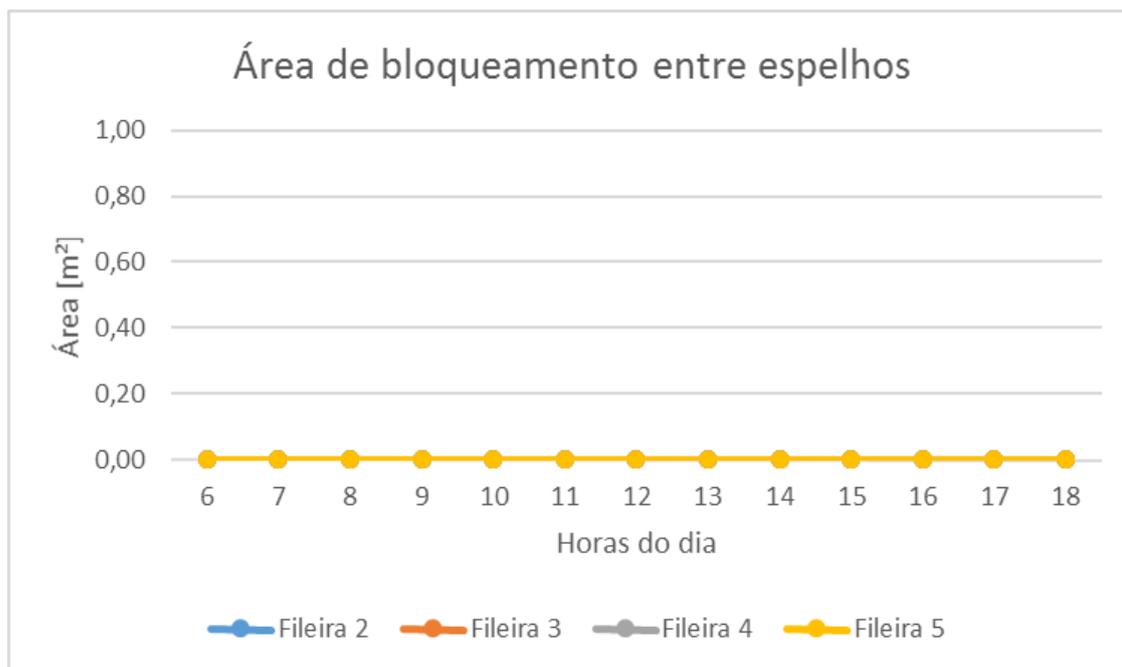


Figura 24. Gráfico da área de bloqueio entre espelhos

Pode-se ver pela Figura 27 acima que para a configuração atual do coletor não haverá bloqueio da reflexão da luz solar entre espelhos pela superposição das curvas no nível 0 (zero).

As simulações tanto para sombreamento, quanto para bloqueio, foram realizadas tomando como base os dias dos solstícios de verão e de inverno, e equinócios de primavera e outono, e apresentaram resultados bastante próximos. O dia do solstício de verão foi tomado como referência por ser o dia com maior número de horas de sol.

### 8.5. Simulação de sombreamento e bloqueio com alterações nas configurações

Para otimização do coletor com relação ao sombreamento entre espelhos e ao bloqueio da reflexão da luz solar entre espelhos, é necessário que sejam realizadas algumas simulações com algumas mudanças nas configurações físicas do coletor. Permanecendo com o mesmo número de fileiras de espelhos (5 fileiras), em uma simulação realizada foi dobrado o valor da altura do absorvedor (de 2 m para 4 m), utilizando espelhos com 1 m de largura e distância entre espelhos de 0,5 m, que chamaremos de configuração B. Com essas alterações foram gerados os seguintes gráficos para sombreamento e bloqueio entre espelhos vistos nas Figuras 25 e 26 respectivamente.

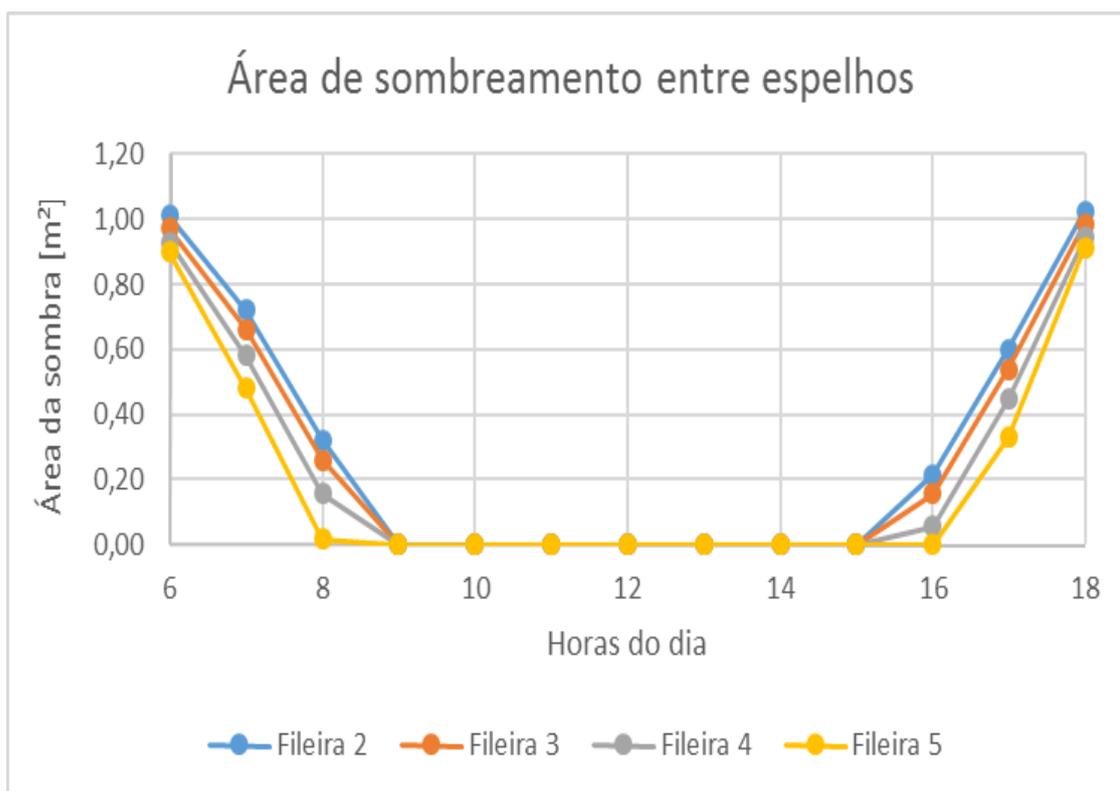


Figura 25. Gráfico da área de sombreamento entre espelhos na configuração B

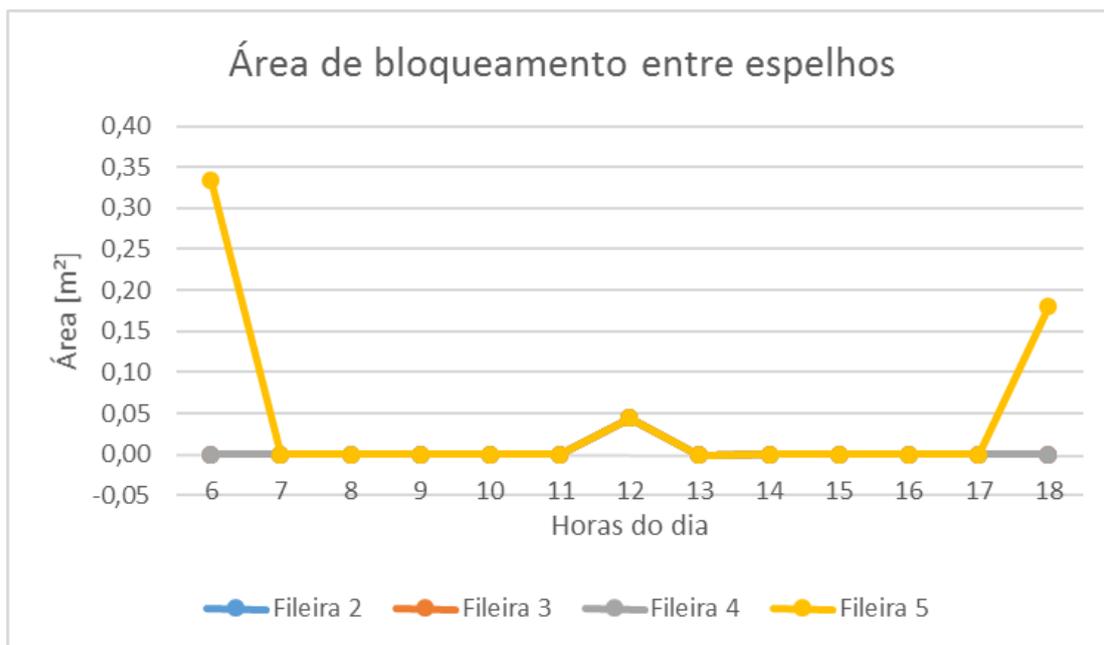


Figura 26. Gráfico da área de bloqueio entre espelhos na configuração B

Se pode notar que na configuração B haverá um aumento do sombreamento entre espelhos, e também haverá um início de bloqueio da reflexão dos raios solares entre os espelhos, o que é totalmente indesejável, devido as perdas óticas e térmicas provenientes desse efeito. Sendo assim, essa configuração não é adequada para os fins a que o coletor Fresnel é desenvolvido.

Fazendo a simulação agora para uma nova configuração chamada de configuração C, onde a altura do absorvedor foi diminuída para 1 m, a largura do espelho é de 0,06 m e a distância entre espelhos é de 0,04 m, teremos os seguintes resultados mostrados nos gráficos das Figuras 27 e 28 respectivamente.

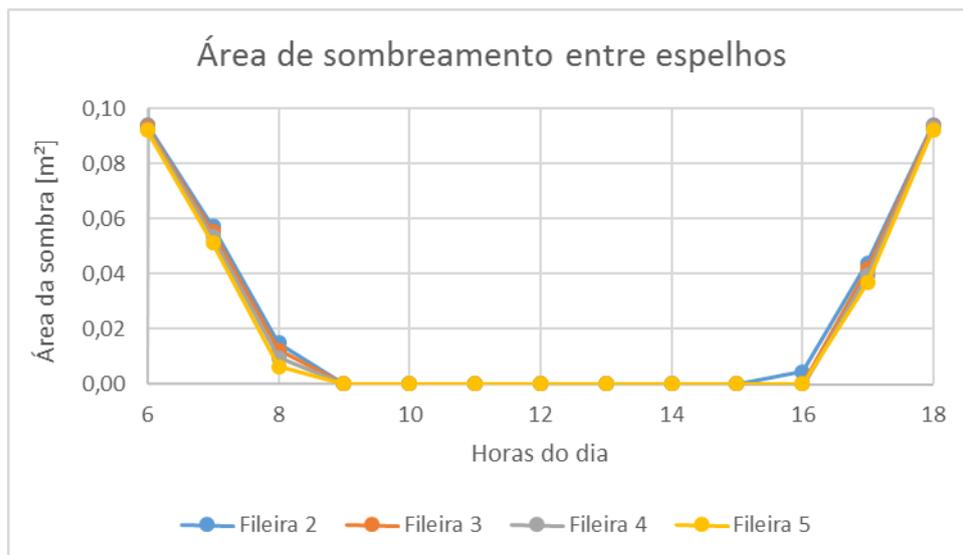


Figura 27. Gráfico da área de sombreamento entre espelhos na configuração C

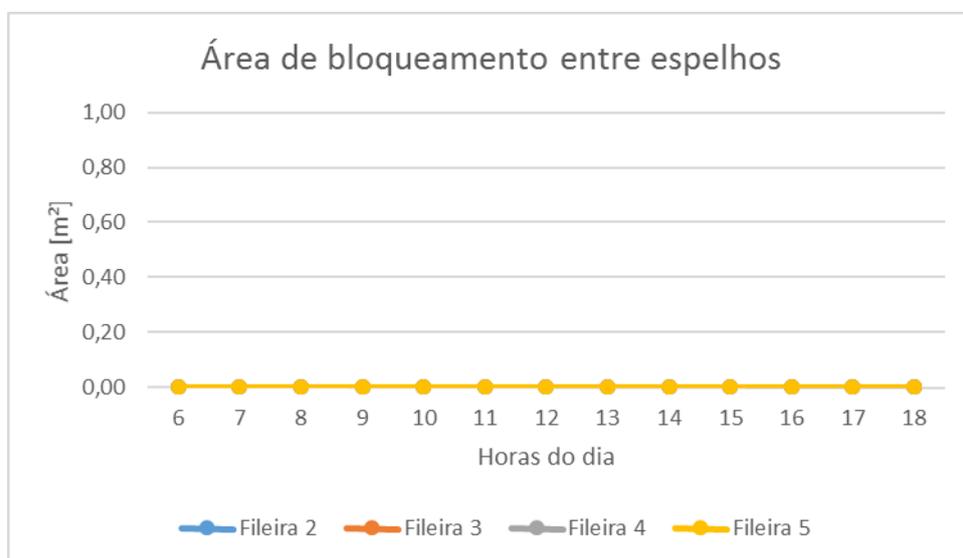


Figura 28. Gráfico da área de bloqueio entre espelhos na configuração C

Como se pode ver nos gráficos, essa é uma configuração satisfatória para a questão de sombreamento entre espelhos e o bloqueio dos raios solares entre espelhos, devido a superposição das curvas no nível 0 (zero) dos gráficos das Figuras 28 e 29. Mas com relação a quantidade e energia refletida, nesta configuração, seria um item prejudicado devido a menor área dos espelhos, fazendo assim com que a eficiência seja menor do que na configuração normal.

## CAPÍTULO VII

### 9. MECÂNICA E CONSTRUÇÃO DO COLETOR

A proposta inicial do protótipo a ser construído é de que a maior parte da estrutura seja feita em alumínio para dar a estrutura leveza e resistência. Serão utilizadas seções retangulares de alumínio para construir uma moldura onde irão ser instalados os suportes dos espelhos. Os suportes dos espelhos também serão construídos com cantoneiras de alumínio, tendo um vergalhão de aço instalado em sua parte posterior para prover sustentação e mobilidade.

As mesmas seções retangulares de alumínio serão utilizadas para a sustentação do suporte do tubo absorvedor, o qual está a 2 m acima do nível dos espelhos e tem mobilidade em um grau de liberdade no sentido horizontal.

Os suportes dos espelhos e o tubo absorvedor serão movidos por motores de acionamento de vidro elétrico de automóveis da marca Mabushi com potência nominal de 10,2 W, rotação nominal de 98 RPM e tensão nominal de 12 V. Esses dados técnicos são vistos na Figura 30.

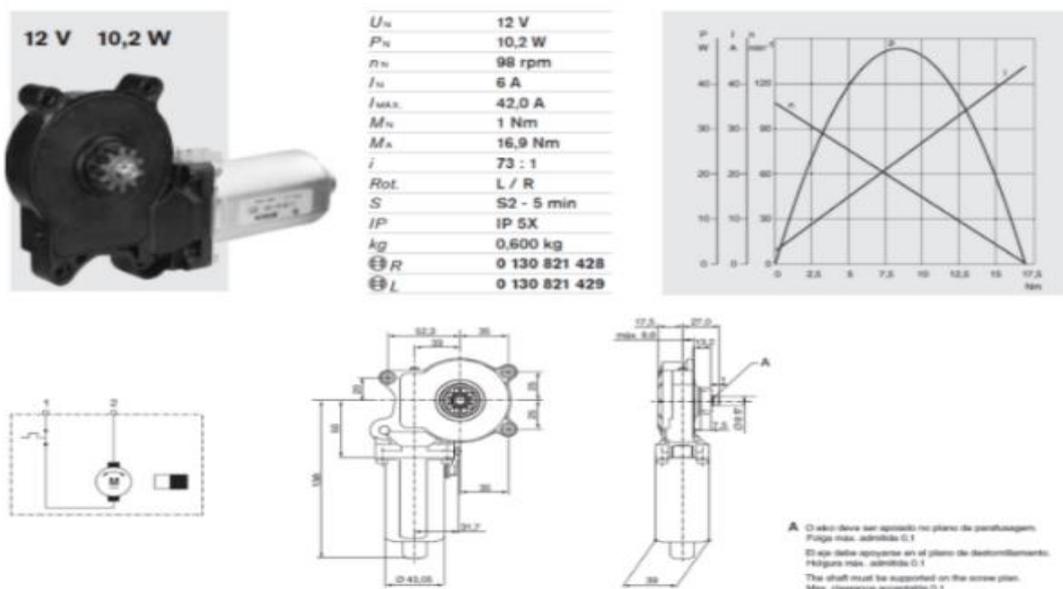


Figura 30. Especificações técnicas do motor.

Fonte: Laboratório de Garagem.

Encoders rotativos da marca Bourns, visto na Figura 31, foram utilizados para medir a rotação dos eixos onde os motores Mabushi foram instalados para que sejam feitas as correções necessárias e se atinja a rotação ideal para o acompanhamento do Sol pelos espelhos.



Figura 31. Encoder rotativo.

Fonte: Farnell Newark Sensores e Transdutores.

Os espelhos que serão utilizados para refletir os raios solares até o tubo absorvedor são espelhos de uso normal que podem ser encontrados em qualquer vidraçaria, apenas as medidas é que necessitaram ser adaptadas ao corte para que fiquem no tamanho exato para colocação nos suportes. Serão cinco pares de espelhos de 4 mm de espessura, lapidados para evitar acidentes ao serem manuseados, com 885 mm de comprimento e 120 mm de largura, sendo fixados nos suportes com o uso de fitas fixadoras de dupla face da marca 3M.

O tubo absorvedor, será feito em cobre com diâmetro de 10 mm, e a escolha do cobre como material para a construção do absorvedor foi devido ao bom coeficiente de condutividade térmica  $k$  do cobre, que para o cobre comercial, com 90% de cobre e 10% de alumínio, é de 52 W/mK (Incropera, 2008). Além disso o tubo de cobre será pintado com tinta preta para aumentar a absorção de calor. Serão também soldadas ao tubo aletas de cobre, para uma maior área de recepção de calor, as quais também foram pintadas com tinta preta.

## 10. ELETRÔNICA

A parte eletrônica do projeto consiste da caixa de comando e controle e dos encoders instalados no coletor. A caixa de comando e controle enviará os dados de comando ao coletor para que o mesmo venha a funcionar. Na caixa de comando e controle estão instaladas seis placas de controle dos motores e dos encoders. As placas possuem em sua configuração uma ponte H, além de que a caixa de controle está pronta para o possível uso de LDRs caso seja necessário a instalação dos mesmos. O LDR (Light Dependent Resistor) é um sensor que é ativado pela luz, e sua função é a de orientar os espelhos para a direção correta da radiação solar.

Serão utilizados LEDs na parte posterior da caixa de controle, que estão conectados as placas. A função desses LEDs é a de ser um indicador de funcionamento das placas, que estão enumeradas de 1 a 6, e a sequência dos LEDs para se saber qual placa ele representa é contada da esquerda para a direita.

### 10.1. Ponte H

A ponte H é um circuito com o qual se controla um motor de corrente contínua (motor DC), a partir de sinais gerados por microcontroladores. O sentido de rotação de um motor DC pode ser invertido apenas mudando a polaridade dos seus terminais (PATSKO, 20--). Ainda segundo Patsko (20--), a ponte H também é importante na utilização de circuitos digitais devido ao fato de que os sinais de saída dos microcontroladores não suportarem a corrente necessária e nem possuem a tensão adequada para o acionamento dos motores, sendo necessária uma fonte que possua a potência adequada para a alimentação dos motores.

A função da ponte H é inverter o sentido de rotação de um motor DC automaticamente, ou seja, sem a necessidade da troca manual da polaridade nos seus terminais. Para essa automatização se pode utilizar relés, chaves simples ou transistores. A caracterização da ponte H se dá pela utilização de quatro chaves mecânicas ou eletrônicas, posicionadas de modo que tem a forma da letra “H”, sendo

cada chave localizada nos extremos e o motor no meio da ponte (PATSKO, 20--). O modelo esquemático da Ponte H pode ser visto na Figura 32.

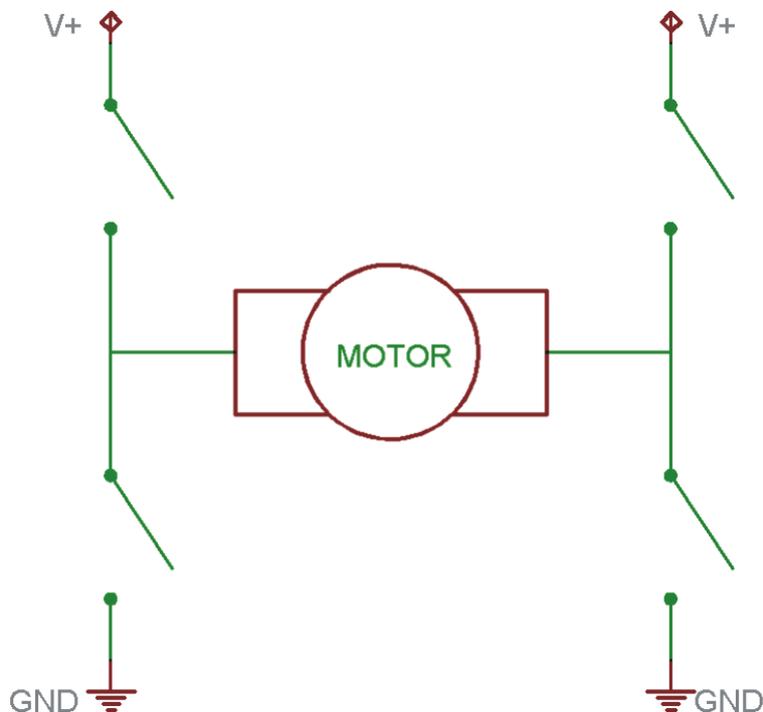


Figura 32. Esquema de uma ponte H.

Fonte: PATSKO (20--)

O acionamento do motor se quando do fechamento de duas chaves opostas diagonalmente fazendo o fluxo da corrente partir do polo positivo para o polo negativo, e como o motor está no meio do fluxo da corrente, este irá girar em um determinado sentido. Para inverter a rotação do motor, desliga-se as chaves diagonalmente opostas que estavam ligadas, e liga-se a que estavam desligadas, o que faz com o fluxo de corrente atravesse o motor em sentido contrário do que estava antes (PATSKO, 20--), como demonstrado na Figura 33.

Para parar os motores de forma rápida é necessário fechar as chaves superiores ou as chaves inferiores para que o motor mude imediatamente o sentido de rotação devido ao “curto-circuito” formado em seus terminais. Já para uma parada suave fecham-se todas as chaves, causando o desligamento do motor. O fechamento das chaves que estão do mesmo lado do circuito deve ser evitado ao máximo devido a corrente nesse caso passar direto do polo positivo para o negativo, causando assim um curto-circuito que danificará a fonte de alimentação e os

componentes eletrônicos do circuito (PATSKO, 20--), como mostrado no modelo esquemático da Figura 34. Na Figura 35 se pode ver como é o funcionamento por completo de uma Ponte H ligada a um motor.

Neste trabalho foram utilizados transistores para atuar como chaves do circuito.

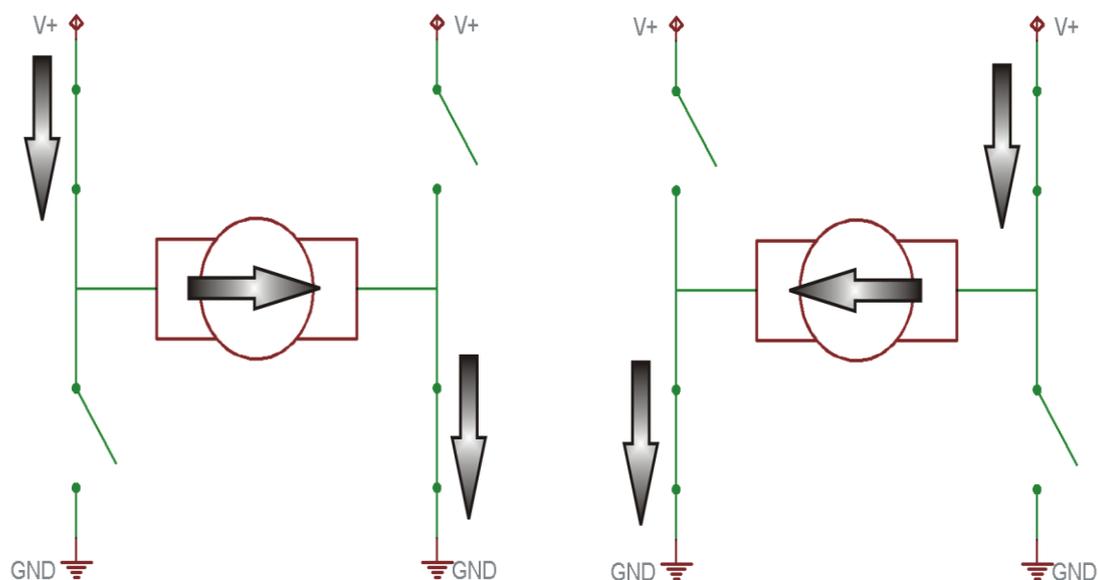


Figura 33. Representação do fluxo de corrente.

Fonte: PATSKO (20--)

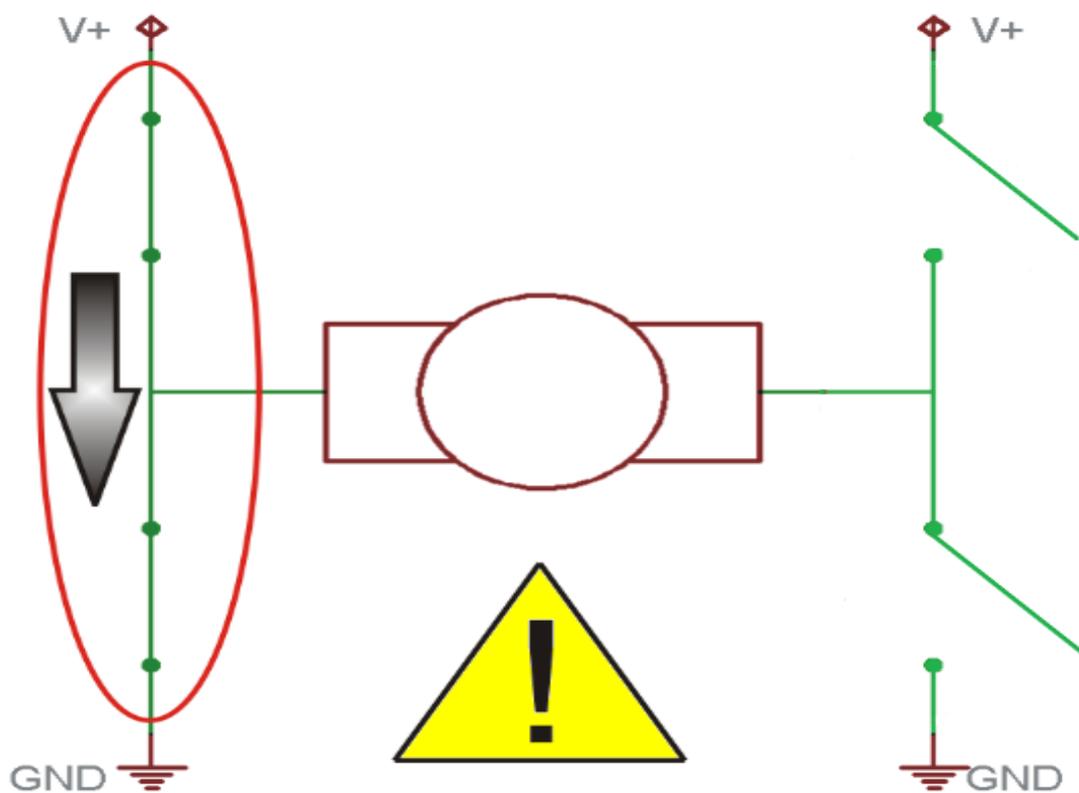


Figura 34. Situação a ser evitada em uma ponte H.

Fonte: Adaptado de PATSKO (20--).

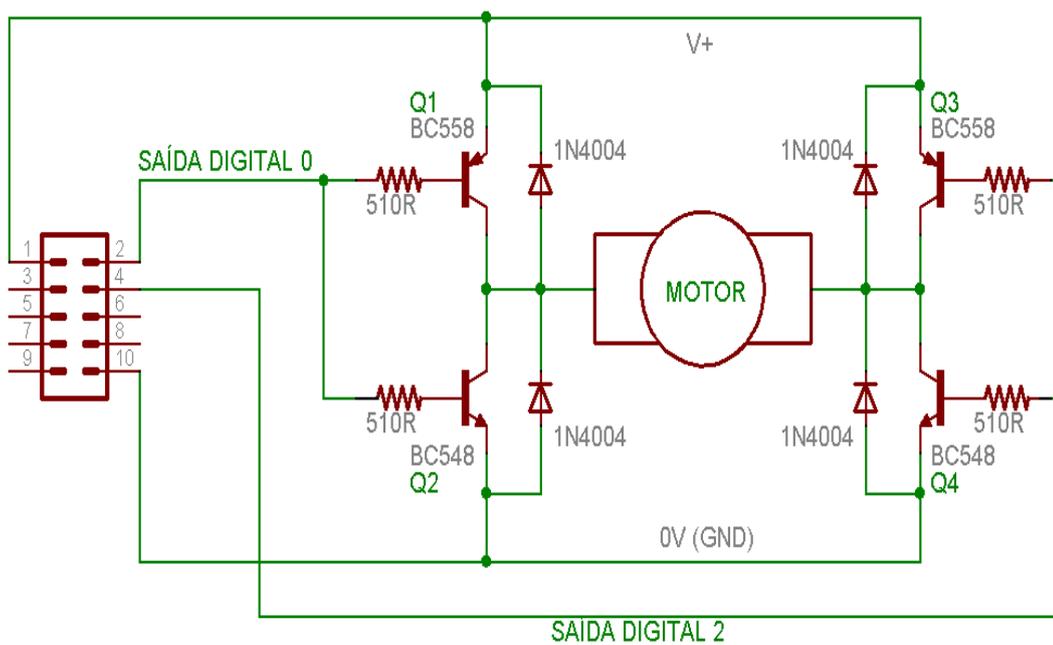


Figura 35. Esquema de uma placa com ponte H.

Fonte: PATSKO (20--).

## 10.2. Funcionamento do coletor

O funcionamento do coletor será por meio de comandos eletrônicos enviados a caixa de controle através de uma interface que será criada utilizando-se o software LabVIEW®. Serão inseridos no programa de controle os dados com os fatores solares demonstrados no Capítulo V deste trabalho, além das equações (33), (34), (35), (44) e (45). As equações (33), (34) e (35) tratam da inclinação efetiva dos espelhos, enquanto que as equações (44) e (45) são as que dão as coordenadas de posição do absorvedor móvel. A partir das equações dos fatores solares e das equações enumeradas acima, o programa enviará para os motores dos espelhos o quanto, em graus, eles devem girar em um movimento contínuo acompanhando o percurso do Sol de leste para oeste, para que a luz solar seja refletida direto ao absorvedor. O valor do grau que os espelhos devem estar inclinados irá depender também da posição de onde o absorvedor móvel se encontra, e quanto mais distante o espelho estiver do absorvedor, maior será sua inclinação. Ao mesmo tempo o programa também enviará ao motor acoplado ao parafuso sem fim que dará a mobilidade ao absorvedor, o quanto este deve girar para fazer com que o absorvedor tenha um movimento contínuo, para que assim se evite a obstrução da luz solar nos espelhos.

A partir das informações acima descritas do funcionamento do coletor e das informações contidas no Capítulo VI sobre o dimensionamento do coletor e as simulações de sombra e bloqueio da luz solar entre espelhos, é possível saber que não ocorrerá obstrução da luz solar, seja pelos próprios espelhos nos outros espelhos, seja do absorvedor nos espelhos.

## CAPÍTULO VIII

### 11. RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

Alguns cálculos e simulações para a cidade de João Pessoa – PB foram realizados para se estimar a quantidade de energia que irá alcançar o tubo absorvedor durante um dia específico. Os resultados desses cálculos estão demonstrados nas figuras abaixo:

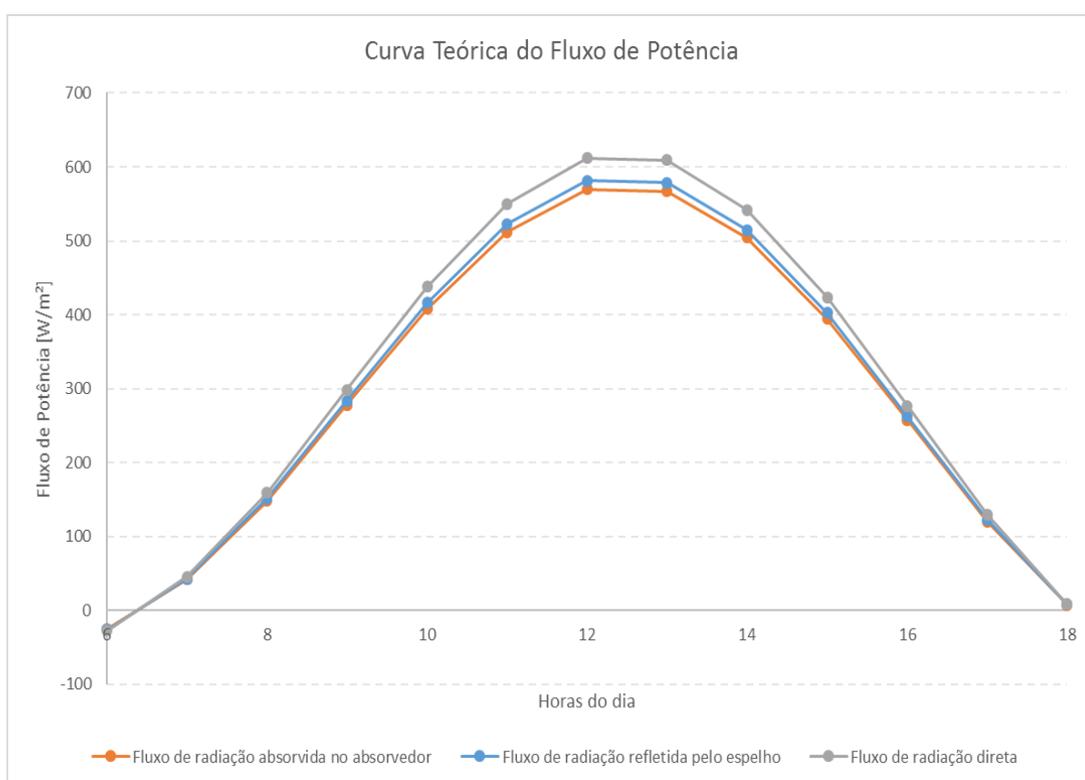


Figura 36. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência que alcança o absorvedor

O gráfico da Figura 36 mostrado acima apresenta a curva teórica do fluxo de potência no absorvedor, não importando se ele está fixo ou móvel. Devido ao fato da curva ser teórica, não foram consideradas as perdas por radiação e convecção e nem o possível sombreamento dos espelhos pelo próprio tubo absorvedor. A simulação foi feita considerando a data do dia 21 de dezembro, que é o dia que ocorre o solstício de verão, onde se tem uma maior quantidade de horas de sol.

Se considerarmos apenas o sombreamento do absorvedor fixo na curva teórica, podemos ver a diferença de aproveitamento do fluxo de potência direta que chega até os

espelhos e é refletida para o tubo absorvedor, traçado no gráfico da Figura 37. O aproveitamento radiação refletida pelos espelhos utilizando o absorvedor móvel é de 93%, enquanto que para o absorvedor fixo o aproveitamento cai para 76%, uma perda de 17%.

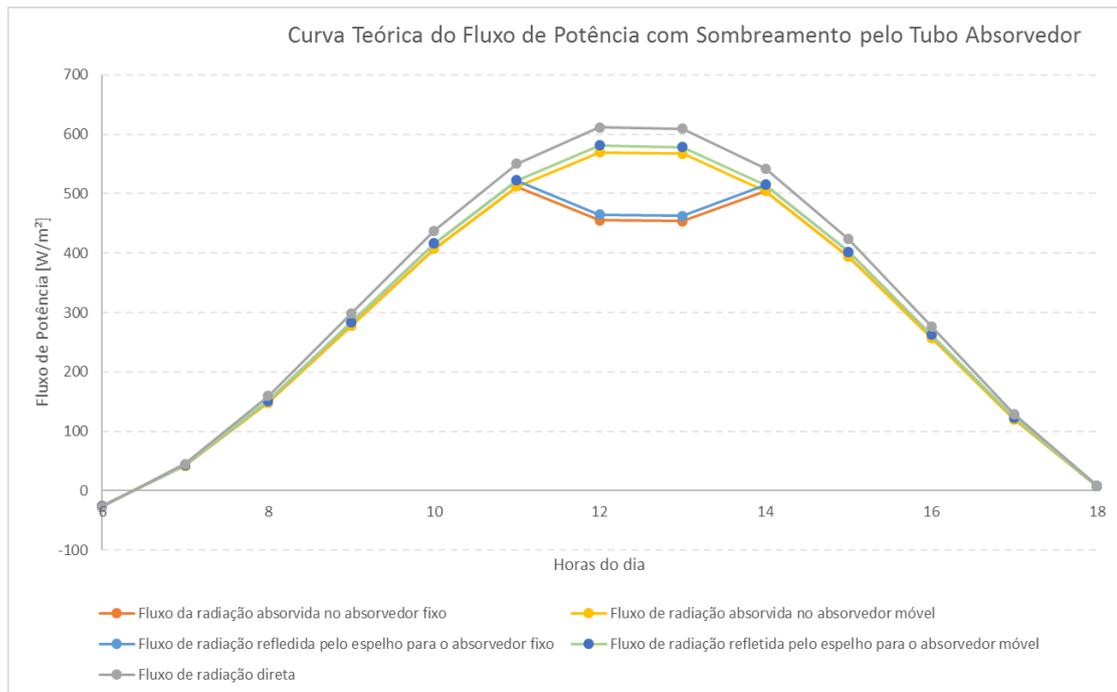


Figura 37. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo

Utilizando dados reais obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, o qual nos fornece os valores da velocidade do vento na superfície terrestre e a quantidade de radiação global, podemos traçar o gráfico real do fluxo de potência no tubo absorvedor, e utilizando a equação do comprimento de sombra podemos determinar em quais horários ocorre sombreamento dos espelhos pelo tubo absorvedor. O efeito do sombreamento pode ser visto da Figura 38 como sendo a diminuição do fluxo de potência no absorvedor fixo (curva na cor laranja) em comparação com o fluxo de potência no absorvedor móvel (curva na cor azul), onde temos sobrepostas as curvas do fluxo de potência real no absorvedor fixo e no absorvedor móvel.

$$l = H_{abs} * \cot(h) \quad (51)$$

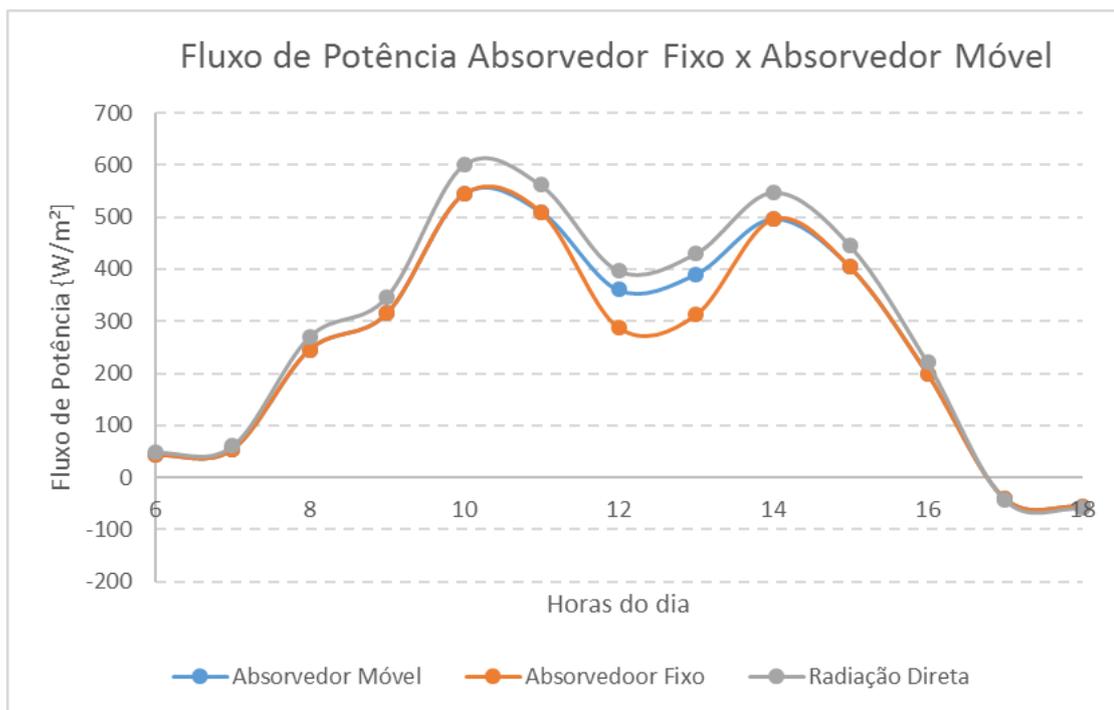


Figura 38. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel

O sombreamento ocorre por volta do meio dia e perdurou até depois das 13:00h, e o aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos pelo absorvedor fixo é de 72%, enquanto que pelo absorvedor móvel é de 91%, uma diferença de 19%. Por isso a utilização de um absorvedor móvel para que a perda do meio de sombras projetadas pelo tubo absorvedor sobre os espelhos seja eliminada ou minimizada ao máximo.

O gráfico da energia acumulada para o absorvedor fixo x absorvedor móvel utilizando os dados reais obtidos no site do INMET é apresentado abaixo na Figura 39.

O ganho de energia acumulada do absorvedor móvel quando comparado ao absorvedor fixo é de 3%.

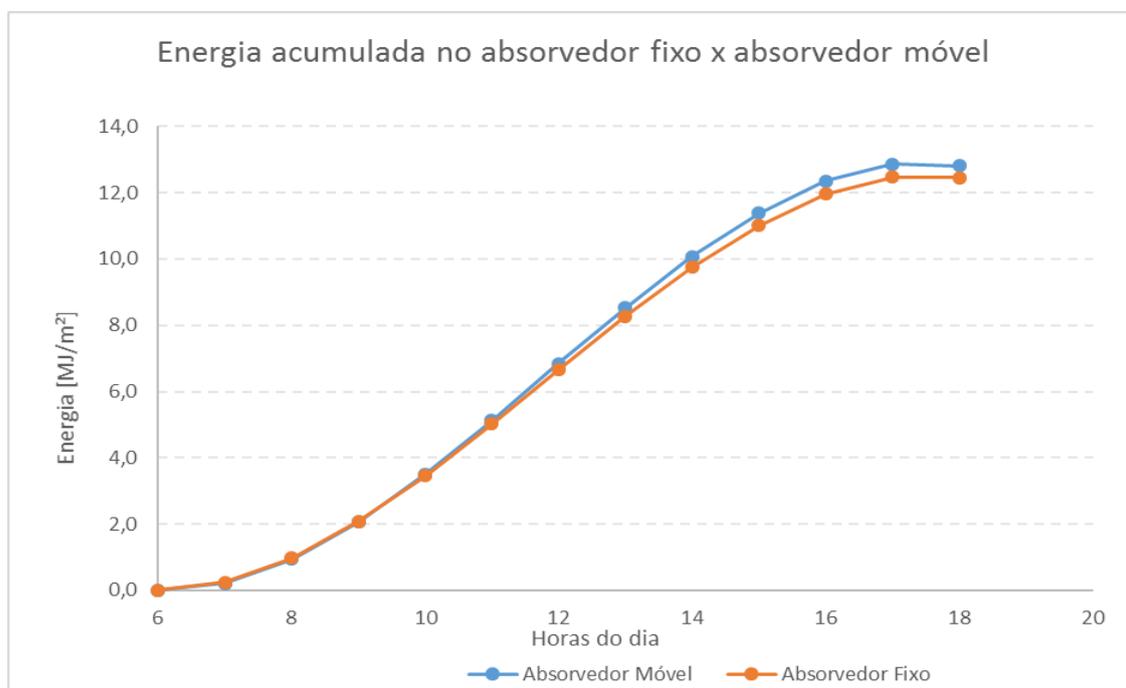


Figura 39. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel

Ao mudar a altura do absorvedor em relação aos espelhos para 1 m de altura e calculando-se novamente o comprimento da sombra projetada pelo absorvedor sobre os espelhos, temos a formação do seguinte gráfico mostrado na Figura 40.

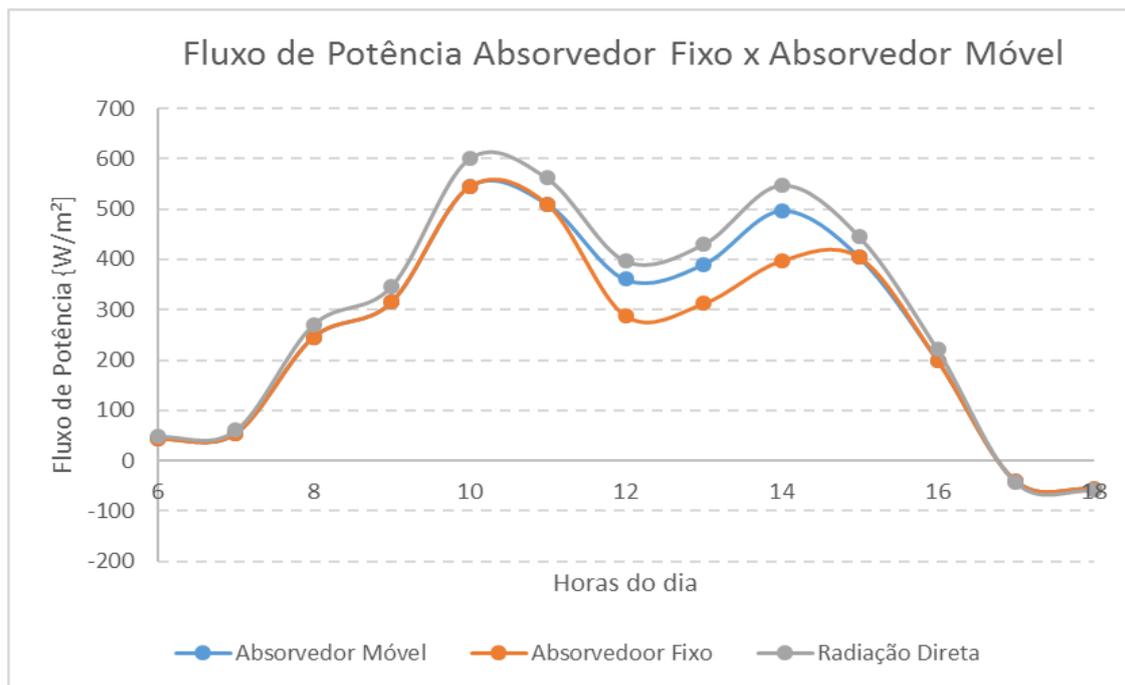


Figura 40. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 1 m

O sombreamento ocorre por um maior período de tempo, mas o aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos continua em 72% para o absorvedor fixo e 91% para o absorvedor móvel, mas devido ao maior período de tempo que o absorvedor fixo provoca sombra sobre os espelhos, isso acarreta em uma maior perda térmica durante o dia, quando comparado com a altura do absorvedor em 2 m. Uma outra consequência da diminuição da altura do absorvedor é o aumento, de acordo com as equações (33) e (35), é o aumento do ângulo de inclinação dos espelhos.

Quando aumentamos a altura para 3 m, praticamente não existe sombreamento do absorvedor sobre os espelhos e as curvas se sobrepõem, e o ângulo de inclinação dos espelhos diminui ainda de acordo com as equações (33) e (35).

Com o intuito de saber se a tecnologia do absorvedor móvel é viável em coletores com grandes dimensões, foi realizada uma simulação, para o dia 21 de dezembro, utilizando um coletor Fresnel, composto por 150 espelhos de 2 m de largura e 10 m de comprimento cada, totalizando uma área de reflexão de 3.000 m<sup>2</sup>. O tubo absorvedor possui diâmetro de 0,05 m e a velocidade do fluido escoando em seu interior é de 1 m/s. A altura que o tubo absorvedor se encontra é de 10 m a partir do nível dos espelhos. Essas características citadas acima se aproximam das características de um coletor Fresnel para produção de vapor.

Utilizando a equação (52) para o cálculo do comprimento de sombra se tem como conhecer a fileira de espelhos que está sendo sombreada naquele momento, e partir desse dado saber o quanto da radiação refletida pelos espelhos está sendo absorvida no tubo absorvedor, para então fazermos a superposição das curvas de fluxo de potência do absorvedor fixo e do absorvedor móvel, tendo como resultado o seguinte gráfico abaixo:

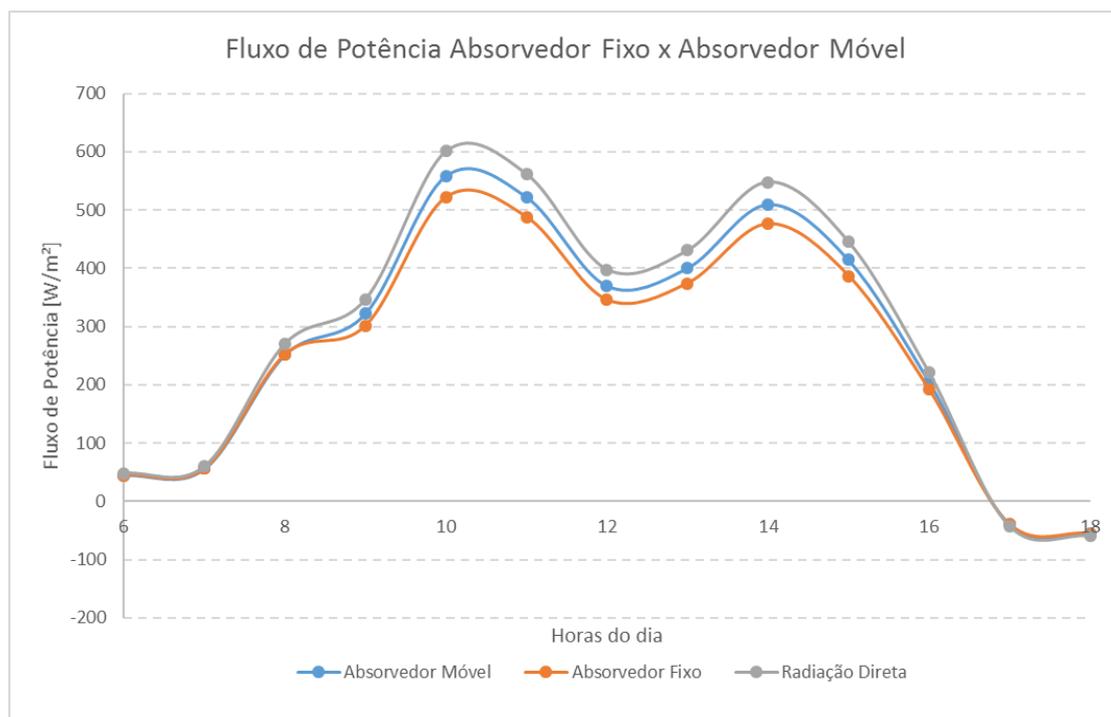


Figura 41. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor com altura do absorvedor de 10 m

O gráfico da Figura 41 acima mostra que o sombreamento nessa configuração dura mais tempo, considerando que apenas uma fileira de espelhos composta de 10 espelhos é sombreada pelo absorvedor, fornecendo um aproveitamento de 86% da radiação refletida pelos espelhos no absorvedor fixo e de 93% no absorvedor móvel, numa diferença de 7% na comparação direta entre os absorvedores.

Ao compararmos o ganho de energia do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo, o valor é de 6%. O gráfico da energia acumulada é visto da Figura 42.

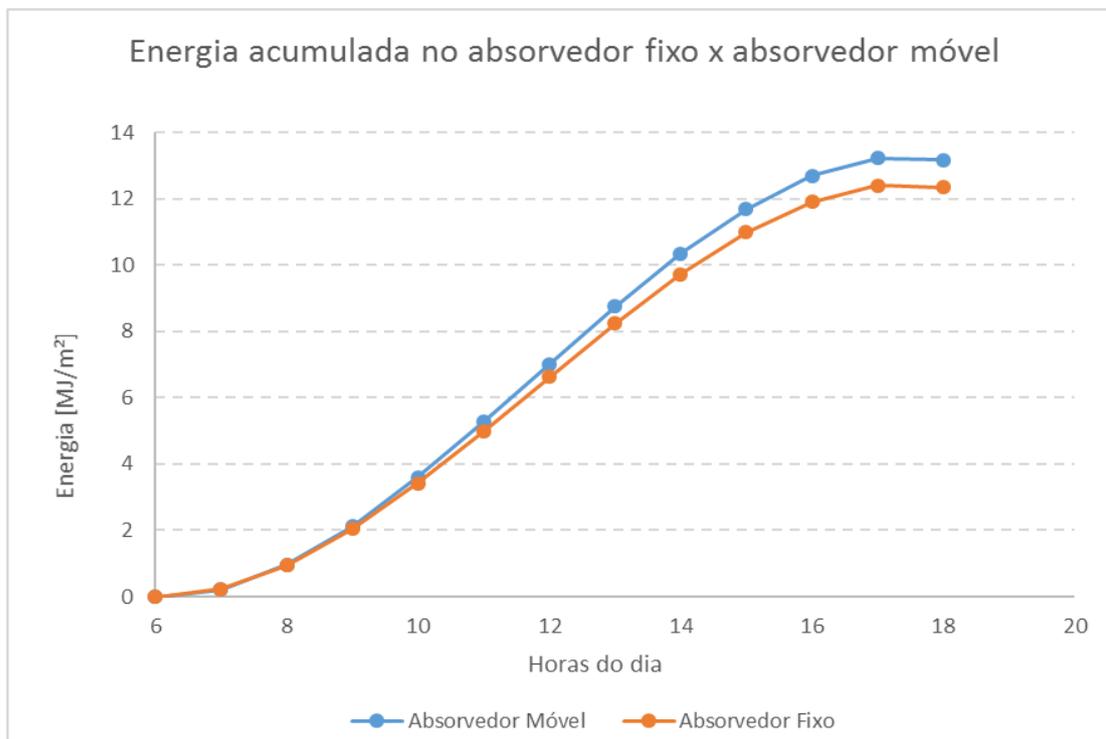


Figura 42. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10m

Mantendo a dimensão da área reflexiva de 3.000 m<sup>2</sup>, mas aumentando a altura do absorvedor para 20 m, o intervalo de tempo em quem os espelhos permanecem sombreados pelo tubo absorvedor diminui um pouco, como pode ser visto na Figura 43, e o aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos melhora um pouco no absorvedor fixo, subindo para 87%, e continua em 93% no absorvedor móvel. Já as perdas ficam em 6%, considerando que apenas uma fileira de espelhos é sombreada a cada hora.

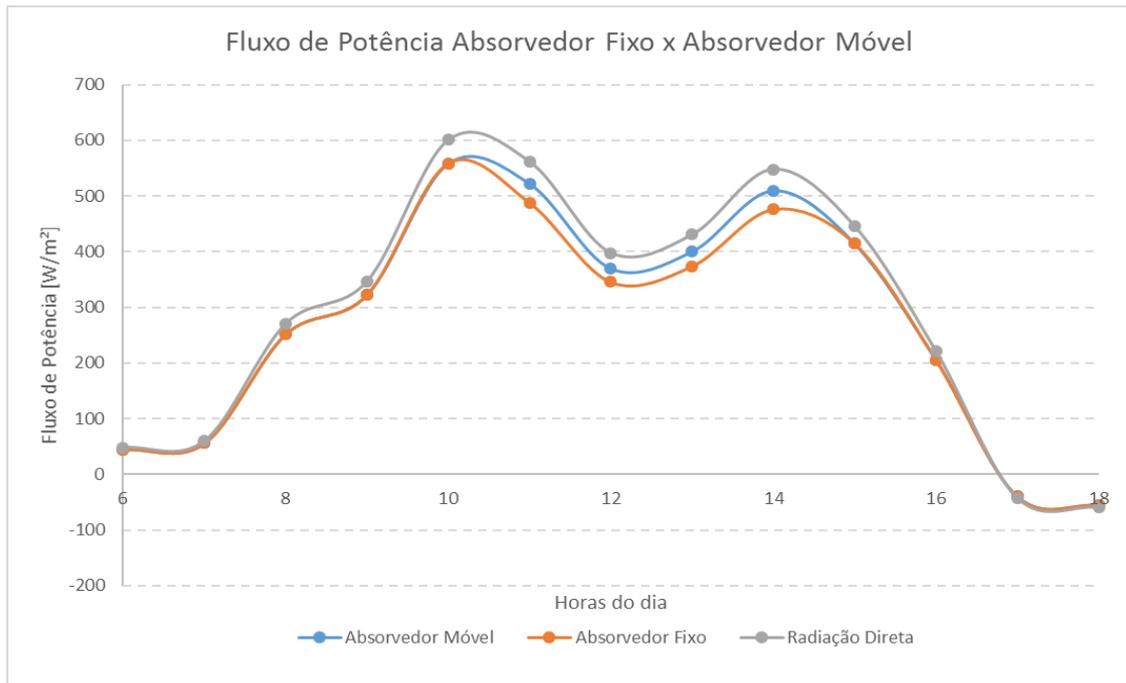


Figura 43. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor com altura do absorvedor de 20 m

A energia acumulada pode ser vista no gráfico da Figura 44, onde mais uma vez podemos fazer o comparativo entre o absorvedor fixo e o absorvedor móvel.

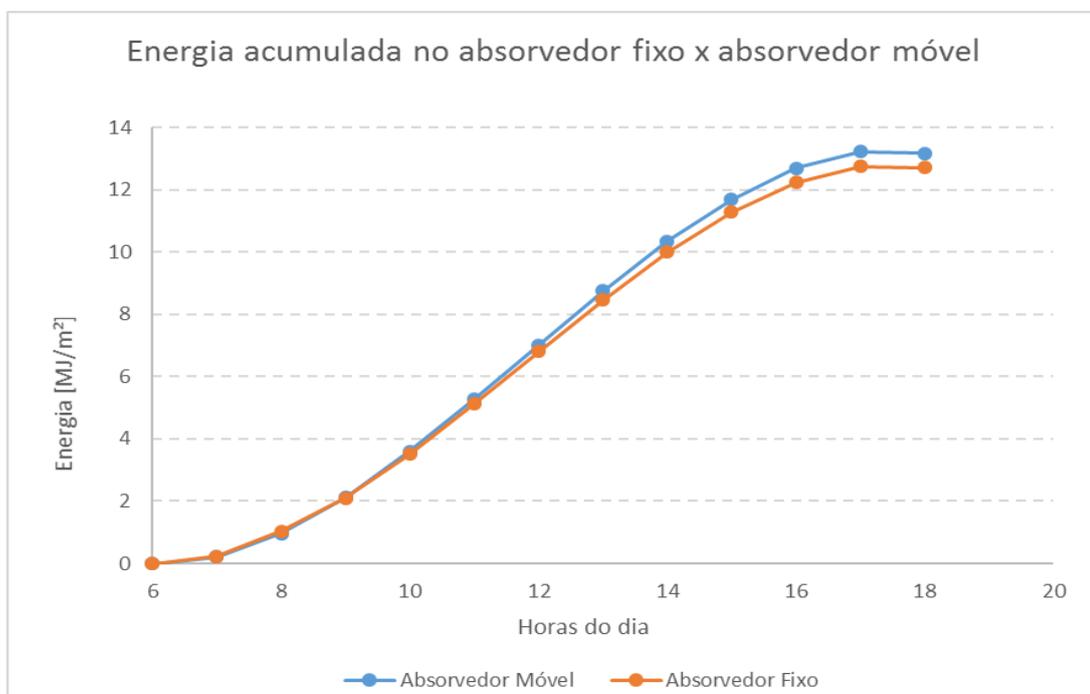


Figura 44. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 20 m

O ganho de energia quando o absorvedor móvel está a 20 m de altura é de 4% comparado ao absorvedor fixo na mesma altura.

Sendo assim, a partir dos resultados mostrados nos gráficos acima, a inovação do absorvedor móvel mostra que a energia solar teria um melhor aproveitamento devido ao fato de não haver, ou ser mínimo, o sombreamento dos espelhos pelo tubo absorvedor, o que levaria a um pequeno aumento na eficiência da produção de vapor, além de um leve aumento da energia acumulada durante o dia.

### **11.1. Simulações para outras localidades**

Fazendo simulações para outras cidades, pegaremos a cidade de Sorocaba – SP, com coordenadas geográficas de latitude  $23,5^{\circ}$  S e longitude  $47,45^{\circ}$  O. A curva teórica mostrada abaixo na Figura 45 representa o fluxo de potência que chega no absorvedor não importando se ele está fixo ou móvel. O fato da curva ser teórica não foram consideradas perdas convectivas e radiativas, assim como também não foi considerado o sombreamento dos espelhos pelo tubo absorvedor

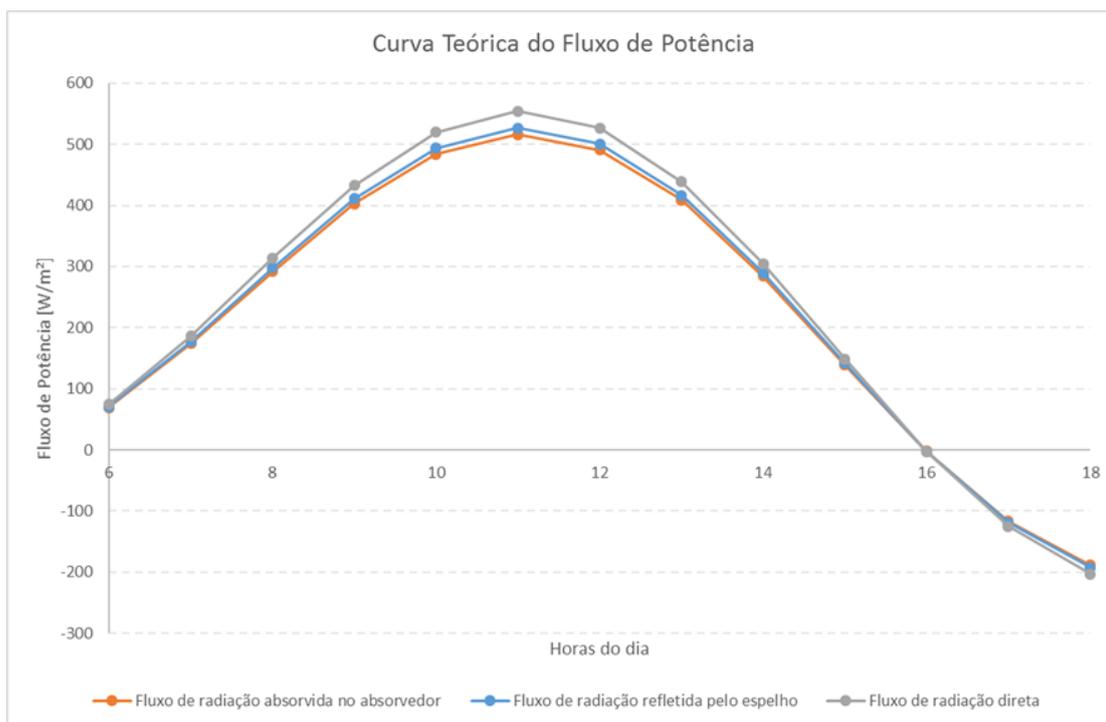


Figura 45. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência que alcança o absorvedor para a cidade de Sorocaba – SP

Utilizando apenas o sombreamento provocado pelo absorvedor fixo nos espelhos, a curva teórica é traçada como visto no gráfico da Figura 46. O aproveitamento da radiação direta do absorvedor móvel é de 93% contra 75% de aproveitamento do absorvedor fixo, dando uma diferença de 18%.

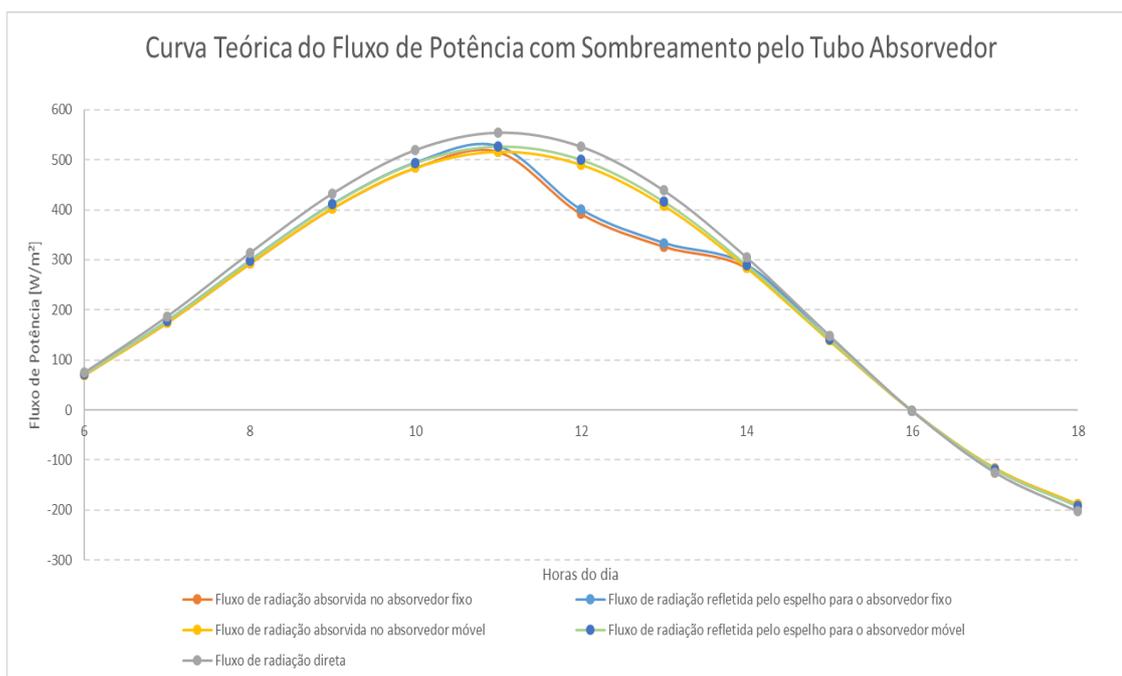


Figura 46. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo para a cidade de Sorocaba – SP

Mantendo-se as configurações do protótipo quanto as dimensões e considerando o absorvedor móvel, e utilizando os dados reais fornecidos pelo site do INMET e a equação (52), podemos traçar o gráfico real de sombreamento e perdas convectivas e radiativas. A região de Sorocaba possui um baixo índice de claridade e também uma baixa incidência solar, o que explica os valores do gráfico da Figura 47 serem mais baixos do que em comparação com os valores obtidos em João Pessoa – PB.

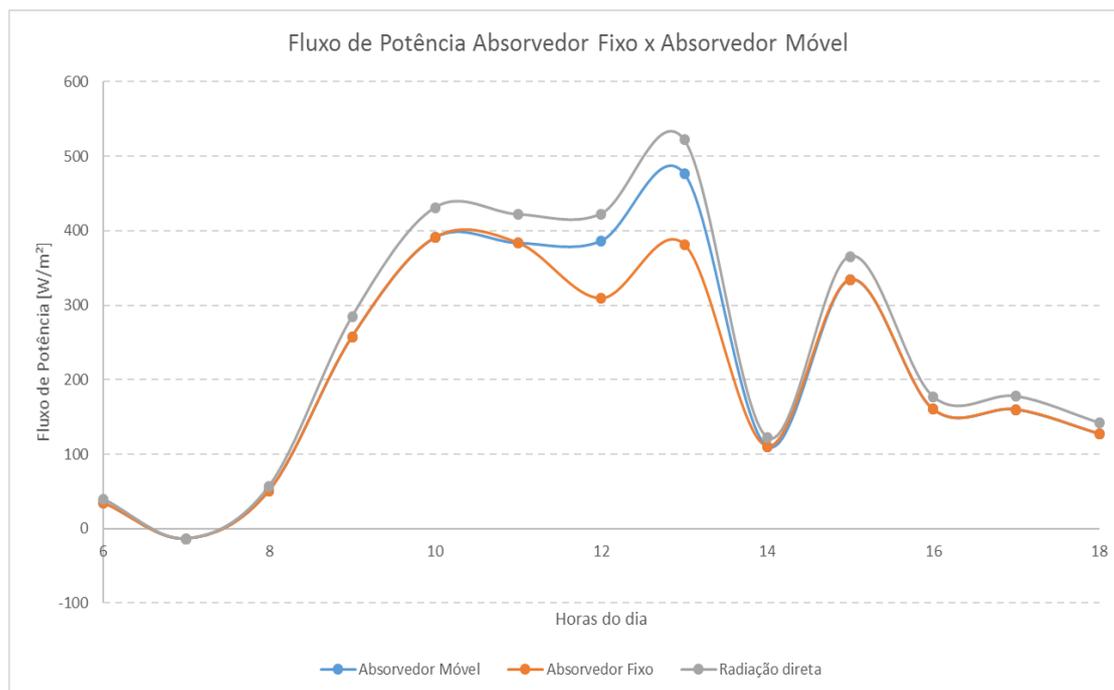


Figura 47. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de Sorocaba – SP

A queda no fluxo de potência mostrada no gráfico da Figura 48 as 14:00h pode ter sido causada pela presença de nuvens. Novamente há um sombreamento a partir do meio dia que perdura até pouco depois das 13:00h, considerando que apenas uma fileira de espelhos foi sombreada a cada hora, o aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos é de 91% no absorvedor móvel e de 73% no absorvedor fixo, sendo o ganho de eficiência de 18% do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo.

Comparando o absorvedor fixo com o absorvedor móvel quanto a energia acumulada, há um ganho de 7% com o uso do absorvedor móvel. O gráfico da energia acumulada pode ser visto na Figura 48.

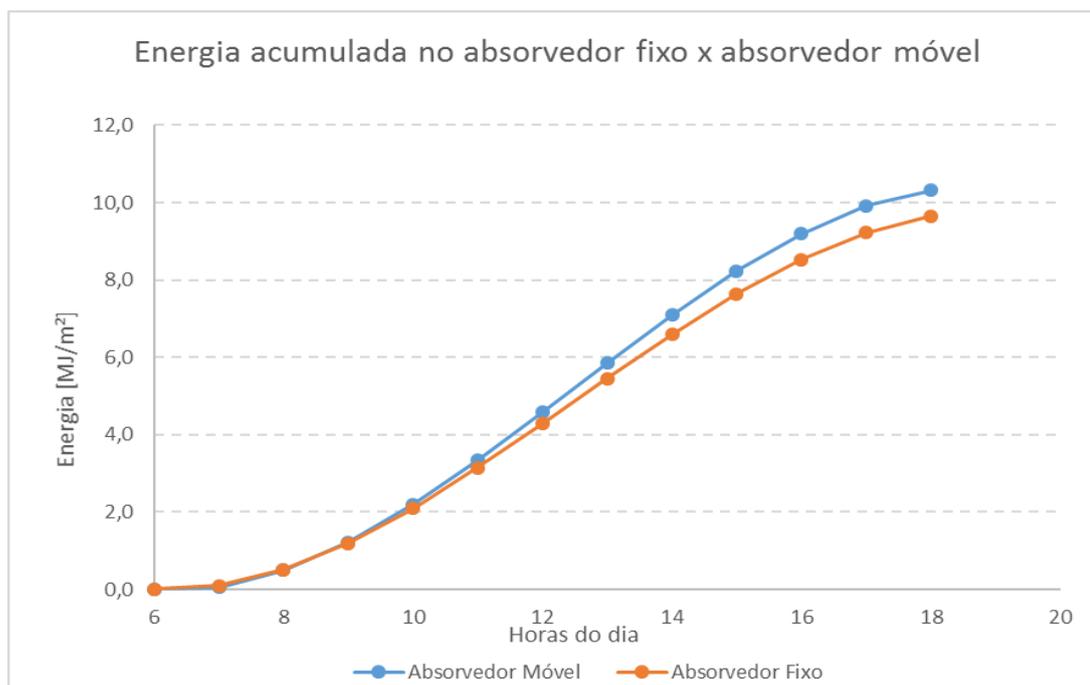


Figura 48. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de Sorocaba – SP

Se fez novamente a simulação para um coletor Fresnel para produção de vapor, utilizando 150 espelhos com 2 m de largura e 10 de comprimento cada, totalizando uma área de reflexão de 3.000m<sup>2</sup>, tubo absorvedor com diâmetro de 0,05 m e com velocidade do escoamento do fluido no seu interior de 1 m/s, e altura do absorvedor de 10 m a partir do nível dos espelhos, tendo como resultado o gráfico da Figura 49, que mostra também os horários em que ocorre o sombreamento dos espelhos pelo tubo absorvedor fixo, considerando que ele projete a sombra em apenas uma fileira a cada hora. A perda de eficiência é de 7% do absorvedor fixo em comparação com o absorvedor móvel já que o aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos é de 93% para o absorvedor móvel, enquanto no absorvedor fixo esse aproveitamento é de 86%. A equação (52) foi novamente utilizada para o cálculo do comprimento da sombra e determinação dos horários em que a sombra ocorre.

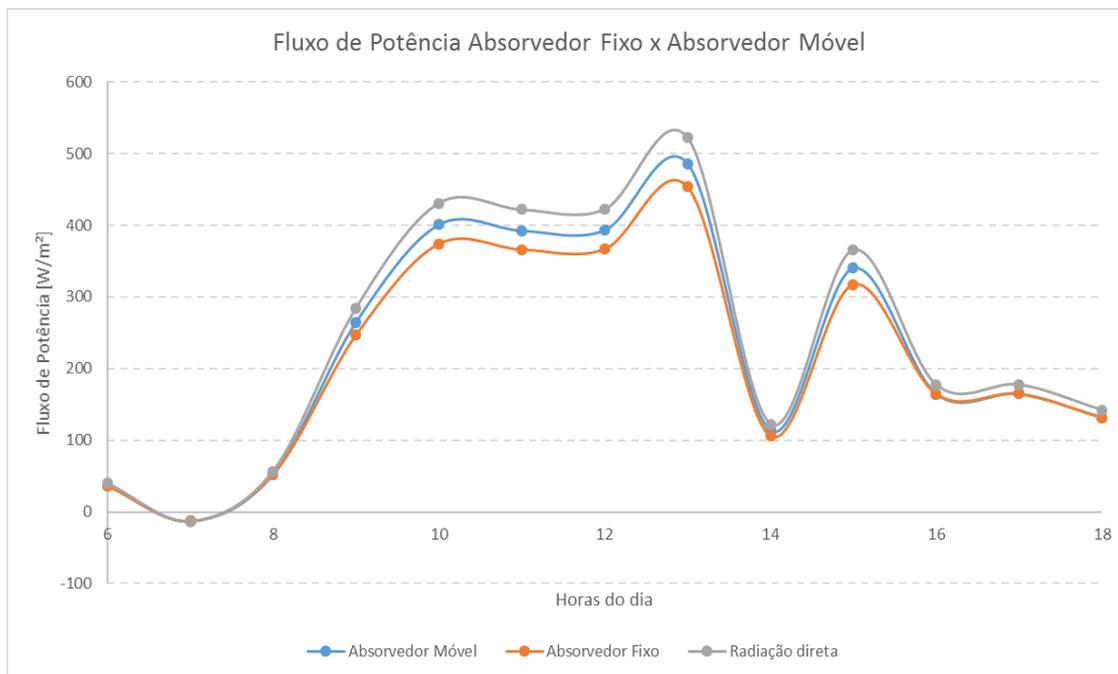


Figura 49. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de Sorocaba – SP com altura do absorvedor de 10 m

Quando comparamos a energia acumulada, vista aqui no gráfico da Figura 50, o ganho de energia do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo é de 6%.

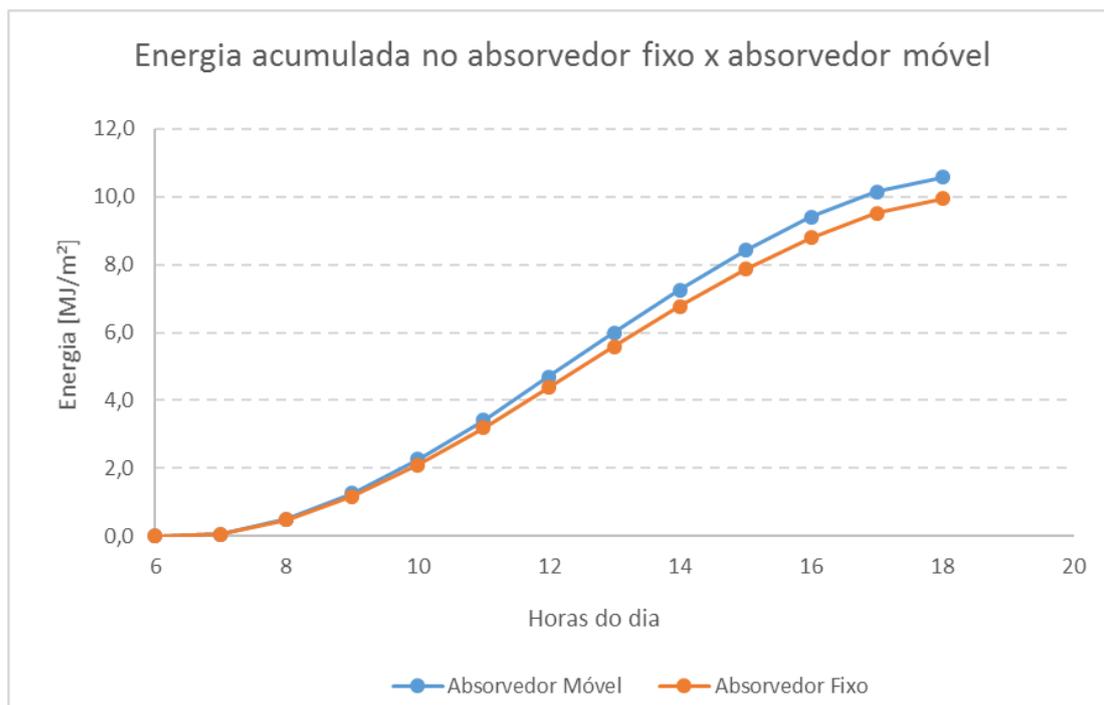


Figura 50. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10 m para a cidade de Sorocaba – SP

Repetindo a simulação com o coletor utilizando 150 espelhos de 2 m de largura e 10 m de comprimento cada, velocidade do fluido de 1 m/s e diâmetro do tubo de 0,05 m, mas agora elevando a altura do tubo absorvedor para 20 m, foi traçado o gráfico da Figura 51.

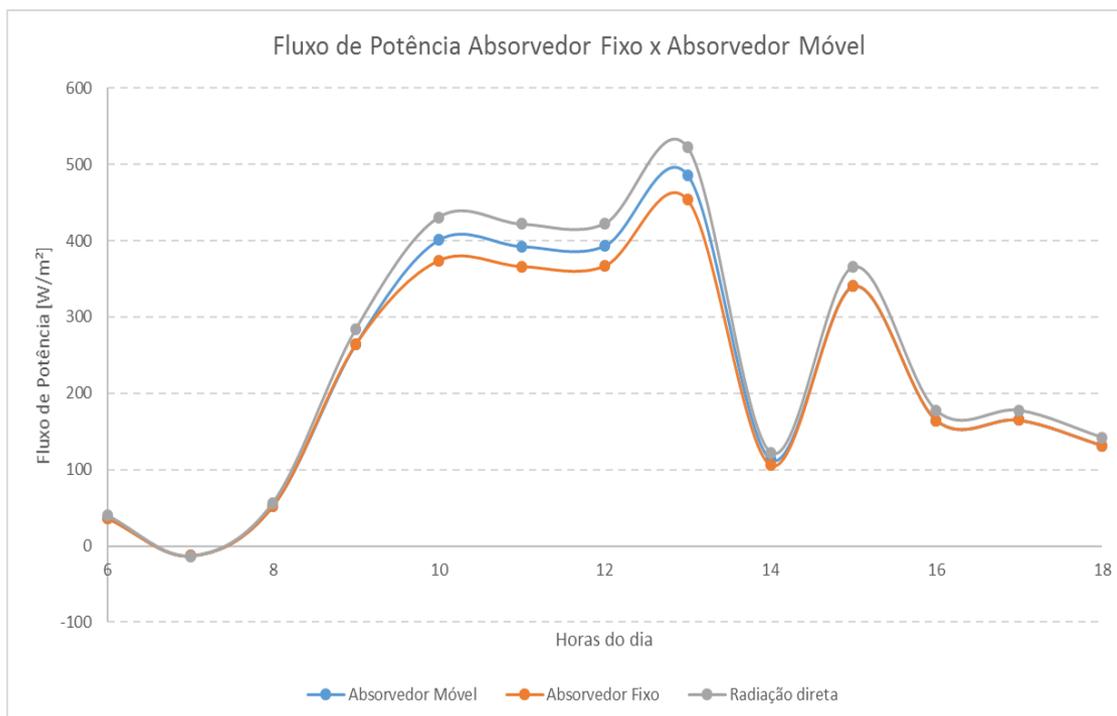


Figura 51. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de Sorocaba – SP com altura do absorvedor de 20 m

Considerando que o absorvedor sombreia apenas uma fileira a cada hora, a perda de eficiência devido ao sombreamento do absorvedor fixo sobre os espelhos é de 7% quando comparado ao absorvedor móvel.

Ao compararmos a energia acumulada, vista no gráfico da Figura 52, o ganho de energia é de 6% do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo.

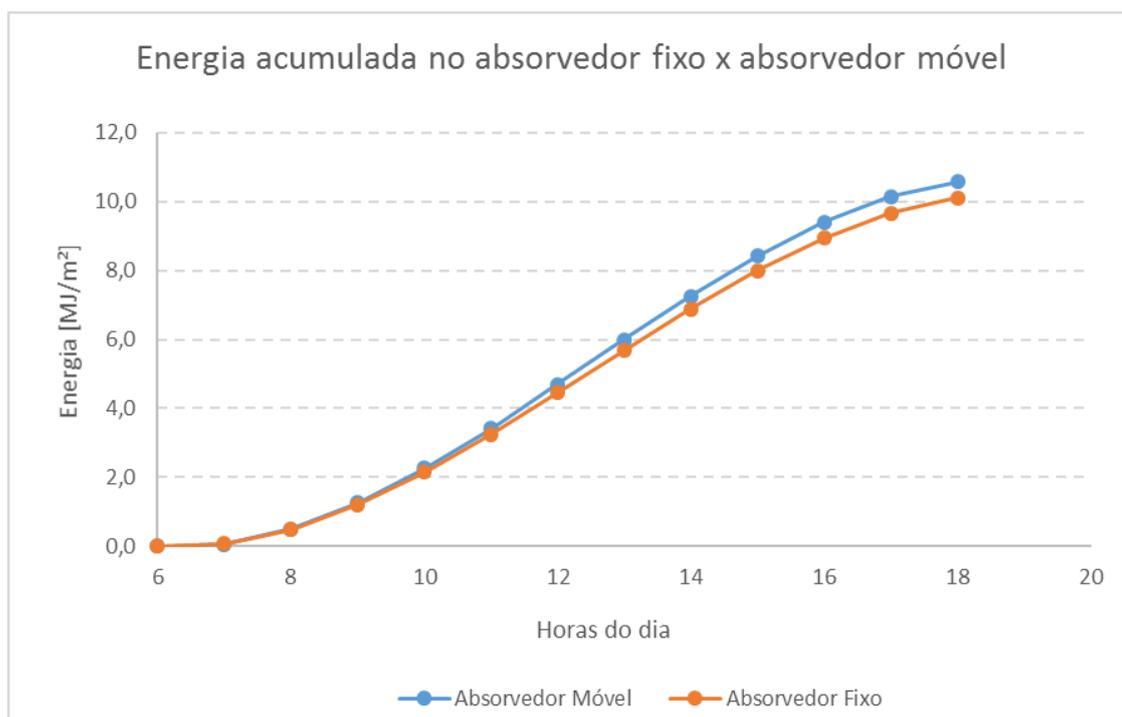


Figura 52. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 20 m para a cidade de Sorocaba – SP

No Brasil um dos locais com maior índice de incidência de insolação, segundo o mapa do ATLAS de irradiação solar, visto na Figura 3, é o sertão nordestino. Sendo assim foi realizada também uma simulação para a cidade de São Gonçalo, na Paraíba, com coordenadas geográficas de latitude  $6,83^{\circ}$  S e longitude  $38,31^{\circ}$  O.

Foi traçado o gráfico da curva teórica do fluxo de potência, mostrado aqui na Figura 53, onde não foram consideradas as perdas convectivas e radiativas, assim como também não foi considerando o sombreamento dos espelhos pelo tubo absorvedor.

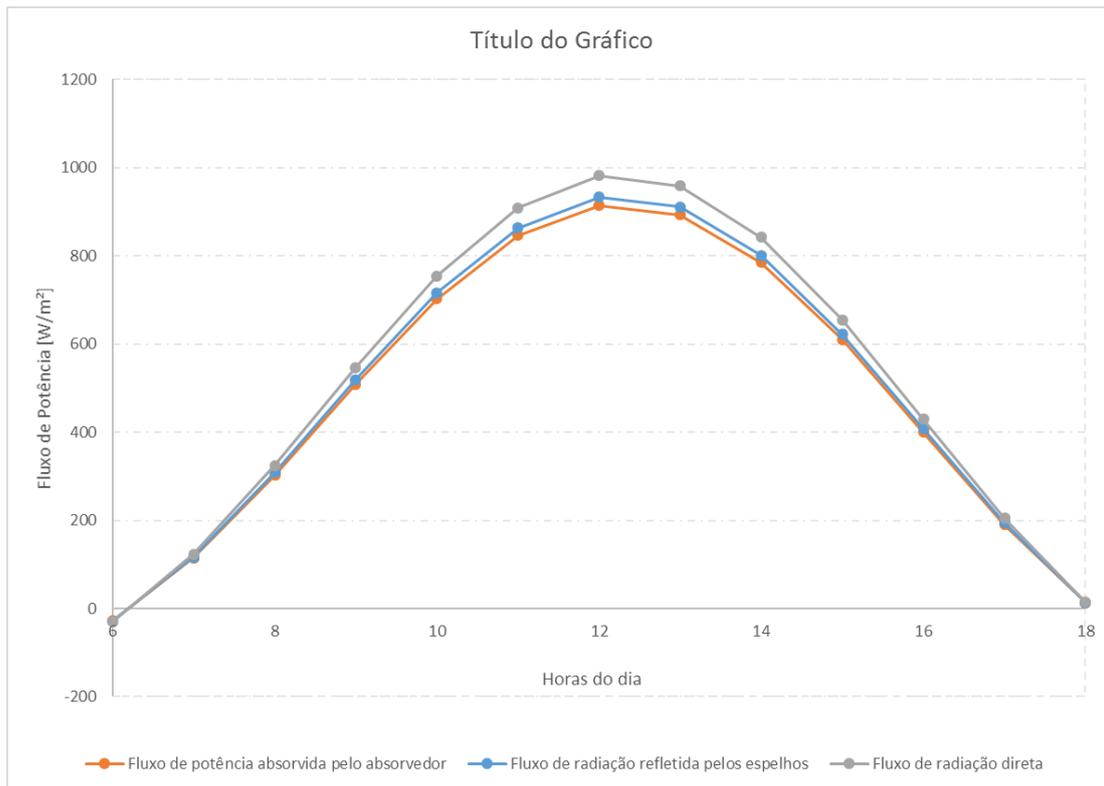


Figura 53. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência que alcança o absorvedor para a cidade de São Gonçalo – PB

Considerando apenas o sombreamento de uma fileira de espelhos a cada hora pelo absorvedor fixo, a curva teórica para essa situação é apresentada na Figura 54. O absorvedor móvel aproveita 93% da radiação refletida pelos espelhos, enquanto o absorvedor fixo aproveita 76%, indicando assim uma eficiência 17% maior do absorvedor móvel quando comparados os absorvedores.

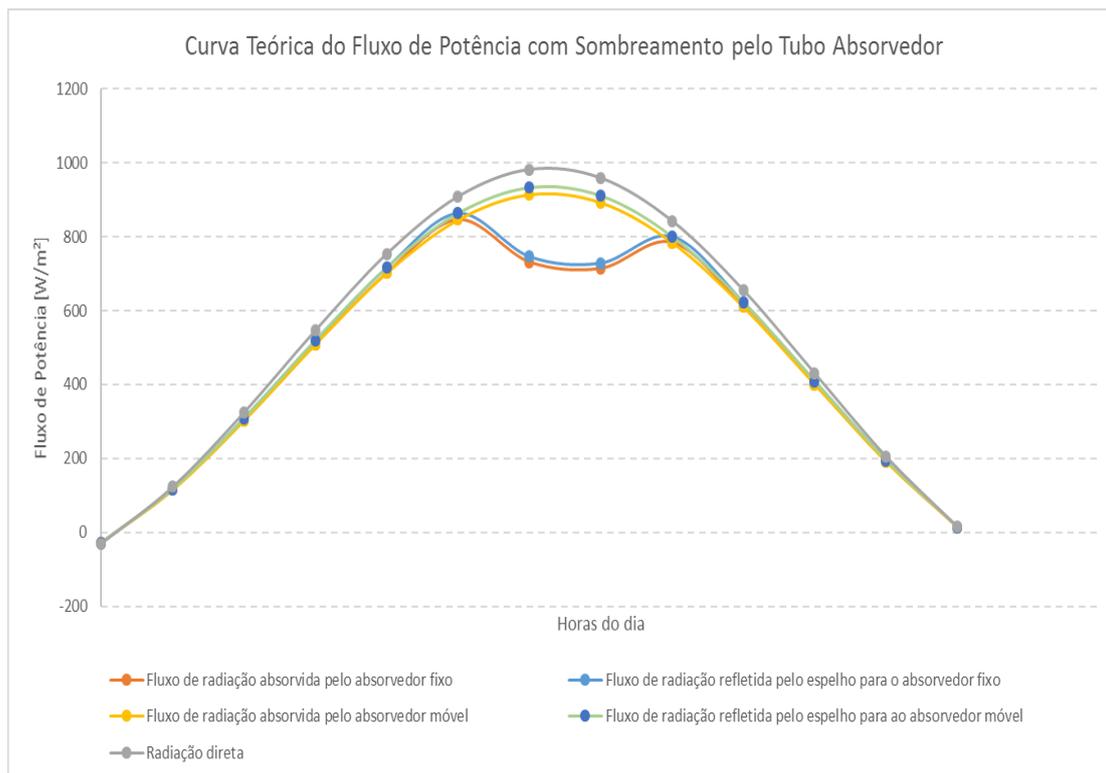


Figura 54. Gráfico da curva teórica do fluxo de potência com sombreamento pelo absorvedor fixo para a cidade de São Gonçalo – PB

A região de São Gonçalo tem uma ótima incidência de radiação, com um alto índice de claridade  $K_t$ , mas no dia 21 de dezembro, segundo dados fornecidos pelo INMET, a cidade de São Gonçalo teve ventos com uma maior velocidade do que a cidade de João Pessoa, o que influi nas perdas convectivas, justificando assim o fato dos valores do fluxo de potência, visto na Figura 55, serem menores em comparação com os valores obtidos em João Pessoa. Foi utilizada a equação (52) para podermos calcular o sombreamento dos espelhos pelo absorvedor.

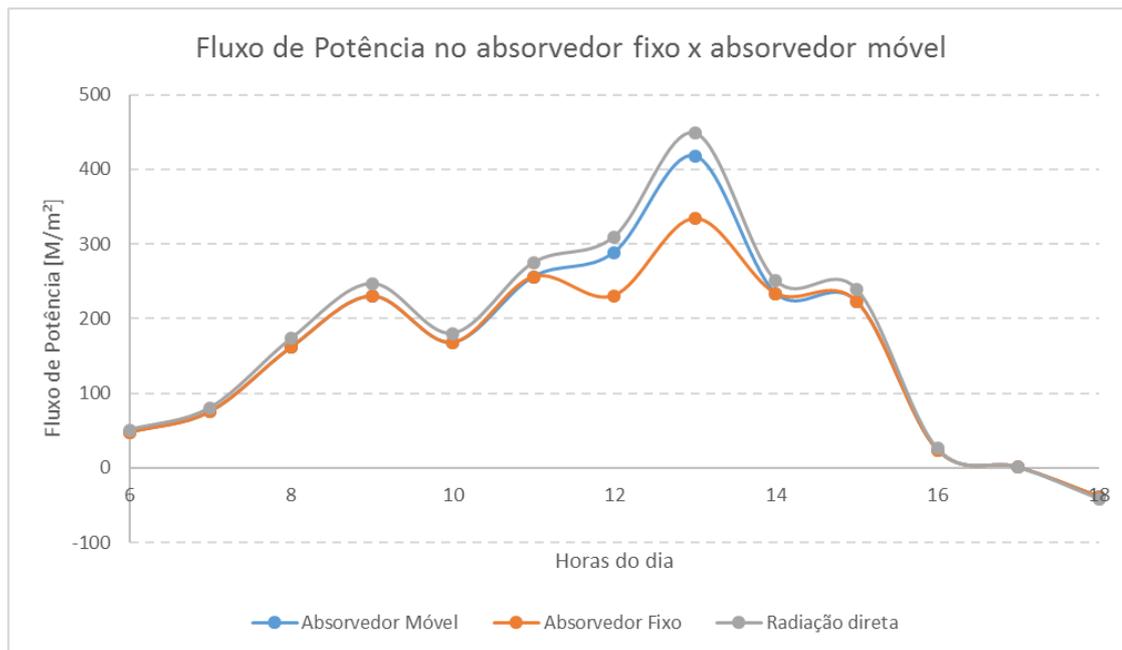


Figura 55. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de São Gonçalo

Mais uma vez foi considerado que o absorvedor sombreia apenas uma fileira de espelhos a cada hora, o absorvedor móvel tem um aproveitamento de 96% da radiação refletida pelos espelhos, enquanto o absorvedor fixo tem 74% de aproveitamento, fazendo com que a eficiência do absorvedor móvel seja 19% maior comparada ao absorvedor fixo.

O gráfico da Figura 56 mostra a energia acumulada no absorvedor fixo x absorvedor móvel. Há um ganho de 7% na energia acumulada do absorvedor móvel em comparação ao absorvedor fixo.

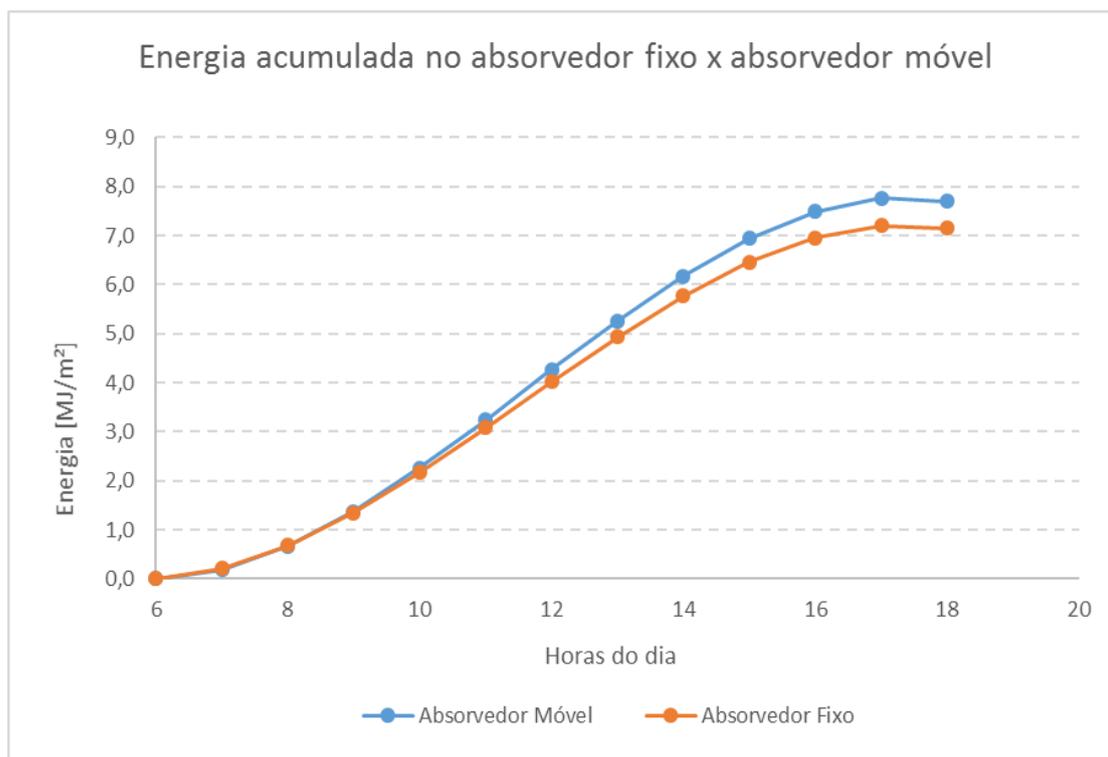


Figura 56. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel para a cidade de São Gonçalo – PB

Pela localização a temperatura e a energia acumulada deveriam ser maiores do as apresentas na simulação tanto para a cidade de João Pessoa, mas pode ter ocorrido de o dia 21 de dezembro de 2015 ter sido um dia com a presença de nuvens, o que interfere bastante nas medições de radiação.

Realizada uma simulação para um coletor, utilizando 150 espelhos com 10 m de comprimento e 2 m de largura cada, diâmetro do tubo de 0,05 m e velocidade de escoamento do fluido no interior do tubo absorvedor de 1 m/s, com altura do absorvedor em 10 m, podemos traçar o gráfico do fluxo de potência para o absorvedor móvel e o absorvedor móvel. Esse gráfico pode ser visto na Figura 57.

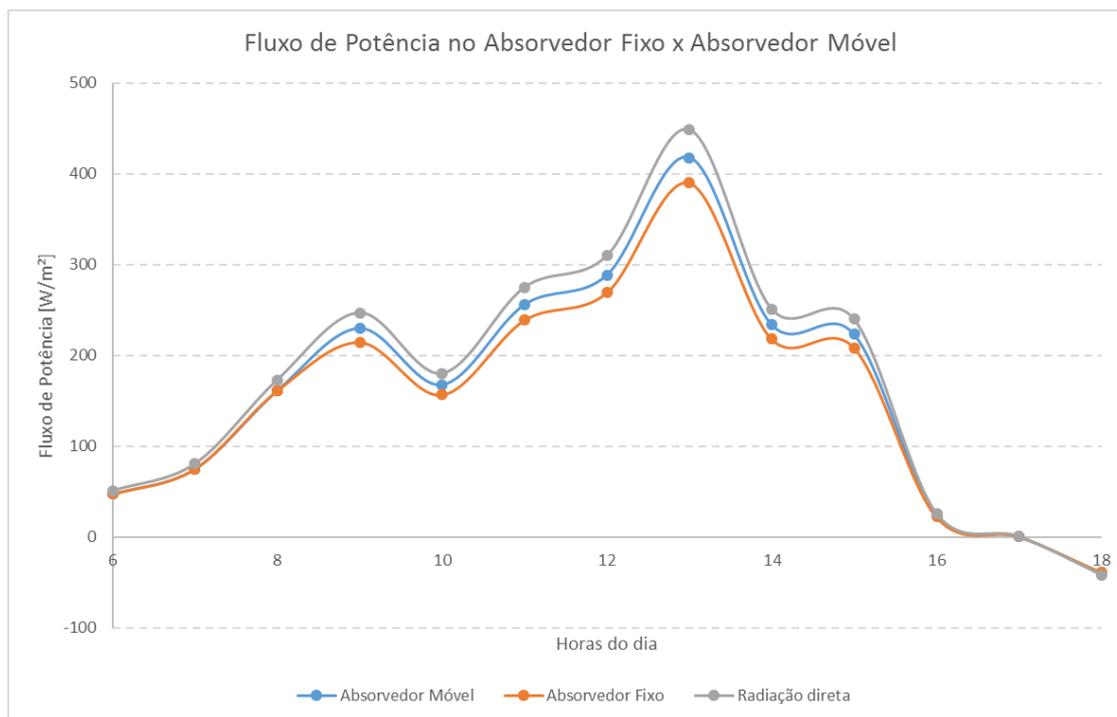


Figura 57. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de São Gonçalo – PB com altura do absorvedor de 10 m

Novamente considerando que o absorvedor fixo sombreia apenas uma fileira de espelhos a cada hora, o absorvedor fixo tem um aproveitamento da radiação refletida pelos espelhos de 87%, enquanto o absorvedor móvel tem 93% de aproveitamento no mesmo quesito. Sendo assim, o ganho de eficiência é de 6% quando usado o absorvedor móvel.

Quando traçamos o gráfico da energia acumulada o resultado é o apresentado na Figura 58. O ganho quando de energia é de 6% do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo, quando comparados a uma altura de 10 m.

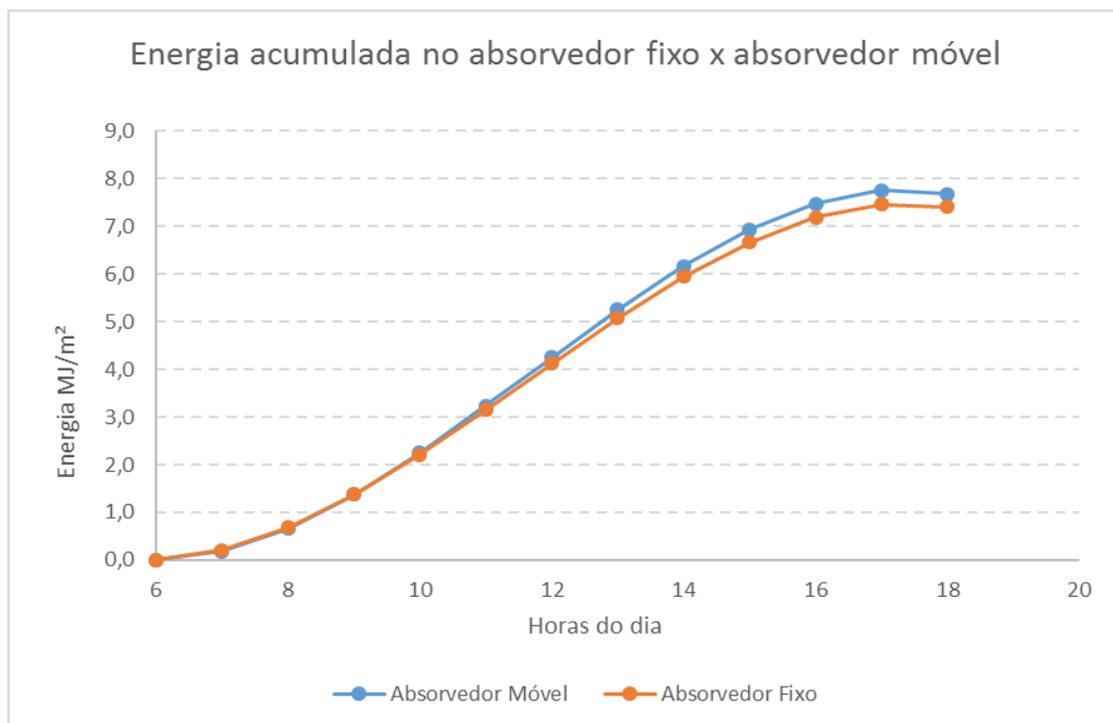


Figura 58. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 10 m para a cidade de São Gonçalo – PB

Tentando minimizar os efeitos do sombreamento do absorvedor fixo nos espelhos, aumentamos a altura do mesmo para 20 m, gerando assim o gráfico visto na Figura 59.

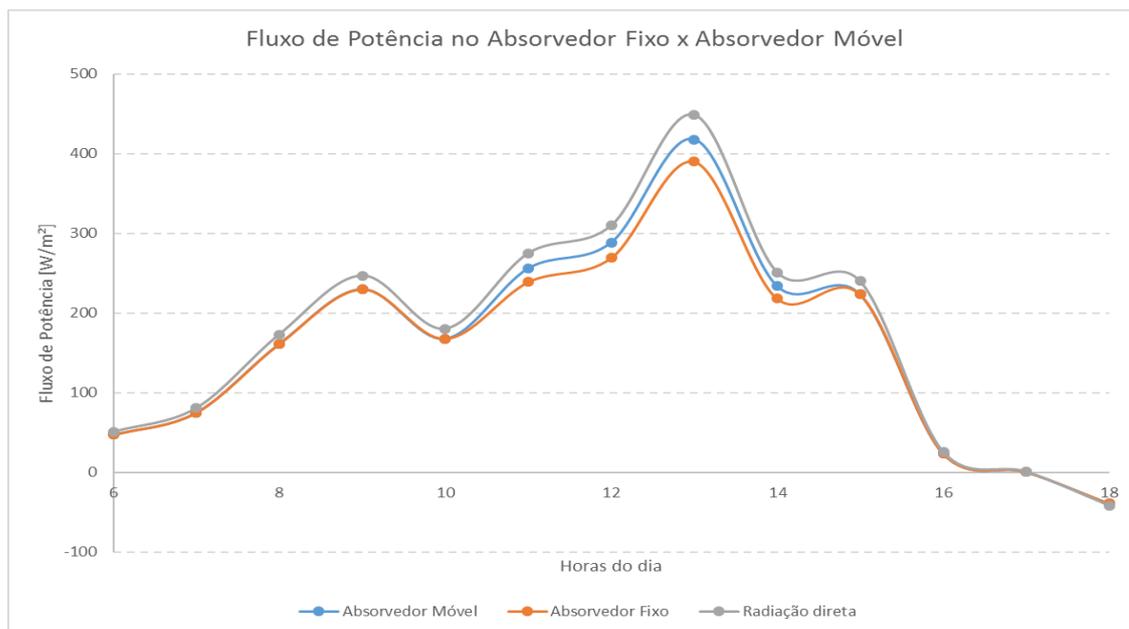


Figura 59. Gráfico do fluxo de potência absorvedor fixo x absorvedor móvel para produção de vapor na cidade de São Gonçalo – PB com altura do absorvedor de 20 m

A perda de eficiência, considerando ainda que apenas uma fileira de espelhos é sombreada a cada hora, é de 7% a cada hora. Se nota no gráfico que aumentando a vantagem do aumento da altura se dá pela razão do sombreamento ter uma menor duração do que quando o absorvedor está a 10 m de altura.

Quando comparamos a energia acumulada o ganho é de 4% do absorvedor móvel sobre o absorvedor fixo. O gráfico da energia acumulada é visto da Figura 60.

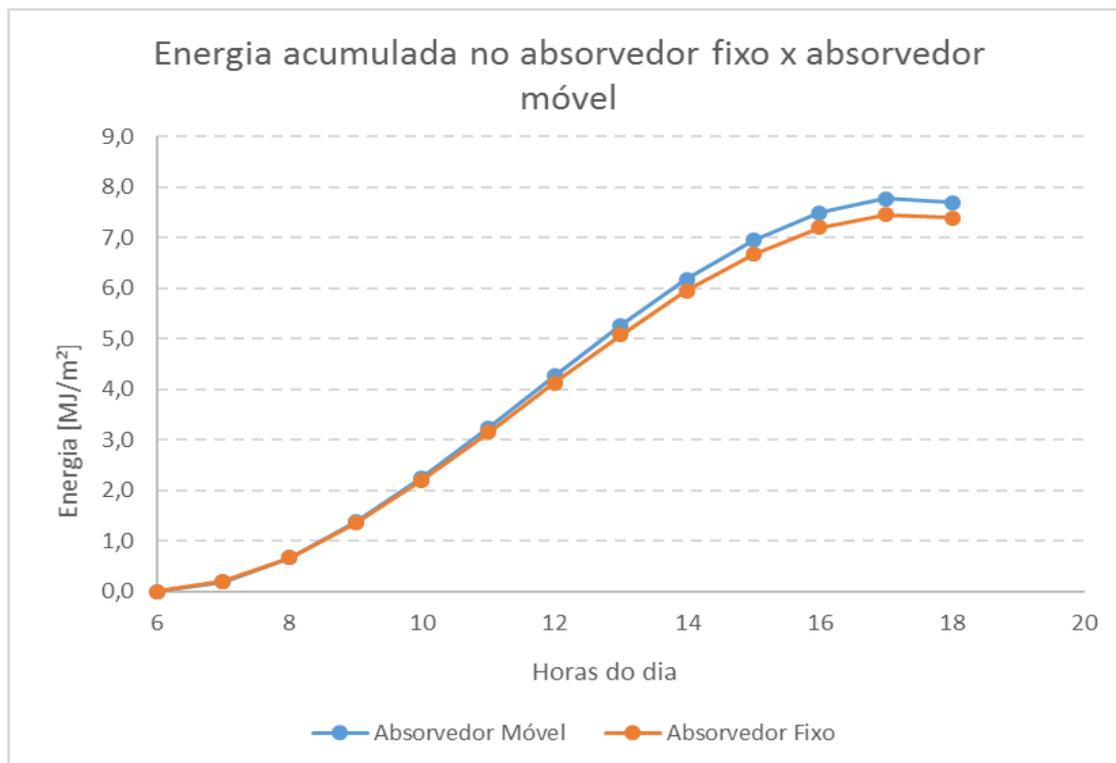


Figura 60. Gráfico da energia acumulada absorvedor fixo x absorvedor móvel com altura do absorvedor de 20 m para a cidade de São Gonçalo – PB

## 12. CONCLUSÕES

A construção do coletor linear Fresnel foi concluída, mas o mesmo ainda não foi posto em funcionamento por motivos alheios a este trabalho. Sendo assim o objetivo geral foi modificado para ser a realização das simulações aqui apresentadas. Quanto aos objetivos específicos, o estudo sobre o coletor solar Fresnel se deu pela revisão do estado da arte em que se encontram os demais estudos realizados sobre o mesmo tema e as simulações foram realizadas com sucesso.

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar que a inovação do uso de um absorvedor móvel com um grau de liberdade é viável. O estudo teórico realizado comprovou por meio dos gráficos apresentados neste trabalho que tal inovação é possível de ser realizada, melhorando assim a eficiência do sistema. Foram realizadas simulações testando alturas diferentes para tentar chegar a uma altura ideal do sistema, e os

resultados mostraram que para uma altura do absorvedor de 3 m praticamente não há sombreamento. Mas, para se ter uma melhor comprovação dos resultados, foram realizadas simulações onde as dimensões do coletor se aproximam das dimensões de um coletor em tamanho real, e os resultados foram condizentes com os simulados para o protótipo. Utilizamos as alturas de 10 m e 20 m de altura para o tubo absorvedor e se notou que quanto maior a altura, menor o sombreamento provocado pelo tubo absorvedor nos espelhos, porém para uma altura maior que 20 m é necessário aumentar as demais dimensões do coletor para evitar problemas estruturais.

Mesmo com o ganho de energia tendo variado entre 3% e 7%, dependendo da altura e a configuração do coletor, podemos concluir então que, pelo menos teoricamente, a inovação do uso de um absorvedor móvel em um coletor solar Fresnel é sim uma tecnologia viável e que pode ser de grande importância no futuro.

### **13. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros baseados na experiência desta dissertação, pode-se tentar realizar as seguintes tarefas:

- Otimização da altura do tubo absorvedor para maior aproveitamento dos raios solares;
- Otimização da quantidade e do tamanho dos espelhos para uma maior reflexão dos raios solares;
- Otimização do diâmetro do tubo absorvedor;
- Utilização de um material de sirva de superfície seletiva para o tubo absorvedor;
- Verificar a possibilidade de utilizar um fluido de trabalho com alta capacidade de absorção e transporte de calor.

## REFERÊNCIAS

**ANEEL Energia Solar.** Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar%283%29.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf), acesso em 25 nov. 2015.

**ATLAS de Irradiação Solar no Brasil** (1998) apud ANEEL Energia Solar (20--). Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar%283%29.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf), acesso em 1 dez. 2015.

**Bayrisches Staatsministerium des Inneren** (2010) apud Städtebauliche Klimafibel Online. Disponível em <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=19&p2=3.2.1>, acesso em 1 dez. 2015.

BIANCHINI, H. M., **Avaliação Comparativa de Sistemas de Energia Solar Térmica**, Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013, p. 25 - 28.

CANAVARRO, D., CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M., **Simultaneous Multiple Surface Method For Linear Fresnel Concentrator With Tubular Receiver**, Elsevier, Solar Energy 110, 2014, p. 105 – 116.

CAU, G., COCCO, D., **Comparison Of Medium-size Concentrating Solar Power Plants Based On A Parabolic Trough And Linear Fresnel Collector**, 68<sup>a</sup> Conferência da Associação Italiana de Engenheiros de Máquinas ATI 2013, Elsevier, Energy Procedia 48, 2014, p. 101 – 110.

CHEMISANA, D., IBÁÑEZ, M., BARRAU, J., **Comparison Of Fresnel Concentrators For Buildings Integrated Photovoltaics**, Elsevier, Energy Conversion And Management 50, 2009, p. 1079 – 1084.

ÇENGEL, Y. A., **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, São Paulo, 3<sup>a</sup> Edição, McGraw-Hill, 2009.

**CSP Science.** Disponível em [http://www.csp-science.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=124:development-of-thermal-model-of-heat-transfer-inside-tubular-collector-for-a-linear-fresnel-csp-system&catid=53:publications&Itemid=71](http://www.csp-science.org/index.php?option=com_content&view=article&id=124:development-of-thermal-model-of-heat-transfer-inside-tubular-collector-for-a-linear-fresnel-csp-system&catid=53:publications&Itemid=71), acesso em 1 dez. 2015.

[http://www.edificioseenergia.pt/pt/noticia/fotovoltaico384gwdecapacidade856glob](http://www.edificioseenergia.pt/pt/noticia/fotovoltaico384gwdecapacidade856globalinstalada)alinstalada, acesso em 08 nov. 2014.

**Das Culturas.** Disponível em <http://dasculturas.com/2013/05/08/4-kms-distancia-entre-a-russia-e-os-estados-unidos-da-america/>, acesso em 1 dez. 2015.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., **Solar Engineering of Thermal Process**, 3<sup>a</sup> edição, John Miley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.

**Esquadrão do conhecimento.** Disponível em <<https://esquadraodoconhecimento.wordpress.com/ciencias-humanas/geografiaregionalizacao-mundial/os-movimentos-da-terra-rotacao-e-translacao/>>, acesso em 1 dez. 2015.

Estrutura do Sol – Ache Tudo e Região., Disponível em <[http://www.achetudoeregiao.com.br/astrologia/estrutura\\_sol.htm](http://www.achetudoeregiao.com.br/astrologia/estrutura_sol.htm)>, acesso em 1 dez. 2015.

Farnell Newark Sensores e Transdutores. Disponível em <<http://www.farnellnewark.com.br/encoderrotativo24bit,product,62K3102,4559348.aspx>>, 27 out. 2015.

GOUTHAMRAJ, K., RANI, K. J., SATYANARAYANA, G., **Design And Analysis Of Rooftop Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator**, International Journal Of Engineering And Innovative Technology (IJEIT), 2º Volume, 11ª Edição, mai. 2013.

GÜNTHER, M., **Advanced CSP Teaching Materials**, Chapter 6 – Linear Fresnel Technology, Enermena, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 20--.

HAAGEN, M., **The Potential Of Fresnel Reflectors For Process Heat Generation In The MENA Region**, Kassel, University Of Kassel, 2013.

HE, J., QIU, Z., LI, Q., ZHANG, Y., **Optical Design Of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators**, Elsevier, Energy Procedia 14, 2012, p. 1960 - 1966

HEFNI, B. E., **Dynamic Modeling Of Concentrated Solar Power Plants With The ThermoSysPro Library (Parabolic Through Collectors, Fresnel Reflectors And Solar-Hybrid)**, Elsevier, Energy Procedia 49, 2014, p. 1127 – 1137.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, Rio de Janeiro, 6ª edição, LTC, 2008.

Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>, acesso em 3 em mar. 2016.

KALOGIROU, S. A., **Solar Thermal Collectors And Application**, Progress In Energy And Combustion Science, 2004, p. 231 – 295.

KLÜPPEL, R., **Apostila Energia Solar**, João Pessoa, 1985

Laboratório de Garagem. Disponível em <<http://labdegaragem.com/forum/topics/motor-dc-de-vidro-eletrico-mabuchi>>, acesso em 27 out. 2015.

LARSEN, S. F., ALTAMIRANO, M., HERNÁNDEZ, A., **Heat Loss Of A Trapezoidal Cavity Absorber For A Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator**, Elsevier, Renewable Energy 39, 2012, p. 198 – 206.

LIN, M., SUMATHY, K., DAI, Y. J., WANG, R. Z., CHEN, Y., **Experimental And Theoretical Analysis On A Linear Fresnel Reflector Solar Collector Prototype With V-Shaped Cavity Receiver**, Elsevier, Applied Thermal Engineering 51, 2013, p. 963 – 972.

LIN, M., SUMATHY, K., DAI, Y., ZHAO, X. K., **Performance Investigation On A Linear Fresnel Lens Solar Collector Using Cavity Receiver**, Elsevier, Solar Energy 107, 2014, p. 50 – 62.

MANOEL, P. S., **Solar Fotovoltaica: Por que já investir na tecnologia do futuro**, Encontro Catarinense da Indústria 2010, Florianópolis, 2010.

MONTES, M. J., RUBBIA, C., ABBAS, R., MARTÍNEZ-VAL, J. M., **A Comparative Analysis Of Configuration Of Linear Fresnel Collector For Concentrating Solar Power**, Elsevier, Energy 73, 2014, p. 192 – 203.

MUÑOZ-ANTÓN, J., ABBAS, R., MARTÍNEZ-VAL, J., MONTES, M. **Going Futher With Fresnel Receiver: New Desing Window For Direct Steam Generation**, SolarPACES 2013, Elsevier, Energy Procedia 48, 2014, p. 184 – 192.

PATSKO, L. F., **Tutorial Montagem da Ponte H**, [S.I.: s.n.], 20--.

REDDY, K. S., KUMAR, K. R., **Estimation Of Convective And Radiative Heat Losses From An Inverted Trapezoidal Cavity Receiver Of Solar Linear Fresnel Reflector System**, Elsevier, The Journal Of Thermal Sciences 80, 2014, p. 48 – 57.

SAIT, H. H., MARTINEZ-VAL, J. M., ABBAS, R., MUNOZ-ANTON, J., **Fresnel-based Modular Solar Fields For Performance/Cost Optimization In Solar Thermal Power Plants: A Comparison With Parabolic Trough Collectors**, Elsevier, Applied Energy 141, 2015, p. 175 – 189.

SEN, P. K., K. ASHUTOSH, K. BHUWANESH, ENGINEER, Z., HEDGE, S., SEN, P. V., DAVIES, P., **Linear Fresnel Mirror Solar Concentrator With Tracking**, 5ª Conferência Internacional Sobre Engenharia Térmica BSME, Elsevier, Procedia Engineering 56, 2013, p. 613 – 618.

SHARMA, V., **Hourly And Monthly Variation In Shading And Blocking Aperture Area In A Linear Fresnel Reflector System**, SHC 2013, International Conference On Solar Heating And Cooling For Buildings And Industry, Elsevier, Energy Procedia 48, 2014, p. 233 – 241.

SINGH, P. L., SARVIYA, R. M., BHAGORIA, J. M., **Thermal Performance Of Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator With Trapezoidal Cavity Absorbers**, Elsevier, Applied Energy 87, 2010, p. 541 – 550.

Städtebauliche Klimafibel Online. Disponível em <<http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=19&p2=3.2.1>>, acesso em 25 nov. 2015.

VALMIKI, M. M., LI, P., HEYER, J., MORGAN, M., ALBINALI, A., ALHAMIDI, A., WAGONER, J., **A Novel Application Of A Fresnel Lens For A Solar Stove And Solar Heating**, Elsevier, Renewable Energy 36, 2011, p. 1614 – 1620.

ZHENG, H., FENG, C., SU, Y., DAI, J., MA, X., **Design And Experimental Analysis Of A Cylindrical Compound Fresnel Solar Concentrator**, Elsevier, Solar Energy 107, 2014, p. 26 – 37.

ZHU, G., WENDELIN, T., WAGNER, M. J., KUTSCHER, C., **History, Current State, And Future Of Linear Fresnel Concentrating Solar Collectors**, Elsevier, Solar Energy 103, 2014, p. 639 – 652.

ZHU, J., HUANG, H., **Design And Thermal Performances Of Semi-Parabolic Linear Fresnel Reflector Solar Concentration Collector**, Elsevier, Energy Conversion And Management 77, 2014, p. 733 – 737.

# ANEXOS

## ANEXO I

Valores de a e b  
Fonte: Klüppel (1985)

Local	Latitude ( $\phi$ )	Altitude (m)	a	b	Ref.
Davis Calif.	$38,53^{\circ}$	8	0,25	0,52	20
Buenos Aires	$-34,7^{\circ}$	20	0,26	0,50	18
Durban (A.S.)	$-29,8^{\circ}$	5	0,33	0,35	12
Capetown (A.S.)	$-33,9^{\circ}$	17	0,20	0,59	12
Stanleyville	$0,5^{\circ}$	437	0,28	0,40	12
Leopoldville	$-4,3^{\circ}$	450	0,21	0,52	12
Singapura	$1,3^{\circ}$	120	0,21	0,48	12
Amazônia	$1,0$ a $-8,3^{\circ}$	<180	$0,29\cos\phi$	0,52	22
Juazeiro (BA)	$-9,4^{\circ}$	375	0,25	0,51	23
São Paulo	$-20$ a $-25^{\circ}$	várias	0,24	0,58	24
Recife, (PE)	$-8^{\circ}$	5	0,26	0,31	25
Rio G. do Sul	$-27$ a $-33,7^{\circ}$	várias	0,23	0,46	21
João Pessoa (PB)	$-7,1^{\circ}$	43	0,28	0,36	30