



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**Alysson Domingos Silvestre**

**DESENVOLVIMENTO DE UM HELIOSTATO PARA  
GERAÇÃO HELIOTERMICA EM TORRES SOLARES**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**2016**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° 04**

**ALYSSON DOMINGOS SILVESTRE**

**DESENVOLVIMENTO DE HELIOSTATO PARA GERAÇÃO HELIOTERMICA  
EM TORRES SOLARES**

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 sistemas de energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Dr. José Maurício A. Matos Gurgel

**JOÃO PESSOA - PB  
2016**

S587d Silvestre, Alysson Domingos.  
Desenvolvimento de heliostato para geração heliotérmica  
em torres solares / Alysson Domingos Silvestre.- João Pessoa,  
2016.  
83f. : il.  
Orientador: José Maurício A. Matos Gurgel  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR  
1. Energias renováveis. 2. Energia solar. 3. Termosolar.  
4. Heliostato. 5. Controle. 6. LabView®.

UFPB/BC

CDU: 620.91(043)

**ALYSSON DOMINGOS SILVESTRE**

**DESENVOLVIMENTO DE HELIOSTATO PARA GERAÇÃO HELIOTERMICA  
EM TORRES SOLARES**

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 sistemas de energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2016.

Prof. Dr. José Maurício A. Matos Gurgel

UFPB/CEAR

Prof. Dr. Marcio Gomes da Silva

IFPB

Prof. Dr. Alberdan Santiago de Aquino

IFPB

Orientador

Dr. José Mauricio A. Matos Gurgel

**JOÃO PESSOA - PB  
2016**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa Arielly, ao meu filho Miguel e aos meus pais, pela paciência, carinho, dedicação, apoio, amor e confiança que sempre me dispuseram ao longo da minha vida e principalmente durante a elaboração deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela demonstração explícita de amor ao entregar a vida de seu filho Jesus na cruz do calvário por amor de nós, pelo dom da vida e da salvação em Cristo, pois por Ele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas.

Ao Prof. Dr. José Mauricio Alves de Matos Gurgel por todo apoio, dedicação para realização deste trabalho, sendo um exemplo de orientador presente e ativo dando todo o suporte necessário para realização do mesmo.

Ao Prof. Dr. Alberdan Santiago de Aquino, pelas contribuições dadas durante a fase de qualificação e experimental deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcio Gomes da Silva e ao Prof. Msc. Jobson Francisco da Silva pelas contribuições dadas durante a fase de qualificação e experimental deste trabalho.

A minha esposa Arielly e ao meu filho Miguel pelo carinho, compreensão e amor que sempre me dedicou.

Aos meus pais que sempre me ensinaram a lutar pelos meus sonhos e anseios e que sempre me apoiou em todas as minhas decisões.

Aos colegas de laboratório Vicente, Thiago, Anderson, Flávio, Ivan e Josemar pela amizade e companheirismo que me dedicaram.

Ao CEAR e a UFPB pela Estrutura.

Ao CNPq pela bolsa de estudos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

*Os soldados de elite é que são condecorados,  
os valentes e corajosos é que são lembrados.*

*(Pregador Luo)*

*" Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,  
a eletricidade e a energia atômica : A vontade*

*(Albert Einstein)*

## RESUMO

Com o aumento das perspectivas mundiais a respeito das energias renováveis e a utilização da energia solar térmica concentrada, com o objetivo de aumentar o fluxo de radiação solar incidente em sistemas térmicos tem se mostrado uma solução viável para geração de energia elétrica. Os dispositivos heliostatos tem a capacidade de rastrear o sol e refletir a radiação em um ponto fixo pré – estabelecido, normalmente conhecido como torre solar localizando se ao meio de um campo de dispositivos heliostatos. As torres solares tem sido alvo de estudos por possuir um grande potencial para geração de energia elétrica. Quanto maior os valores de concentração pretendido do sistema, maiores serão os requisitos de precisão de rastreamento e reflexão do heliostato e da qualidade das superfícies refletoras. Este trabalho tem como objetivo de projeto e construção de um heliostato de dois graus de liberdade para geração de energia em sistemas de torres solares utilizando métodos de controle para rastreamento e reflexão ótima em plataforma LabView. Aplicando algoritmos de rastreamento baseado nas equações de comportamento solar e projeto mecânico permitindo uma dinâmica de dois graus de liberdade foi obtido resultados de 0,201 graus de precisão no rastreamento de reflexão da radiação.

**Palavras-Chave:** Energia Solar. Termosolar. Heliostato. Controle. LabView®.

## **ABSTRACT**

With the increase of global perspectives regarding renewable energy and the use of concentrated solar thermal energy, with the goal of increasing the flow of solar radiation incident on the thermal has been shown to be a viable solution for electric power generation. The heliostats devices have the ability to track the Sun and reflect the radiation in a pre-set fixed point, usually known as solar tracking Tower in the middle of the field of heliostats devices. The solar towers have been aim of studies because they have a great potential for electric generation. The higher the desired concentration values of the system, the higher the accuracy requirements tracking and reflection of the heliostats, and the quality of reflective surfaces will be. This study aims to design and construction of the heliostat of two degrees of freedom for power generation in solar Tower systems using control methods for tracing and reflection on LabView platform. Applying tracking algorithms based on the solar behavior equations and mechanical design, allowing a two degrees' freedom dynamic, it was gain results with 0.201 degrees in precision in the tracking of radiation reflection.

**Keywords:** Solar Energy. Thermal Solar. Heliostat. Control. LabView®

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação da matriz Energética Brasileira;
- Figura 2 - Crescimento do consumo de energia por fonte
- Figura 3 – Representação da matriz Elétrica Brasileira;
- Figura 4 – Comportamento da Geração Hidroelétrica e Termoelétrica com Tarifação de Energia
- Figura 5 – Índice de Radiação no Brasil dado em Wh/m<sup>2</sup> - dia
- Figura 6 – Métodos de utilização da energia solar
- Figura 7 - Fotodiodos instalados em um pistão móvel.
- Figura 8 - Montagem do rastreador e do sensor de precisão do rastreamento.
- Figura 9 – Esboço dos Tipos de Radiação Solar
- Figura 10 – Comportamento solar no solstício e equinócio
- Figura 11 – Representação da declinação solar
- Figura 12 – Comportamento da Declinação Solar Durante um Ano
- Figura 13 - Comportamento da Equação do Tempo Durante um Ano
- Figura 14 – Representação da Altura Solar
- Figura 15 – Ângulo de Zênite.
- Figura 16 – Correlação entre fração difusa e índice de claridade
- Figura 17 – Balanço Energético em um Coletor Solar Térmico
- Figura 18 – Representação do fluxo de energia de um sistema CSP
- Figura 19 – (A) Modelo de Coletor Cilíndrico Parabólico; (B) Coletor Solar Cilíndrico Parabólico em Funcionamento
- Figura 20 - Esquema de uma central de canal parabólico
- Figura 21– Rastreamento orientado no eixo norte-sul com rastreamento do sol de leste a oeste
- Figura 22– (A) Modelo de Coletor Linear Fresnel; (B) Coletor Linear Fresnel em Funcionamento
- Figura 23 – Diagrama esquemático de uma planta LFR
- Figura 24 – (A) Modelo de Discos Parabólicos; (B) Concentrador Solar Tipo Disco Parabólico em Funcionamento
- Figura 25 – Modelo de Torre Solar; (B) Torre Solar e Heliostatos
- Figura 26 – Esquema de uma central de Torre Solar
- Figura 27 - Heliostato
- Figura 28 – Posição Favorável do Heliostato
- Figura 29 – (a) Heliostato com maior área de reflexão (b) Heliostato com menor área de reflexão
- Figura 30 – Proposta Inicial do Heliostato

Figura 31 – Eixos e seus respectivos guias

Figura 32 – Motores e os encoders acoplados aos eixos

Figura 33 - Placa eletrônica de Interface

Figura 34 – Transformador e Borneiras

Figura 35 – Software LabView®

Figura 36 – Placa de aquisição 6009 NI

Figura 37 – Azimute ( $\gamma_s$ ) e Altura ( $\alpha$ )

Figura 38– Algoritmo de Rastreamento Solar

Figura 39 – (a) bissetriz do ângulo (b) ângulos  $\varepsilon$  e  $\Psi$

Figura 40 – Espelho com os respectivos movimentos

Figura 41 – Configuração do Sistema

Figura 42 – Simulação do comportamento da radiação global, difusa, direta e a energia refletida ao absorvedor

Figura 43 – (a) Erro de reflexão, (b) Representação da posição do sol e do heliostato

Figura 44 – (a) Erro de reflexão, (b) Representação da posição do sol e do heliostato

Figura 45 – (a) Erro de reflexão, (b) Representação da posição do sol e do heliostato

Figura 46 – Erro em função da distância do receptor

Figura 47 – Tela 1 do simulador de sistemas solares

Figura 48 - Tela 2 do simulador de sistemas solares

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tabela de Tipos de Superfícies e Respetivos Albedos.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>CAPÍTULO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
1.2.1.	Objetivos Específicos .....	20
<b>2.</b>	<b>CAPÍTULO .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>21</b>
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.</b>	<b>Referencial Teórico.....</b>	<b>26</b>
3.1.1.	Recurso Solar .....	26
3.1.2.	Geometria Sol – Terra.....	27
<b>3.2.</b>	<b>Balço energético em um coletor solar Térmico.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.</b>	<b>Tecnologias De Concentração Solar .....</b>	<b>44</b>
3.3.1.	Coletores Cilíndricos Parabólicos.....	45
3.3.2.	Concentradores Lineares Tipo Fresnel .....	48
3.3.3.	Discos Parabólicos .....	50
3.3.4.	Sistemas de receptor central.....	51
<b>4.</b>	<b>Capitulo .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1.</b>	<b>Resultados e Discursões .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## 1. CAPÍTULO

### 1.1. Introdução

Com quase sete bilhões de pessoas no mundo, necessidades impulsionam mercados, movem indústrias de bens, produtos e serviços, modificam leis estimulam movimentos sociais. A energia é um fator fundamental nas necessidades humanas marcadamente presente em todas as suas atividades. Os diversos momentos do saber científico em paralelo ao desenvolvimento das tecnologias permitiram que variadas fontes energéticas fossem utilizadas ao longo da história humana, por meio de diferentes métodos de conversão e geração. Desta feita, a utilização dos recursos energético é, e sempre será um fator fundamental no suprimento de demanda pela sociedade. Questiona se quais os caminhos, maneiras, métodos ou técnicas que nos levam ao equilíbrio entre consumo, produção energética e sustentabilidade.

A figura 1 demonstra a atual matriz energética brasileira onde pode ser observado a grande variedade de fontes energéticas disponíveis no Brasil com predominância na produção de petróleo, sendo uma fonte energética não renovável. A figura 2 apresenta o crescimento do consumo de energia por fonte a partir da década de 70 a 2014, onde é notável o crescimento do consumo do petróleo e da eletricidade e também perceptível a redução do consumo de lenha.

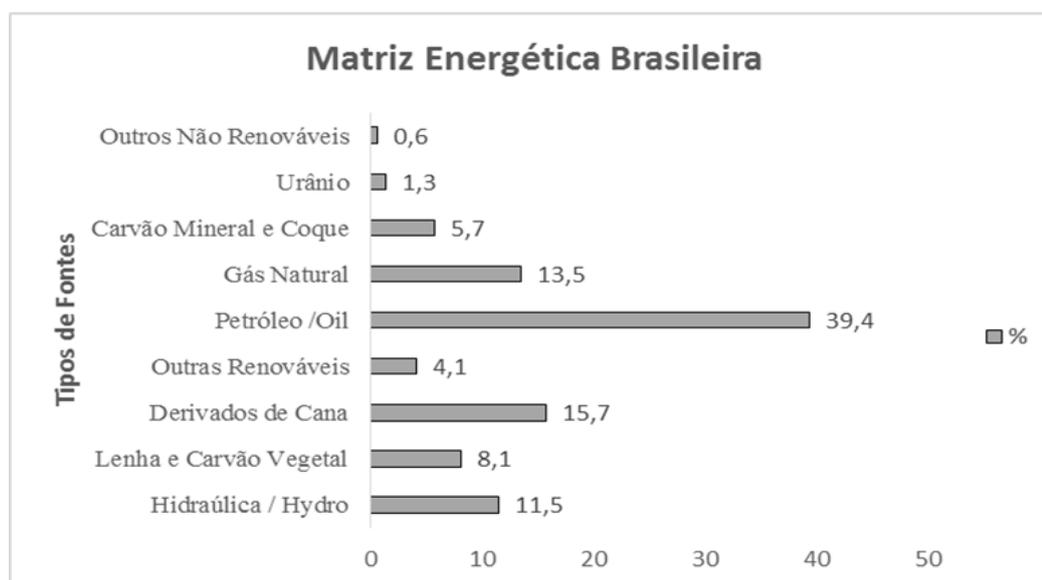


Figura 1 – Representação da matriz Energética Brasileira;

Fonte: BEN, 2015, adaptado.

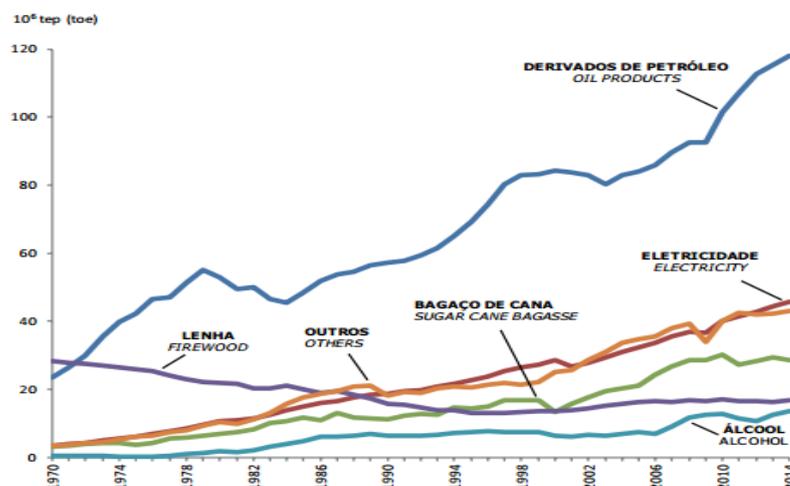


Figura 2 - Crescimento do consumo de energia por fonte

Fonte: BEN, 2015

Segundo BEN (2010), a oferta interna de energia elétrica no Brasil, em 2009, foi de 506,1 TWh, superior 0,2% em relação ao ano anterior. O consumo final foi de 426,0 TWh, menor em 0,5% em comparação a 2008. O aumento do consumo final de eletricidade no país em 2013, de 3,6%, com destaque para os setores residencial e comercial, foi atendido a partir da expansão da geração térmica. A figura 3 apresenta a matriz elétrica Brasileira, segundo o balanço energético de 2015, expondo a diversificação da matriz elétrica brasileira com predominância em hidroeletricidade.

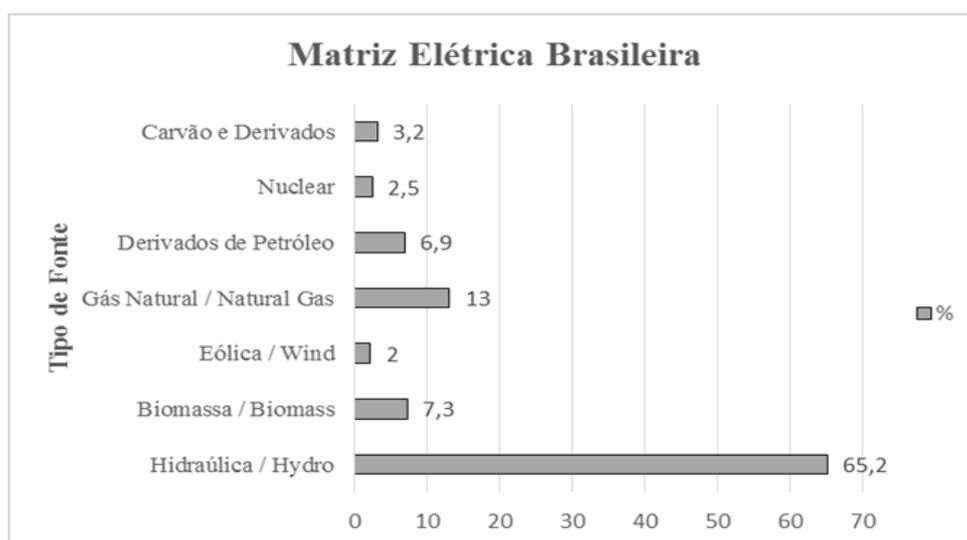


Figura 3 – Representação da matriz Elétrica Brasileira;

Fonte: BEN, 2015; adaptado

Pode ser observado na figura 4 o comportamento da geração de energia hidroelétrica acompanhada paralelamente a produção de energia por termoeletricas entre 2003 e 2015, podendo ser visto também o crescimento da tarifa de energia elétrica, dado por MW/h, ao longo desse período. Concomitantemente a baixa de produção de hidroeletricidade em meados de 2012 devido ao período de baixas chuvas houve um aumento significativo na produção termoeletrica que tem por característica um maior custo de produção e um maior índice de impacto ambiental agregado acarretando assim um aumento na tarifa de energia elétrica para os consumidores finais.

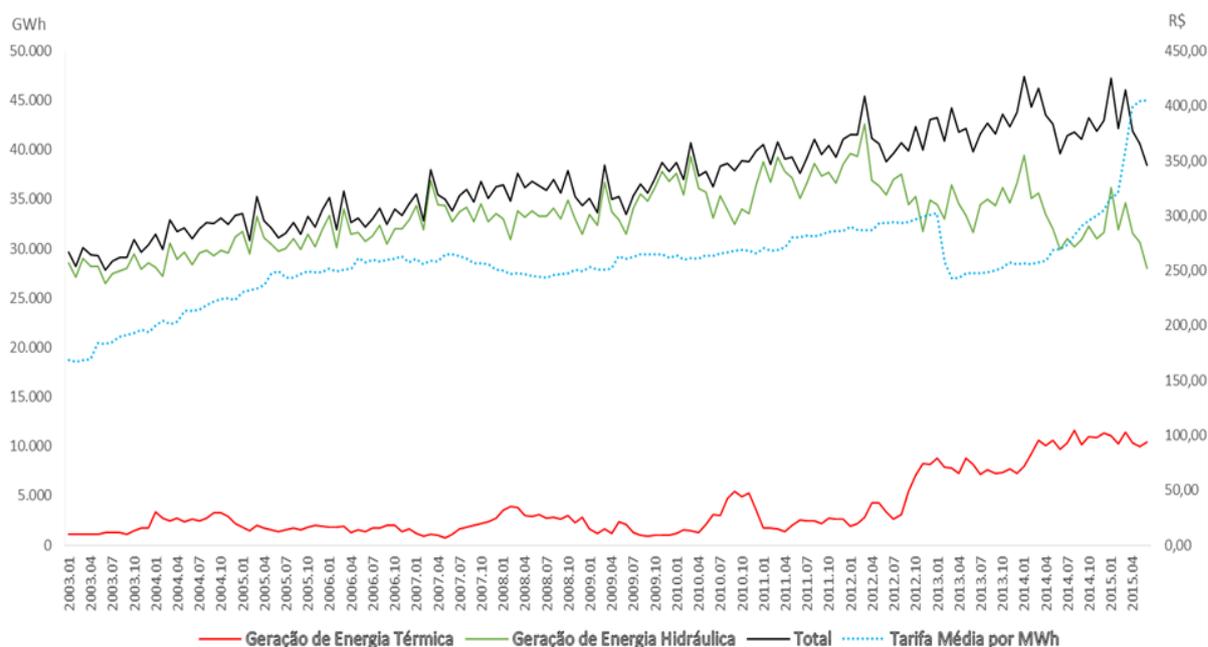


Figura 4 – Comportamento da Geração Hidroelétrica e Termoeletrica com Tarifação de Energia

Fonte: BEN, 2015; Ipea Data, 2015; adaptado

A comunidade acadêmica tem apresentado diversos estudos a respeito dos danos causados ao ecossistema terrestre pelo aumento excessivo da produção de rejeitos energéticos poluentes, a exemplo, gases da queima de CO<sub>2</sub>, que podem causar mudanças irreversíveis caso não sejam evitadas. Mudanças efetivas devem ser consideradas na filosofia

de consumo de energia atual.

A eficiência no uso da energia, em especial a elétrica, está na pauta no mundo desde os choques do petróleo na década de 70, quando ficou latente que as reservas fósseis não seriam baratas para sempre, nem o seu uso seria a pouco prejuízo para o meio ambiente. Logo se descobriu que o mesmo “serviço de energia” (iluminação, força motriz e os usos que proporciona aquecimento, condicionamento ambiental, equipamentos eletroeletrônicos e outros.) poderia ser proporcionado com menor demanda de energia, influenciando economicamente, ambientalmente, socialmente e culturalmente. O uso de eficiente de energia tornou se fundamental. Equipamentos com menor consumo de energia (eficientes) e o uso das energias renováveis notoriamente é indispensável para obtenção da economia do baixo carbono.

Segundo o (BEN,2015), em 2013, a participação de renováveis na matriz energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequena redução devido à menor oferta de energia hidráulica pelas condições hidrológicas desfavoráveis no período seco. Diante dessa conjuntura, para manter a geração de eletricidade no Brasil em níveis constantes no que diz respeito à participação de fontes renováveis de energia, se faz necessário avaliar o potencial e estudar a aplicabilidade e adaptação à realidade brasileira de outras fontes renováveis utilizadas para a geração de energia elétrica, à exceção da hidroeletricidade (Burgi, 2013). A capacidade instalada de parques eólicos no Brasil, a exemplo, vem crescendo ao longo dos últimos anos, impulsionada por preços de energia competitivos, até mesmo em níveis internacionais, observados nos últimos leilões de energia. A potência eólica instalada atingiu 2.202 Mw, o que proporcionou um acréscimo de 30,2% na geração de eletricidade a partir dessa fonte em 2013 e no ano de 2014 dobrou a produção. (EPE, 2013)

É nítida a crescente oferta de energia eólica no Brasil e no mundo, com base na tecnologia bem desenvolvida e eficiente aproveitando o vento como fonte de energia. Os fatores ambientais e a necessidade da diversificação da matriz energética mundial, vêm sendo o motivo para o desenvolvimento, expansão e utilização da energia solar em todo o mundo. O Brasil é um país com alto índice de radiação incidente em seu território, logo, é importante que o país explore essa grande fonte de energia renovável que apresenta diversos benefícios por ser uma energia, limpa, confiável, segura, gratuita, silenciosa e livre de qualquer poluição. Pode ser observado na figura 5, os índices de radiação solar no território brasileiro e em cada região, podendo ser observado os maiores índices de radiação solar no

Nordeste. Com disponibilidade entre  $5000 \text{ Wh/m}^2 - \text{dia}$  e  $6300 \text{ Wh/m}^2 - \text{dia}$  o nordeste possui grandes áreas que podem ser aproveitadas para empreendimentos de produção energética em grande escala. As outras regiões do país com disponibilidade entre  $4000 \text{ Wh/m}^2 - \text{dia}$  a  $5000 \text{ Wh/m}^2 - \text{dia}$  também possui níveis de radiação aceitáveis para produção de energia solar.

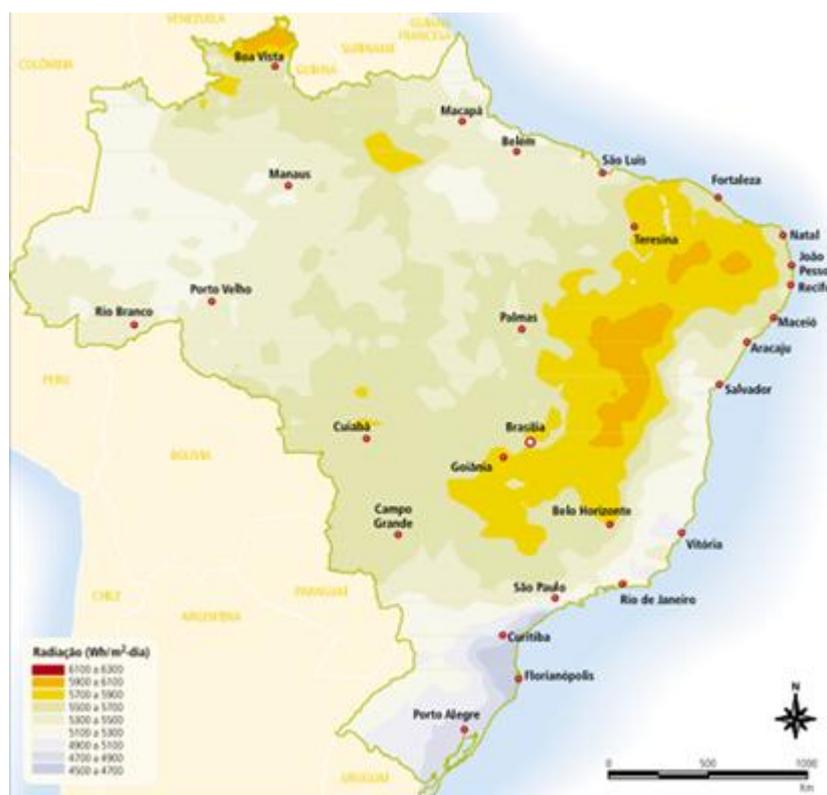


Figura 5 – Índice de Radiação no Brasil dado em  $\text{Wh/m}^2 - \text{dia}$

Fonte: BEN, 2015; Ipea Data, 2015; adaptado

Segundo (Manoel, 2010) o uso da energia solar seria uma solução viável para a problemática energética do país, 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. Desta forma, a energia solar, aproveitada fundamentalmente através dos processos térmicos, fotovoltaicos, químicos e biológicos, constitui uma alternativa eficaz e imprescindível para uma relação mais equilibrada entre produção energética e sustentabilidade. A figura 6 apresenta os métodos convencionais da

utilização da energia solar de maneira direta e indireta.

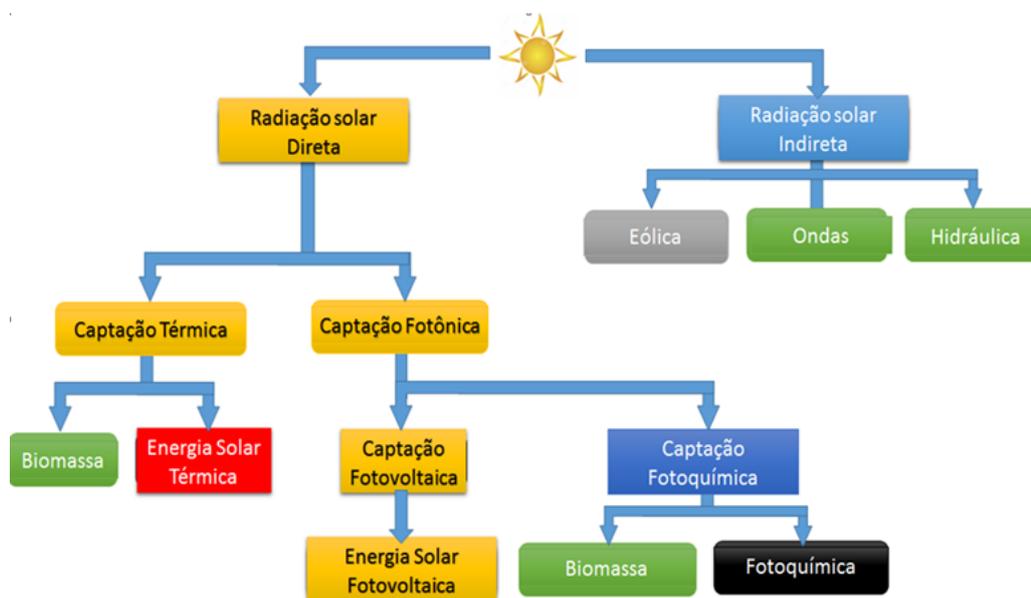


Figura 6 – Métodos de utilização da energia solar

Fonte: Pereira, 2011. Adaptado.

Dentre os métodos convencionais para a geração de energia elétrica utilizando o sol, destacam-se a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica concentrada. Onde a primeira utiliza-se de placas fotovoltaicas constituídas de materiais semicondutores para a conversão da radiação solar em eletricidade. Esta última, internacionalmente conhecida como CSP (*Concentrated Solar Power*), é o principal assunto deste trabalho. As usinas de concentração solar, CSPs, ou centrais termosolares, ou centrais heliotérmicas fazem uso de superfícies refletoras para concentrar a radiação solar em um receptor onde ocorrerá a conversão energética.

Algumas tecnologias de concentração solar como: coletores cilíndricos parabólicos, coletor linear Fresnel, discos parabólicos e torres solares possuem receptores para reflexão da radiação solar e necessitam de rastreamento solar para posicionamento ótimo com o intuito de refletir o maior nível de radiação solar possível. Alguns necessitam apenas de rastreamento solar em um único eixo (grau de liberdade), outros precisam serem controlados em dois eixos. O tipo torre solar por sua vez, para a satisfatória obtenção de um fluxo concentrado de energia solar, utiliza dispositivos heliostatos que nada mais são que uma estrutura fixa provida de espelhos com o auxílio de um sistema de controle com habilidade de posicionar o espelho de forma que o raio refletido atinja o coletor central. Estes

dispositivos possuem construção mecânicas diversificadas e algoritmo de controle complexos. Quanto maior a taxa de concentração, maiores são as exigências de precisão dos dispositivos de rastreamento para ambas as possibilidades, pois os ângulos de aceitação dos concentradores tornam-se menores. Com isso o objetivo deste trabalho é contribuir com inovação tecnológica no desenvolvimento de um sistema automatizado heliostato para reflexão da incidência solar com o propósito de gerar de energia elétrica através de processos termodinâmicos em torres solares.

## **1.2. Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal contribuir com inovação tecnológica no projeto, desenvolvimento e controle de um sistema automatizado heliostato para reflexão dos raios solares com o propósito de gerar de energia elétrica através de processos termodinâmicos.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- a) Complementar e atualizar a revisão bibliográfica;
- b) Desenvolver uma configuração de projeto mecânico para o heliostato;
- c) Elaborar circuitos eletrônicos de interface e controle;
- d) Desenvolver e implementar algoritmos computacionais baseados nas equações solares para controle de captação de incidência solar e reflexão ótima;
- e) Desenvolver um sistema de supervisor para monitoramento local e remoto do dispositivo.

## 2. CAPÍTULO

### 2.1. Revisão Bibliográfica

A grande maioria dos sistemas de rastreamento solar ativo é controlada por circuitos eletrônicos que por meio de lógica de programação e sensores óticos, determinam o posicionamento ideal do Sol, de acordo com o melhor índice de radiação, fazendo com que os módulos fotovoltaicos e os espelhos fiquem perpendicular aos raios do Sol. Com o baixo custo dos semicondutores acarretaram redução dos preços dos microprocessadores e microcontroladores, com isso os circuitos de rastreamento solar passaram a ser baratos e efetivos ao seu propósito.

Sistemas sofisticados usam processadores que executam cálculos precisos de posição azimutal e de altura solar para qualquer dia do ano, horário solar real e localização geográfica (latitude, longitude e altitude), acionando motores elétricos de precisão como os de passo (step motor) ou motores com circuitos realimentados, para uma frenagem precisa. Estes modelos são usados em sistemas que requerem alta precisão como em concentradores de dois eixos (OLIVEIRA, 2007).

Existem outros sistemas baseados em relógios, discos perfurados, sensores térmicos, pares metálicos e outros. Na escolha do sistema a ser utilizado, itens como custo de implementação, manutenção e controle devem ser considerados, mas o principal é atender à precisão necessária em cada projeto.

A comunidade científica desenvolve equipamentos de seguimento solar para geração de energia, ou utilizam os mesmos em pesquisas. Estes dispositivos são empregados em concentradores de energia ou aparelhos de medição (radiômetros), em transformação térmica e em conversão fotovoltaica. O objetivo do equipamento de seguimento solar é manter a superfície de conversão, instalada sempre voltada para o Sol.

(Zogbi et al. 1984). Desenvolveram um rastreador baseado em um sensor que utiliza quatro foto-diodos que são responsáveis pela detecção da posição do sol. Estes sensores são localizados em um pistão cilíndrico com quatro ranhuras onde os mesmos são montados. Na posição alta, o sistema é capaz de efetuar o alinhamento mais rapidamente, mas sem muita precisão. Na posição baixa, a localização do sol pode ser feita com mais precisão, atuando como um ajuste fino.

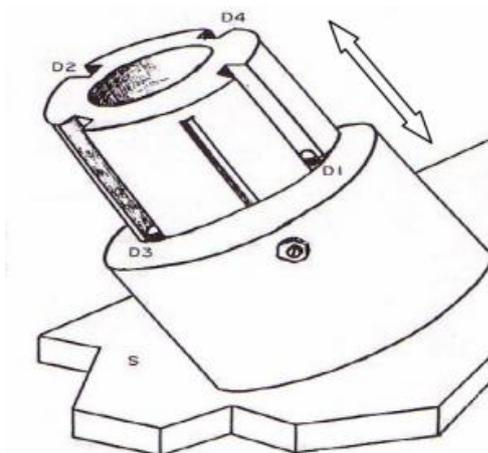


Figura 7 - Fotodiodos instalados em um pistão móvel.

Fonte: Zogbi et al. (1984).

(Fraga, 1989). Desenvolveu um gerador fotovoltaico em um sistema CEC (concentrador elástico composto). (Costa, 1993). Desenvolveu em sua dissertação de mestrado um sistema de conversão fotovoltaico acoplado a um concentrador do tipo CPC (concentrador parabólico composto).

(Poulek, et al., 1998). Os autores descrevem um seguidor solar onde o eixo motor, alimentado por corrente contínua, é acionado diretamente por um arranjo de células fotovoltaicas (formando uma célula com duas faces). As células são instaladas com um ângulo de inclinação de  $20^\circ$  em relação à reta normal ao conjunto de painéis fotovoltaicos. Desta forma o seguidor não necessita de baterias ou sistema eletrônico de controle. Este equipamento pode funcionar como seguidor com eixo móvel horizontal norte-sul ou polar (com ângulo de rotação ou seguimento de até  $120^\circ$ ), bastando fazer os ajustes e arranjos de instalação para cada caso.

(Poulek, et al., 2000). Os pesquisadores desenvolveram um seguidor solar de montagem muito simples. Pode ser usado no espaço (satélites) ou na superfície terrestre. É baseado no uso de novas células fotovoltaicas (bi-faciais), para o acionamento direto do eixo motor que suporta os módulos fotovoltaicos. O eixo motor pode girar  $360^\circ$  e não necessita de sistemas eletrônicos de controle. O ganho alcançado pelo sistema é de até 95% do obtido por um seguidor ideal.

(Poulek, et al., 2000). Este trabalho relata, de forma sucinta, um concentrador com seguidor solar polar. O mesmo utiliza um concentrador tipo V, que é instalado no eixo motor

do seguidor solar, mas de forma que apenas a metade do concentrador usual é utilizada. Dois módulos são instalados, um de cada lado do concentrador e dependendo da refletância do material de revestimento do mesmo o fator de concentração pode chegar a 1,7 vezes.

(Abouzeid, 2001). O autor descreve um seguidor solar que utiliza como elemento impulsor do equipamento um motor de passo. Com o uso deste tipo de motor não é necessário usar sistemas mecânicos sofisticados. O sistema de controle do motor e posicionamento do sistema é realizado por um controlador programável. Os sensores utilizados são duas células fotovoltaicas. O tipo do seguidor montado é polar. A precisão do passo é de  $7,5^\circ$ .

(Feuermann et al. 2002). Desenvolveram um sistema de rastreamento para um concentrador parabólico que por sua vez, utilizando um refletor secundário, dirige o feixe concentrador para uma fibra ótica, formando um guia de luz. O sistema possui uma concentração de 11000 a 12000 sóis e foi montado com partes não comerciais e itens personalizados. Tem aplicação em cirurgias com auxílio da energia solar concentrada.



Figura 8 - Montagem do rastreador e do sensor de precisão do rastreamento.

Fonte: Feuermann et al. (2002).

(Naidoo et al. 2003). Efetuaram uma avaliação do desempenho de um coletor

parabólico linear com rastreamento baseado na precisão com a qual o coletor segue o movimento do sol. Para esta avaliação, um rastreador operado por um controlador lógico programável (CLP) S7-300 armazenou o software de controle e também o algoritmo de posicionamento solar, PSA (Positional Solar Algorithm) definido por Blanco-muriel et al. (2001). O sistema possui uma estratégia de controle que é efetuada em passos de  $0,410^\circ$  que são repetidos a cada 69,12s o que proporciona um erro médio de  $0,2^\circ$ . Um encoder incremental de rotação (dispositivo que permite indicar a posição angular) foi utilizado para detectar o movimento de rotação do rastreador provendo realimentação da posição angular absoluta para o controlador.

(Heinz, et al., 2003). Os autores apresentam um sistema de concentração que utiliza seguimento solar polar e espelho parabólico (duplo estágio), alcançam uma relação geométrica de concentração de até 300 vezes. Este valor é obtido normalmente com uso de seguidores de dois eixos. O trabalho foi realizado para aplicação em geração elétrica através de concentração fotovoltaica.

(Vilela, et al., 2003). Estudo com dois sistemas de conversão fotovoltaica, um com seguidor solar (de ajuste leste - oeste) e outro fixo. Os mesmos foram utilizados para bombeamento de água. O experimento fez comparação do aumento de rendimento do conjunto com seguidor em relação ao fixo. Foi verificado o acréscimo de 19% e 24% da irradiação coletada pelo sistema móvel em relação ao fixo. O aumento da quantidade de água bombeada pelo sistema com seguimento em relação ao fixo foi de 37% e 41%, respectivamente aos acréscimos de radiação citados.

O sistema de seguimento utilizado tem um eixo móvel (tipo polar), com inclinação de  $20^\circ$  (Recife, latitude  $-8,03^\circ$ ). O ajuste de posicionamento é realizado por controle eletrônico, que usa dois sensores LDR (resistor dependente de luz) conectados na forma diferencial, para determinar quando o conjunto está em frente ao Sol.

(Roth, et al., 2004). Os autores descrevem um seguidor solar de dois eixos. O equipamento usa dois pequenos motores de corrente contínua para o movimento de correção do azimute da superfície e inclinação. O mecanismo foi utilizado para posicionar um pireliômetro em frente ao Sol, para efetuar medidas de radiação direta. O equipamento ainda utilizou um sensor para detectar noite ou dia, e um sensor de 4 quadrantes para determinar a posição solar. Todo o sistema é controlado por um processador. Os autores informam da possibilidade de utilizar o projeto em sistemas maiores, em painéis solares e concentradores.

(Bakos, 2006). Propôs um sistema de rastreamento solar em dois eixos que está

dividido em três partes, mecanismo eletromecânico, sensor de posicionamento e software de controle. O mecanismo de movimentação é composto por 4 relés e dois circuitos eletrônicos sendo um dos circuitos conectados ao sensor e o outro a um computador. Os quatro relés estão conectados aos motores de corrente alternada que por sua vez estão conectados mecanicamente a redutores de velocidade.

(Canãda, et al., 2007). Este trabalho descreve o desenvolvimento de um seguidor de dois eixos, utilizado para medidas de radiação solar através de um espectro radiômetro. São utilizados dois motores de passo para correção do azimute e inclinação do conjunto. O posicionamento do instrumento em relação ao Sol é determinado por cálculos. Um diodo emissor de luz e um fotodetector são usados como chave liga-desliga, para através de cortes na base do seguidor, indicar a posição inicial do seguidor e norte geográfico. O sistema é totalmente controlado por um computador, tanto para o hardware, como para a aquisição dos dados dos instrumentos de medida. O software foi desenvolvido em um compilador C e todo o controle é realizada através da porta paralela do computador.

(Monteiro, 2007). Projetou e construiu um sistema de controle de baixo custo para rastreador de um eixo.

(Oliveira, 2007). Desenvolveu um rastreador solar de um eixo de baixo custo sem a utilização de baterias para o seu funcionamento.

(Mavromatakis, et al., 2008). Neste trabalho é apresentado um novo seguidor azimutal, que através de uma mecânica sofisticada e com apenas um motor elétrico, faz o movimento de correção do azimute e inclinação da superfície de conversão. O ajuste da inclinação é condicionado a uma regulagem, que considera o solstício de inverno e verão. Não tem a mesma precisão de um sistema de dois eixos (com dois motores), mas obtém um ganho de até 98% de um sistema ideal de seguimento solar (dois eixos).

### 3. CAPÍTULO

#### 3.1. Referencial Teórico

##### 3.1.1. Recurso Solar

Inegavelmente, o sol é a maior fonte de energia conhecida pela humanidade, o potencial da energia solar é inesgotável, sendo o Brasil um país onde grande parte do seu território está localizado em regiões tropicais, cuja insolação média durante o ano se situa entre 16 e 20 MJ/m<sup>2</sup>/dia (CRESESB, 2000). A energia solar que atinge a Terra chamada de insolação (ou Radiação Solar), na realidade, uma medida da potência instantânea que atinge uma determinada área na Terra [W/m<sup>2</sup>], podendo variar ao longo do tempo, seu valor máximo é usado no projeto de sistemas solares para determinação da taxa máxima de entrada de energia no sistema.

Segundo (Oliveira, 2007) as medidas atuais determinam que cada metro quadrado na Terra absorve do Sol em média anual uma potência de 1367 W/m<sup>2</sup>, com variação de 0,3% durante o ciclo solar de 11 anos. Por esse fluxo determina-se a potência radiante do Sol em  $4 \times 10^{26}$  W ou  $4 \times 10^{33}$  ergs/s. Onde o valor da constante solar é  $I_{sc} = 1367$  W/m<sup>2</sup>.

Algumas definições importantes precisam ser descritas para o entendimento das equações usadas em energia solar.

1. **Radiância (W/m<sup>2</sup>)** - Taxa de energia radiante incidente em uma superfície por unidade de área desta radiação (Wh/m<sup>2</sup> ou J/m<sup>2</sup>), energia incidente por unidade de área em uma superfície, obtida por integração da radiação em um tempo específico.
2. **Radiação Direta** - Radiação solar recebida do Sol sem dispersão da atmosfera terrestre.
3. **Radiação Difusa** - Radiação solar recebida do Sol, após sofrer dispersão atmosférica.
4. **Radiação de Albedo ou Refletida** - Parte da energia recebida sobre a superfície terrestre é reenviada para o espaço sob a forma de energia refletida.
5. **Radiação Global** - Soma dos componentes, direta e difusa recebida em uma superfície.

A radiação global ou total é dada pela soma da radiação direta, radiação difusa e radiação de albedo. Na figura abaixo pode ser observado a representação das radiações.



Figura 9 – Esboço dos Tipos de Radiação Solar

Fonte: Pereira, 2011

### 3.1.2. Geometria Sol – Terra

A terra redige uma orbita elíptica ao redor do sol, ocupando os extremos da elipse. Quando está mais afastado do sol denomina - se afélio. No momento em que a terra está mais próxima, denomina - se periélio, podendo ser observado na figura 10.

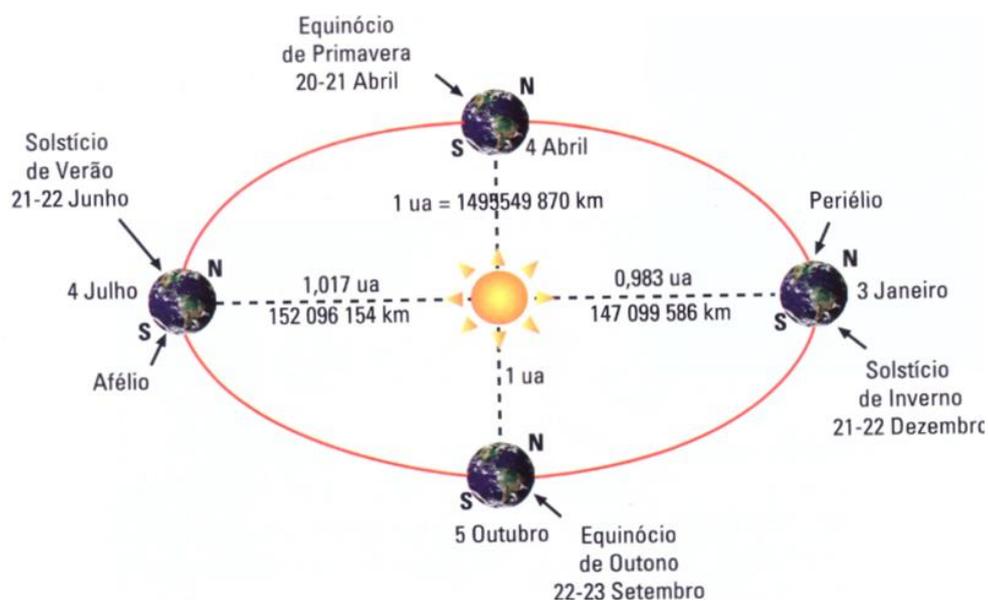


Figura 10 – Comportamento solar no solstício e equinócio

Fonte: Pereira, 2011

Devido a inclinação da terra, a direção norte – sul geográfica está desviada a direção norte – sul do campo magnético terrestre. O eixo de rotação, chamado de eixo polar, é quase perpendicular ao plano da elipse, formando um ângulo com a normal ao plano da órbita de valor  $23^{\circ}27'$ . A linha do equador está inclinada aproximadamente  $23^{\circ}27'$  sobre o plano da órbita com relação ao sol. Desta feita, durante a translação, a declinação varia em  $23^{\circ}27'$  norte até  $23^{\circ}27'$  sul e vice – versa.

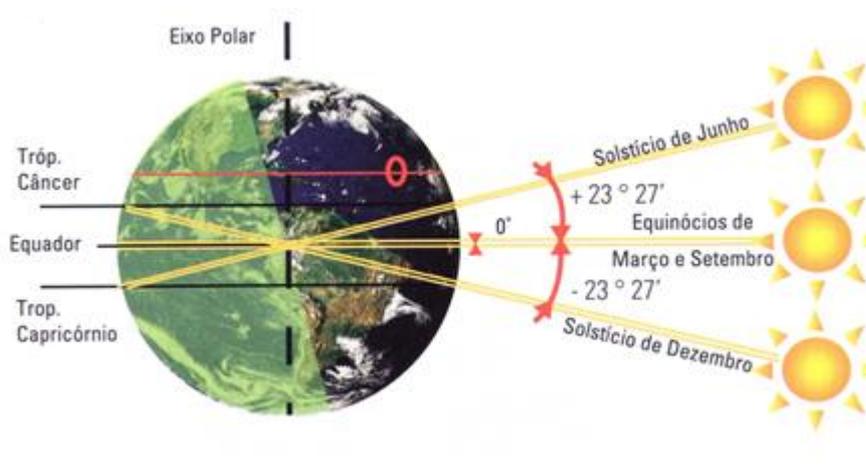


Figura 11 – Representação da declinação solar

Fonte: Pereira, 2011, Adaptado.

Segundo (Duffie e Backman, 2006; Klüppel 1985):

**Declinação Solar ( $\delta$ )** - É 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  $-23,5^{\circ} \leq \delta \leq 23,5^{\circ}$  aproximadamente, sendo a responsável pela maior ou menor exposição dos hemisférios ao Sol. Tem como equação:

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

Onde “n” é o número do dia considerado, contado a partir do dia 1º de janeiro. O comportamento da declinação solar durante o ano pode ser observado na figura 11.

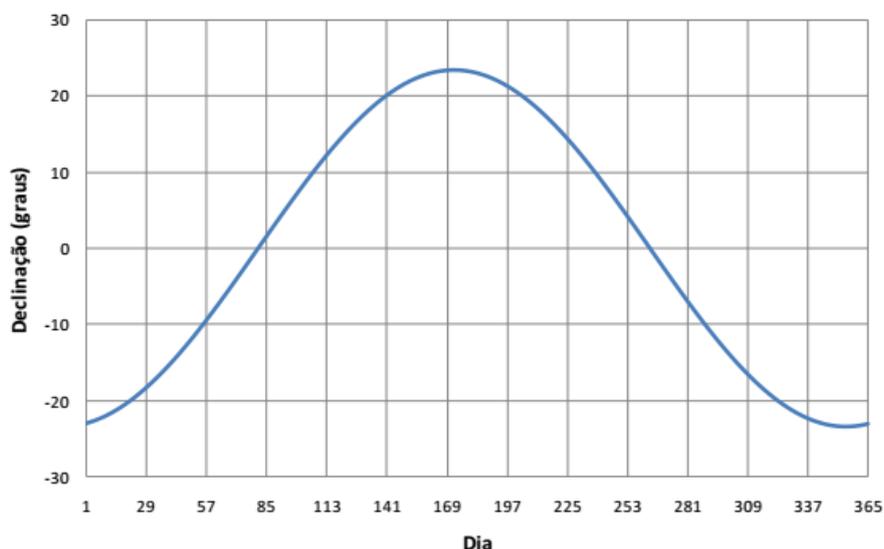


Figura 12 – Comportamento da Declinação Solar Durante um Ano

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**Latitude geográfica ( $\Phi$ )** – É definido como a posição angular em relação à linha do Equador, considerada de latitude zero. Os Trópicos de Câncer e de Capricórnio correspondem às latitudes de  $23^{\circ} 27'$  ao Norte e ao Sul, respectivamente, referenciando - se a região tropical. A cidade a qual foi realizado o trabalho, João Pessoa, possui latitude geográfica de  $-7^{\circ} 06' 5''$ . As instalações localizadas no hemisfério sul devem posicionar o plano dos coletores solares voltados para o norte geográfico ( $\gamma = 0^{\circ}$ ), enquanto que as localizadas no hemisfério norte voltados para o sul geográfico ( $\gamma = 180^{\circ}$ ).

**Longitude geográfica ( $\lambda$ )** – É definido como o ângulo medido ao longo do Equador da Terra, tendo origem no meridiano de Greenwich (ponto zero) e extremidade no meridiano local. É descrita sua variação de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$  (oeste de Greenwich) e de  $0^{\circ}$  a  $-180^{\circ}$  (leste de Greenwich). A Longitude é extremamente importante para a determinação dos fusos horários e da hora solar.

**Equação do Tempo (E)** - É o tempo baseado no movimento aparente do sol através do céu, o que denota a zero hora como o momento no qual o sol cruza o meridiano local. Sendo assim, pode-se definir a equação do tempo como o espaço de tempo que separa duas

passagens consecutivas pelo meridiano. A variação do dia solar verdadeiro é dada pela equação do tempo:

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

Onde,

$$B = \left( \frac{360}{365} \right) \cdot (n - 81) \quad (3)$$

O comportamento da equação do tempo durante um ano pode ser observado na figura 12.

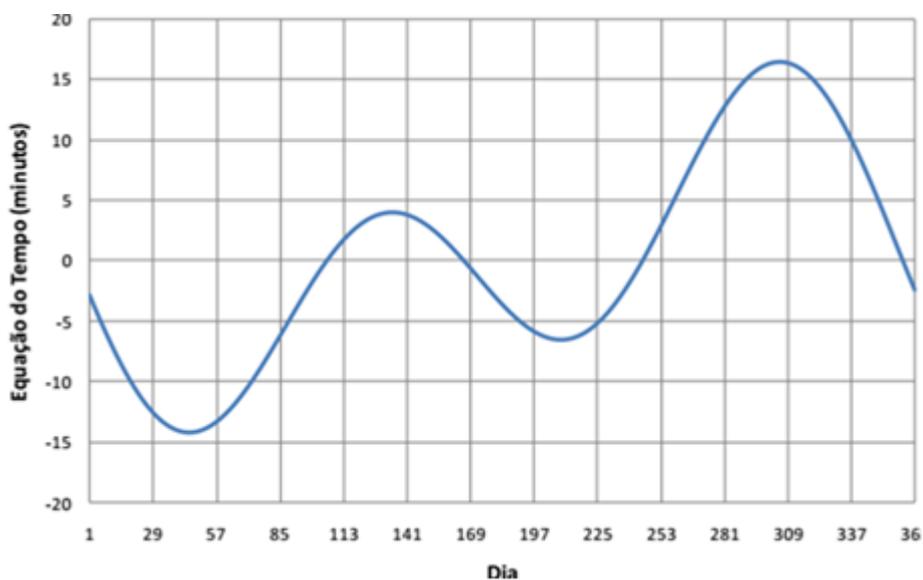


Figura 13 - Comportamento da Equação do Tempo Durante um Ano

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

**Hora Solar (Hs)** - É o tempo medido baseado no movimento aparente do Sol através do céu, tendo como a zero hora solar o meio dia, ou seja, quando o Sol cruza o

meridiano local. Tem como equação:

$$H_s = HoraLegal + \frac{(L_p - L_l)}{15} + \frac{E}{60} - 12 \quad (4)$$

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 equação do tempo é:

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

Onde,

$$B = \frac{360 \times (n - 81)}{364} \quad (6)$$

E “n” é o número do dia considerado, contado a partir do dia 1º de janeiro.

**Ângulo Horário ( $\omega$ )** - 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.

$$\omega = 15(HL - 12) + L_p - L_l + \frac{E}{4} \quad (7)$$

**O ângulo azimutal da superfície ( $\gamma_{sup}$ )** – Diz respeito ao ângulo de orientação do coletor que é formado entre a direção norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal à superfície do coletor solar e medido a partir do sul ( $\gamma = 0$ ). Seu valor varia na faixa de  $(-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ)$ . Para a superfície orientada para o Norte caso mais comum de instalação

de coletores planos no Brasil.

$$\gamma_{\text{sup}} = 180^\circ \quad (8)$$

**Altura solar ( $\alpha_s$ )** - corresponde ao ângulo entre os raios solares e sua projeção em um plano horizontal como pode ser observado na figura 13:

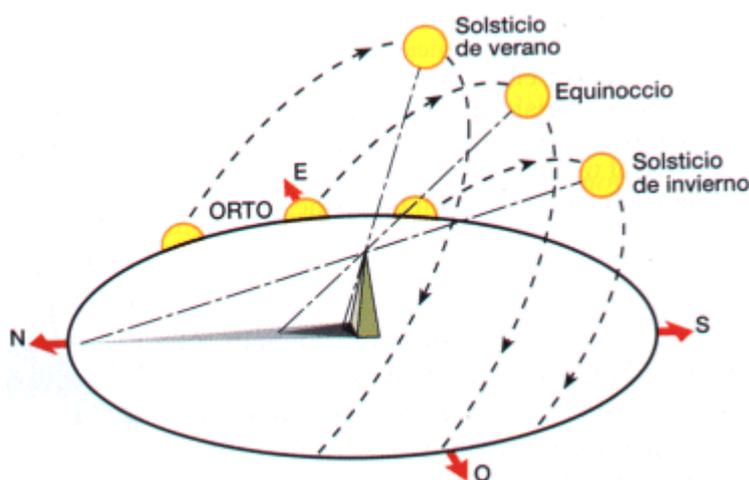


Figura 14 – Representação da Altura Solar

Fonte: disponível em <http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es>, adaptado.

A altura solar pode ser dada pela equação:

$$\text{sen}(\alpha_s) = (\text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi) + ((\text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi) \cdot \text{cos } \omega) \quad (9)$$

**Azimute solar ( $\gamma_s$ )** – É o ângulo que a projeção da direção da radiação solar no plano horizontal faz com a linha norte-sul ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ), e é dado por:

$$\text{sen } \gamma_s^I = \frac{\text{sen}(\omega) \cdot \text{cos}(\delta)}{\text{cos } h} \quad (10)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \delta - \cos \omega - \cos \phi - \cos h}{\text{sen } \phi \cdot \cos h} \quad (11)$$

$$\gamma_s = \cos^{-1} \gamma_s \quad (12)$$

**Posição Solar** - Para o cálculo da posição solar utilizaremos as equações:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (13)$$

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

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\omega)\cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (14)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\cos(\delta)\cos(\omega) - \cos(\phi)\text{sen}(h)}{\text{sen}(\phi)\cos(h)} \quad (15)$$

**O ângulo zenital ( $\theta_z$ )** - Corresponde ao ângulo entre os raios solares e a vertical do local ( $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ ).

$$\cos(\theta_z) = \cos(90 - \delta) \cdot \cos(90 - \phi) + \text{sen}(90 - \delta) \cdot \text{sen}(90 - \phi) \cdot \cos(\omega) \quad (16)$$

A figura 14 representa um esquemático para a compreensão dos ângulos em relação a um plano inclinado. Podendo ser observado o ângulo de zênite e os outros ângulos acima

citados.

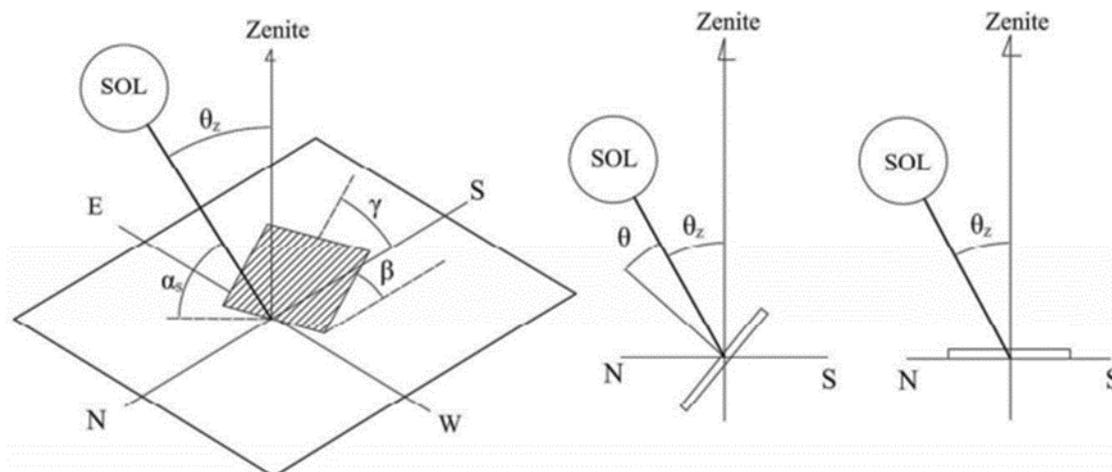


Figura 15 – Ângulo de Zênite.

Fonte: Vieira, 2013

**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. A equação é a seguinte:

$$N = \frac{2 \arccos(-\operatorname{tg}(\delta)\operatorname{tg}(\phi))}{15} \quad (17)$$

**Ângulo de Incidência de Radiação Solar ( $\theta$ )** - É o ângulo que os raios solares formam com a normal à superfície. Vamos considerar que o telhado onde o coletor irá ser instalado está em um ângulo  $\beta = 30^\circ$  com a superfície orientada para o Norte, onde  $\gamma_S = 180^\circ$ . As equações utilizadas são:

$$\cos(a_r) = \cos(\gamma)\cos(\gamma_s) + \operatorname{sen}(\gamma)\operatorname{sen}(\gamma_s) \quad (18)$$

e,

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\cos(\beta) + \text{sen}(\delta)\text{sen}(\beta)\cos(\phi) \\ & + \cos(\delta)\cos(\omega)\text{sen}(\phi)\text{sen}(\beta) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)\cos(\beta) \end{aligned} \quad (19)$$

**Potência Solar** - A potência solar nos diz a quantidade de energia que chega até o coletor. Utilizando a constante solar em que  $G = 1371 \text{ W/m}^2$ , temos:

$$I = G \times \cos \theta \quad (20)$$

**Radiação Extraterrestre ( $G_o$ )** - Levando-se em conta apenas o movimento orbital da terra. Temos que:

$$G_o = G_s \times \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \times \cos \theta_z \quad (21)$$

$$G_o = G_s \times \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \times (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \omega) \quad (22)$$

**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:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times G_s}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta \text{sen} \omega_s + \frac{\pi \times \omega_s}{180} \text{sen} \phi \text{sen} \delta\right) \quad (23)$$

**Radiação Extraterrestre no Período de 1h ( $I_o$ )** - É a quantidade de radiação que atinge uma superfície no período de 1 hora. É dada pela equação:

$$I_o = \frac{12 \times 3600 \times G_s}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta (\text{sen} \omega_2 - \text{sen} \omega_1) + \frac{\pi \times (\omega_2 - \omega_1)}{180} \text{sen} \phi \text{sen} \delta\right) \quad (24)$$

Onde  $\omega_2$  é o ângulo horário para a hora seguinte a estipulada para o início da

medição, no caso do presente trabalho, seria a hora de 16:00h. Logo:

$$\omega_2 = 15(HL - 12) + L_p - L_l + \frac{E}{4} \quad (25)$$

**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:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{H}}{H_o} &= a + b \frac{\bar{n}}{N} \\ \bar{H} &= \overline{H_o} \times \left( a + b \frac{\bar{n}}{N} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

**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:

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (27)$$

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 o gráfico abaixo, entrando com o valor calculado de  $K_T$ , encontramos que o valor da relação  $H_d/H$  é igual à 0,23. Assim:

$$H_d = 12,48 \times 0,23 = 2,87 MJ / m^2 \quad (28)$$

A figura abaixo mostra a relação entre fração difusa e índice de claridade.

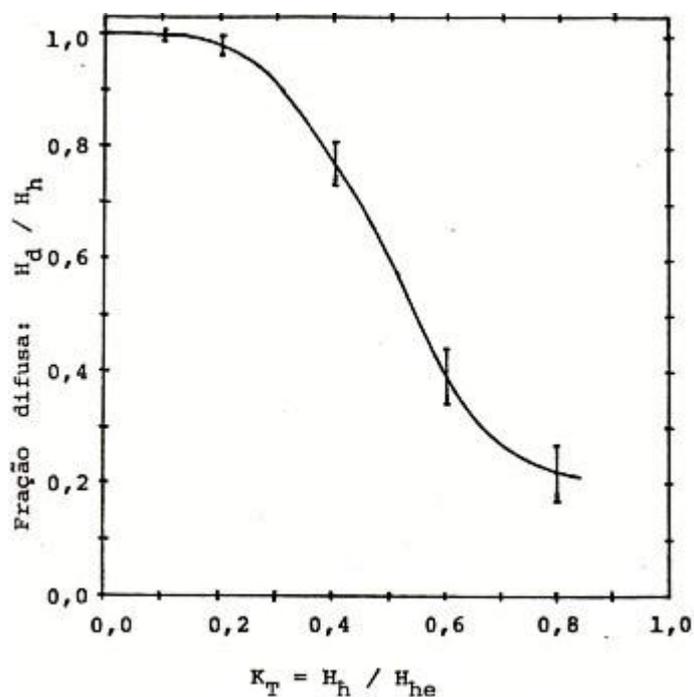


Figura 16 – Correlação entre fração difusa e índice de claridade

Fonte: COLLARES-PEREIRA; RABL.

**Irradiação Solar Difusa Instantânea ( $I_d$ )** – Pode ser descrita por:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24 \times 3600} \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega - \left( \left( \frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \times \cos \omega_s \right)} \right] \quad (29)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \cos \omega_s &= -\operatorname{tg} \phi * \operatorname{tg} \delta = -\operatorname{tg} (-27,58) * \operatorname{tg} (21,10) = 0,20 \\ \omega_s &= \arccos(0,20) = 78,46^\circ \end{aligned} \quad (30)$$

**A Radiação Solar Global Instantânea ( $I_g$ ) e a Radiação Solar Direta Instantânea ( $I_{dir}$ )** – São descritas pelas respectivas equações 31 e 32.

$$\frac{I_g}{H} = \frac{\pi}{24 \times 3600} \left[ (a + b \cos \omega) \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \left( \left( \frac{2\pi \omega_s}{360} \right) \times \cos \omega_s \right)} \right] \right] \quad (31)$$

$$I_{dir} = I_d - I_g \quad (32)$$

**Radiação Solar Difusa Total ( $I_t$ )** – É descrita como:

$$R_g = \left[ \frac{I_{dir}}{I_g} R_{dir} \right] + \left[ \frac{I_d}{I_g} R_d \right] = \frac{I_t}{I_g} \quad (33)$$

Sendo  $R_g$  o fator geométrico que apresenta o quanto de radiação solar global que chega até uma superfície inclinada,  $R_{dir}$  é o fator geométrico que apresenta o quanto de radiação solar direta atinge a mesma superfície inclinada e  $R_d$  é o fator geométrico que apresenta o quanto de radiação solar difusa chega nessa superfície inclinada, e geralmente tem o valor de 1, devido a isotropia.

$$R_{dir} = \frac{[\cos(\varphi + \beta) \cos \delta \cos \omega] + [\text{sen}(\varphi + \beta) \text{sen} \delta]}{(\cos \phi \cos \delta \cos \omega) + (\text{sen} \phi \text{sen} \delta)} \quad (34)$$

**Radiação Solar Total Incidente Sobre A Superfície Inclinada ( $I_T$ )** - O parâmetro  $\rho_s$  é conseguido pela seguinte tabela, e para este trabalho considerou-se o piso como concreto em construção recente, obtendo-se  $\rho_s=0,34$ .

$$I_T = (I_{dir} \times R_{dir}) + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \times I_{dir} + (I_{dir} + I_d) \times \rho_s \times \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (35)$$

Tabela 1 – Tabela de Tipos de Superfícies e Respetivos Albedos.

TIPOS DE SUPERFÍCIE	P <sub>s</sub>	REF.
Água (Superfície Plana com Grande Ângulo de Incidência)	0,07	15
Asfalto	0,1	14
Brita ou Cascalho	0,2	15
Concreto (Construção Recente)	0,34	14
Concreto (Construção Antiga)	0,22	15
Estradas de Terra ou Barro	0,04	15
Florestas no Inverno (Coníferas)	0,07	15
Florestas no Outono (Zona Temperada), Campos Plantados Maduros, Plantas de Folhagem Clara	0,25	15
Folhas Secas caídas	0,3	15
Gramma Verde	0,26	15
Gramma Seca	0,2	15
Neve Recém Caída ou Com Camada de gelo	0,75	15
Solo de Terra ou Barro	0,14	15
Telhados ou Paredes Envelhecidas (Tijolos de barro), Tintas Escuras	0,27	15

Fonte: KLÜPPEL (1985), Adaptado.

**Porção de Radiação em uma Superfície Inclinada para uma Superfície Horizontal (R<sub>b</sub>)** - Pode ser descrito como:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (36)$$

$$\cos \theta_z = (\cos(90 - \delta) \cos(90 - \varphi)) + (\sin(90 - \delta) \sin(90 - \varphi)) \times \cos \omega$$

**Radiação Em Uma Superfície Inclinada** – A radiação em uma superfície inclinada é por:

$$R_{b,ave} = \frac{a}{b} \quad (37)$$

$$a = (\text{sen}\delta \text{sen}\varphi \cos\beta - \text{sen}\delta \cos\varphi \text{sen}\beta \cos\gamma) \times \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi$$

$$+ (\cos\delta \cos\varphi \cos\beta + \cos\delta \text{sen}\varphi \text{sen}\beta \cos\gamma) \times (\text{sen}\omega_2 - \text{sen}\omega_1)$$

$$- (\cos\delta \text{sen}\beta \text{sen}\gamma) \times (\cos\omega_2 - \cos\omega_1)$$

$$b = (\cos\varphi \cos\delta) \times (\text{sen}\omega_2 - \text{sen}\omega_1) + (\text{sen}\varphi \text{sen}\delta) \times \frac{1}{180} \times (\omega_2 - \omega_1) \pi$$

### 3.2. Balanço energético em um coletor solar Térmico

Os sistemas solares térmicos utilizam a capacidade da radiação solar para aquecer, diferenciando-se claramente dos sistemas fotovoltaicos, que se baseiam na capacidade de certos materiais para transformar, diretamente, a radiação solar em energia elétrica. As diferenças entre estes dois tipos de sistemas solares se referem à tecnologia, aplicações e desenvolvimento, de modo que não podem ser tratados da mesma forma (ONUUDI, 2014).

De acordo com (Ragheb, 2011), o desenvolvimento da tecnologia de coletores solares começou nos Estados Unidos, durante a década de 70, sob os auspícios do DOE (Department of Energy). A primeira planta solar comercial foi instalada em Albuquerque, Novo México, em 1979, pela Sandia National Laboratory. A planta utilizou coletores cilíndrico-parabólicos e alcançou temperaturas da ordem de 500°C, sendo inicialmente desenvolvida para processos industriais.

Conforme descrito por (Onudi, 2014) o comportamento térmico de qualquer coletor solar está determinado pelo rendimento global,  $\eta$ , definido como a relação entre a potência térmica que é capaz de proporcionar, ou potência térmica útil  $P_{\text{útil}}$ , e a potência procedente do Sol tomada como referência  $P_{\text{solar}}$ , isso é:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{solar}}} \quad (38)$$

$\eta$  = Rendimento Global

$P$  = Potencia Útil

$P$  = Potencia Solar

Onde:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{A_C \cdot E_C} = \eta_{\text{opt}} - \frac{U_L}{C} \cdot \frac{(T_A - T_\infty)}{E_C} \quad (39)$$

$A_C$  = Área líquida do Coletor

$E_C$  = Radiação Solar Tomada como Referência.

$U_L$  = Coeficiente Global de Perdas

$T_A$  = Temperatura do Absorvedor

$T_\infty$  = Temperatura do Ambiente.

$\eta_{\text{opt}}$  = Rendimento ótimo

E a potência útil é descrita abaixo.

$$P_{\text{útil}} = \eta_{\text{opt}} \cdot A_C \cdot E_C - U_L \cdot A_A (T_A - T_\infty) \quad (40)$$

A potência térmica procedente do Sol,  $P_{\text{solar}}$ , é o produto da área líquida do coletor que intercepta a radiação solar,  $A_C$ , e da radiação solar tomada como referência,  $E_C$ .

$$P_{\text{solar}} = A_C \cdot E_C \quad (41)$$

Em estado estacionário a potência térmica útil,  $P_{\text{útil}}$ , é o resultado do balanço entre a potência energética absorvida pelo receptor,  $P_{\text{absorvida}}$ , e a potência que este perde para o ambiente,  $P_{\text{perdida}}$ .

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{Absorvida}} - P_{\text{Perdida}} \quad (42)$$

Nem toda a potência solar,  $P_{\text{solar}}$ , pode ser absorvida pelo receptor. Existe uma série de perdas de energia devidas tanto à geometria e óptica do coletor, quanto às propriedades dos materiais do próprio receptor que devem ser consideradas. Chama-se rendimento óptico,  $\eta_{\text{opt}}$ , ao fator de correção da potência absorvida pelo receptor a partir da potência solar considerada. Isso é:

$$P_{\text{absorvida}} = \eta_{\text{opt}} \cdot P_{\text{solar}} \quad (43)$$

O receptor perde energia no exterior ao aquecer, por causa da incidência da radiação solar sobre ele, isto é, aumenta sua temperatura com relação à temperatura ambiente. Assim, quanto maior for a diferença de temperaturas entre o absorvedor,  $T_A$ , e o ambiente,  $T_\infty$ , maiores serão as perdas de energia. As perdas do receptor são proporcionais à área de troca desta energia, isto é, à área do absorvedor,  $A_A$ . O fator de proporcionalidade deste conjunto de variáveis é denominado coeficiente global de perdas do receptor,  $U_L$ , e considera todos os intercâmbios de energia entre o absorvente e o ambiente. Desta forma, pode-se escrever que:

$$P_{\text{perdida}} = U_L \cdot A_A \cdot (T_A - T_\infty) \quad (44)$$

Na figura 17 pode ser observado o esquema de balanço energético simplificado em um coletor solar térmico.

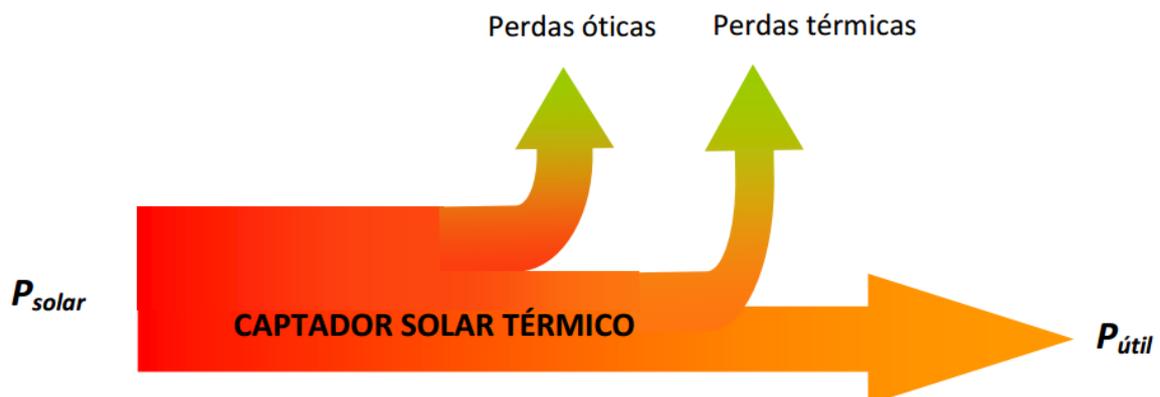


Figura 17 – Balanço Energético em um Coletor Solar Térmico

Fonte: (Onudi, 2014)

A razão de concentração,  $C$ , é a relação entre a área líquida do coletor que intercepta a radiação solar,  $A_c$ , (Kreith&Kreider, 1978), e a área do receptor,  $A_A$ , (área de perdas de energia ao ambiente exterior).

Segundo Filho (FILHO, 2010) uma série de fatores estatisticamente independentes contribui para o erro na formação da imagem refletida por um concentrador em um absorvedor e conseqüente redução na sua concentração, são eles:

- Nos concentradores convencionais, parábolas e lentes, o desenho óptico faz com que estes limites não sejam alcançados, devido à característica de aceitação angular não ser ideal rejeitando e/ou aceitando raios além de sua abertura.
- Desvios no posicionamento do rastreador e desvios no alinhamento dos componentes do concentrador como lentes, parábolas, espelhos, etc.
- Desvios provocados por irregularidades nas superfícies do sistema ótico (imperfeições nas lentes, espelhos e refletores).
- Desvios angulares provocados pela dispersão dos raios na atmosfera.

Os espelhos não são refletores perfeitos, de modo que se deve considerar o valor de sua refletividade especular quando aplicado em coletores solares. A cobertura de vidro não é perfeitamente transparente, deixando passar uma proporção da radiação incidente, determinada por sua transmissibilidade. A superfície absorvente tem uma absorvância da radiação solar determinada. Nos coletores de concentração podem existir erros no posicionamento do receptor com relação ao foco, erros na própria forma concentradora dos espelhos, erros no rastreamento do Sol que se traduzem em raios refletidos que não interceptam o absorvedor e outros.

O efeito conjunto desses fatores na perda de concentração é dado pelo desvio total  $\sigma_{tot}$  do sistema, obtido como a média quadrática de todos os desvios. Os erros de rastreamento estão relacionados com a precisão dos seus sistemas de posicionamento ( $\sigma_{rastreamento}$ ).

A distorção da imagem refletida por uma superfície é causada por dois principais efeitos, o primeiro é a interação da superfície com a radiação incidente que, devido à micro - rugosidades da superfície, formam uma nuvem dispersa na imagem refletida ( $\sigma_{especular}$ ) e o segundo efeito é a imperfeição da superfície dos espelhos ( $\sigma_{contorno}$ ) (BUIE et al., 2003).

Tais efeitos, combinados ainda com erros no alinhamento dos componentes do sistema ( $\sigma_{\text{desalinhamento}}$ ), compõem o erro óptico do sistema concentrador ( $\sigma_{\text{optico}}$ ), segundo equação abaixo (RABL,1985).

$$\sigma_{\text{optico}}^2 = \sigma_{\text{contorno}}^2 + \sigma_{\text{especular}}^2 + \sigma_{\text{desalinhamento}}^2 + \sigma_{\text{rastreamento}}^2 \quad (45)$$

O desvio total do sistema ( $\sigma_{\text{tot}}$ ), segundo Rabl (1985) é dado pela equação:

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{optico}}^2 + \sigma_{\text{sol}}^2 \quad (46)$$

Onde  $\sigma_{\text{sol}}$  é o desvio do raio angular do sol.

Além dos desvios de rastreamento, os desvios ópticos provocam a redução da concentração.

### 3.3. Tecnologias De Concentração Solar

A tecnologia da energia solar térmica concentrada, conhecida como CSP utiliza basicamente concentradores para focar a radiação solar em um receptor, que por sua vez transfere calor para um fluido, que será transferido para o bloco de potência onde será gerada a eletricidade. Para tal, a conversão pode ser realizada através de ciclos termodinâmicos de combustão externa, do tipo Rankine, Brayton ou Stirling. O ciclo Rankine utiliza turbina a vapor, o ciclo Brayton utiliza turbina a gás e o ciclo Stirling utiliza um motor Stirling. A diferença básica para uma central termoelétrica convencional encontra-se na fonte de energia, onde no lugar de um combustível tradicional (fóssil), derivado do petróleo ou carvão, utiliza-se energia solar. (Kamal, 1988). A figura 17 demonstra o fluxo de energia de um sistema tipo CSP.

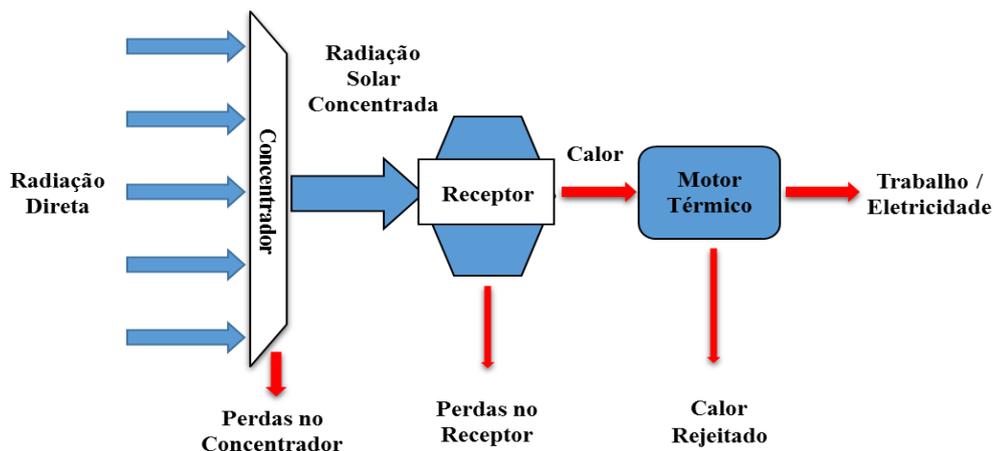


Figura 18 – Representação do fluxo de energia de um sistema CSP

Fonte: Miller e Lumby (2012), adaptado.

Existem alguns tipos de sistema CSP, dentre os mais comuns são: cilindro parabólico, linear Fresnel, torre de receptor central e prato parabólico. Apresentaremos brevemente as configurações básicas dos sistemas mais comuns. O cilindro parabólico, linear Fresnel e a torre de receptor central podem possuir um sistema de armazenamento, o prato parabólico não possui, porém todos podem ser utilizados em configurações híbridas, ou seja, com auxílio de combustível fóssil ou outra fonte renovável para sua operação. As opções de configurações híbridas (cogeração) oferecem maior confiabilidade e flexibilidade a operação e a produtividade.

### 3.3.1. Coletores Cilíndricos Parabólicos

Esta tecnologia faz uso de superfícies refletoras, com geometria cilíndrica - parabólicos compostas linearmente em grandes fileiras paralelas de espelhos côncavos conectados. O formato parabólico dos espelhos focaliza o calor refletido para o tubo absorvedor de calor. Este tubo absorvedor (receptor) costuma ser cilíndrico por cujo interior circula o fluido a aquecer e pode chegar a ter uma superfície 25 vezes menor que a área de captação da energia solar (área de abertura). O fluido de trabalho circula pelos receptores aquecendo-se e trocando calor com a água posteriormente para a geração de vapor. Este fluido de alta capacidade térmica, pode ser óleo, sal fundido, ou alguma outra substância que

retenha bem o calor. Os coletores cilíndricos parabólicos podem possuir 100 m de comprimento e 5 m de largura cada fileira de superfícies refletoras (IEA, 2010).

O Sistema cilindro parabólico é atualmente a tecnologia mais testada e comprovada dentre os sistemas de geração de energia solar térmica. Isto ocorre devido a seu histórico de operação comercial, principalmente pela construção das plantas SEGS (*Solar Energy Generating Systems*), localizadas no deserto de Mojave na Califórnia, que opera comercialmente desde 1984, e depois pela construção de outras usinas importantes como a Nevada Solar One e outras plantas mais recentes na Espanha (Barbose *et al.*, 2012). Pode ser visto na figura 19 o modelo de um coletor cilindro parabólico.

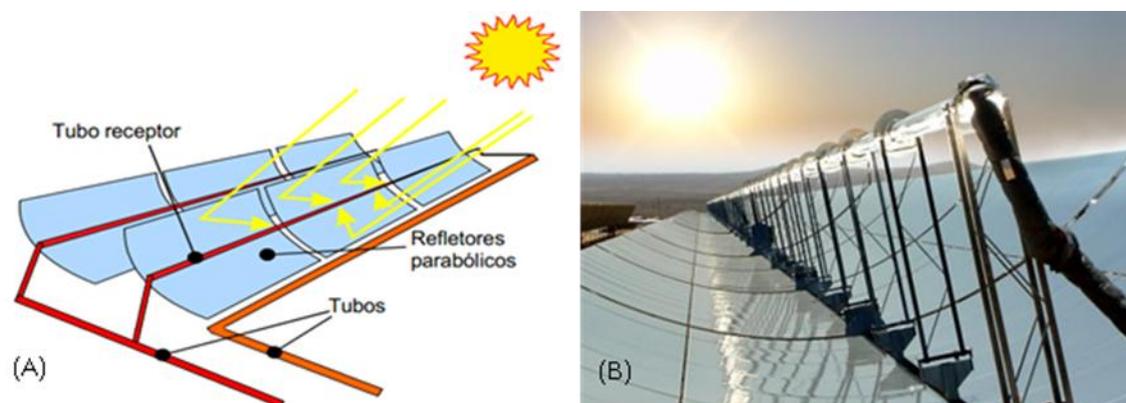


Figura 19 – (A) Modelo de Coletor Cilíndrico Parabólico; (B) Coletor Solar Cilíndrico Parabólico em Funcionamento

Fonte: (A) ONUDI, 2014; (B) Disponível em <<http://www.solisclima.es>>

O fluido de transferência de calor que flui nos tubos de absorção, dos canais parabólicos, depois de ser aquecido, aquece a água dentro do trocador de calor e a água se transforma em vapor sobreaquecido para acionar uma turbina ligada a um gerador, para a produção de energia elétrica. Após o fluido transferir seu calor ele é “reciclado” e utilizado de novo. O vapor também é esfriado, condensado e “reciclado”.

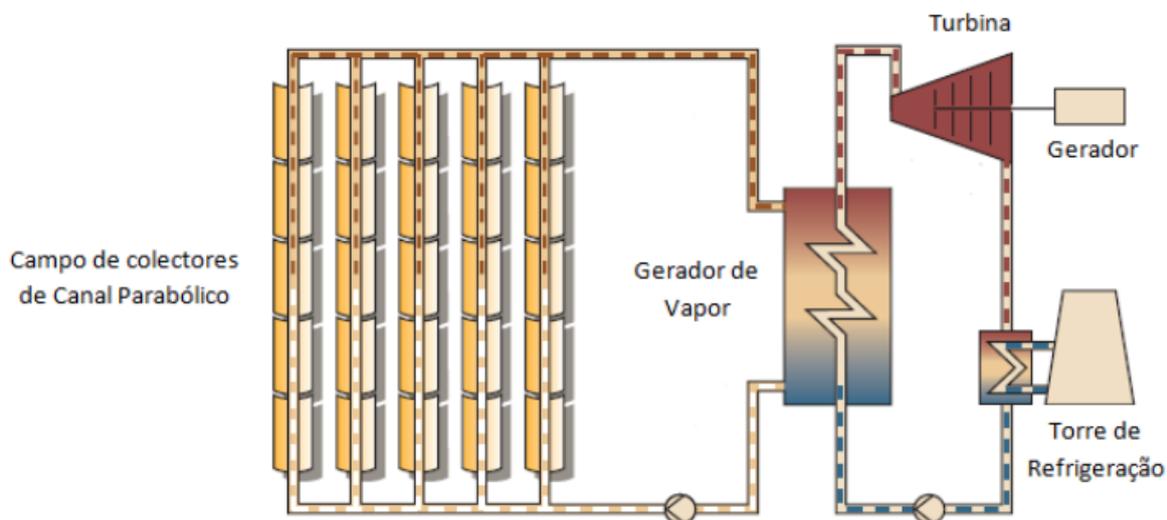


Figura 20 - Esquema de uma central de canal parabólico

Fonte: Adaptada de Solar Millenium.

Para poder concentrar a radiação solar sobre o tubo absorvente, o coletor deve acompanhar o Sol durante o dia, necessitando um sistema de acompanhamento solar que vai mudando a posição do coletor, de acordo com o movimento solar. Os coletores cilíndricos parabólicos podem ter acompanhamento em um ou dois eixos. Quando o acompanhamento é feito em um eixo, este pode estar orientado Norte-Sul ou Leste-Oeste.

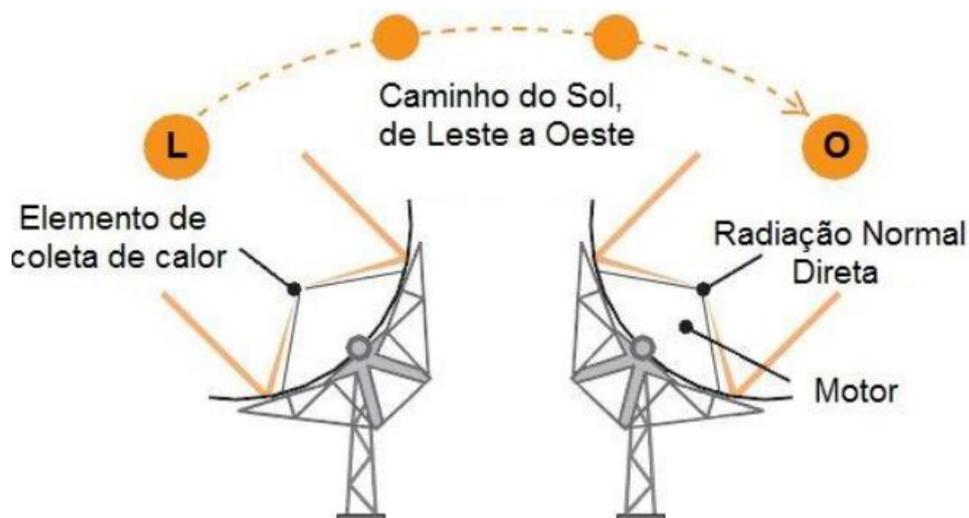


Figura 21– Rastreamento orientado no eixo norte-sul com rastreamento do sol de leste a oeste

Fonte: Brakmann *et al.* (2003), adaptado pelo autor.

A orientação no sentido Leste-Oeste tem como vantagens o fato de se mover pouco ao longo do dia e de sempre ficar diretamente voltado para o sol ao meio-dia, pois permite ajustes sazonais para a elevação do sol e latitude, maximizando assim a coleta do meio-dia e fazendo com que o sistema possua uma produção de energia mais uniforme ao longo do ano. Em contrapartida, tem uma performance reduzida no início do dia e no fim da tarde, devido aos maiores ângulos de incidência dos raios solares sobre a superfície coletora. Na orientação no sentido norte-sul os coletores acompanham a azimute do sol no dia, apontando mais diretamente para o sol ao amanhecer e no final da tarde, maximizando a produção anual. Porém, apresenta maiores perdas de calor ao meio-dia, devido aos maiores ângulos de incidência nesse horário (Bianchini, 2013).

### **3.3.2. Concentradores Lineares Tipo Fresnel**

Em um concentrador linear Fresnel a radiação solar direta é refletida por longos espelhos retangulares e que refletem a radiação solar sobre um tubo receptor comum que está e situado sobre os refletores. Cada refletor tem seu próprio eixo de giro e sistema de acompanhamento solar, de forma que giram independentemente uns dos outros. Na realidade, os concentradores lineares tipo Fresnel, podem ser considerados como um híbrido entre os coletores cilíndrico parabólicos e os sistemas receptores centrais, já que têm um receptor longitudinal semelhante ao dos coletores cilíndrico parabólicos, mas sobre o tubo receptor se concentra a radiação solar refletida por vários espelhos, de forma semelhante aos sistemas de receptor central.

O receptor na tecnologia do concentrador linear Fresnel está instalado em uma estrutura independente da estrutura de suporte das superfícies refletoras, sendo portanto, um receptor fixo, que não se movimenta juntamente com os coletores solares quando estes rastreiam a radiação solar ao longo do dia (IEA, 2010).

O fato de esta tecnologia fazer uso de superfícies refletoras planas faz com que o custo relacionado à aquisição dos coletores seja significativamente menor em plantas de concentração solar tipo Fresnel do que em plantas CSP cilindro parabólico (IRENA, 2012).

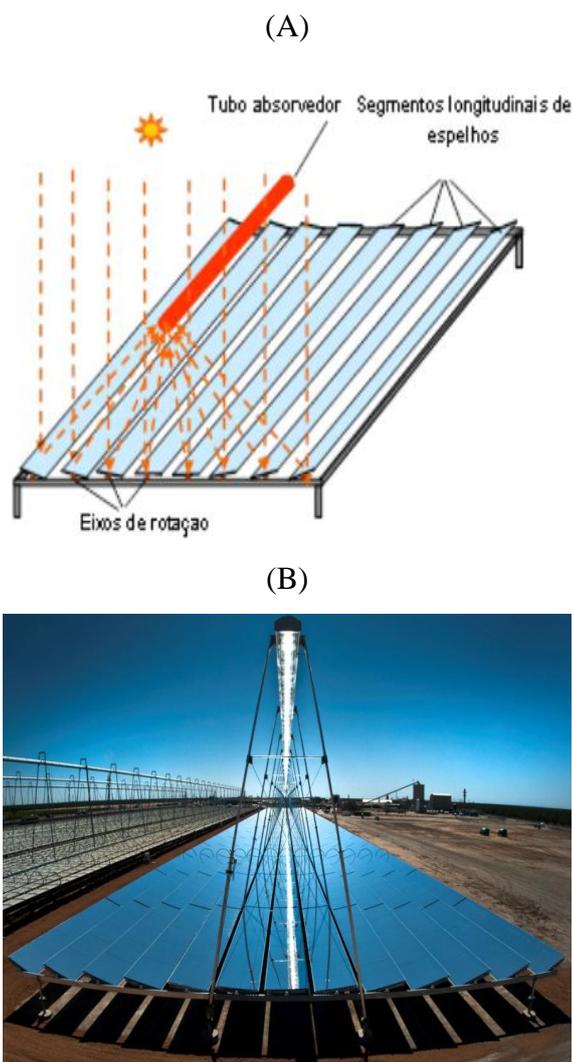


Figura 22– (A) Modelo de Coletor Linear Fresnel; (B) Coletor Linear Fresnel em Funcionamento

Fonte: (A) Onudi, 2014; (B) disponível em <<http://www.kcet.org>>

Plantas de concentração solar tipo Fresnel usualmente são projetadas para que haja a geração direta de vapor (Direct Steam Generation – DSG) em seus receptores, o que contribui para menores custos de capital de plantas com esta tecnologia, uma vez que os fluidos de transferência de calor, como os óleos sintéticos, geralmente utilizados em plantas de concentração solar tipo cilindro parabólico, assim como os sistemas de troca de calor são dispensados. O sistema de geração direta de vapor (DSG), porém, torna sistemas de armazenamento térmico para plantas de concentração solar tipo linear Fresnel mais caros (IRENA, 2012; IEA, 2010).

O primeiro a aplicar este princípio foi o pioneiro solar, Giorgio Francia (1968), que desenvolveu o sistema linear e o sistema de rastreamento de dois eixos de refletores Fresnel

em Gênova, Itália, na década de 60 (Kalogirou, 2009 *apud* Mills, 2001).

As opções de localização e orientação da planta LFR são similares as plantas cilíndricas parabólicas. A figura 23 descreve o esquema do sistema CSP Fresnel para geração de energia elétrica.

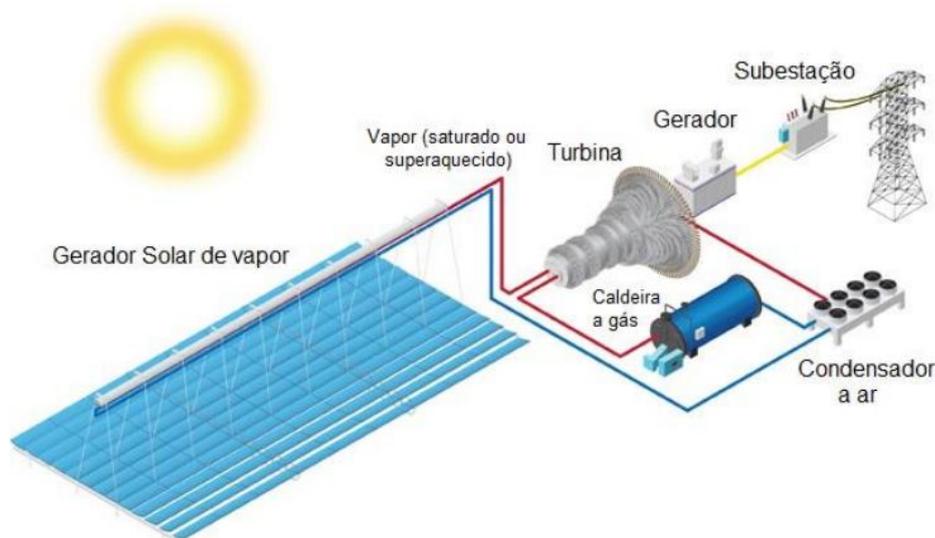


Figura 23 – Diagrama esquemático de uma planta LFR

Fonte: Disponível em <[www.aveva.com](http://www.aveva.com)>, adaptado pelo autor.

### 3.3.3. Discos Parabólicos

Os coletores de disco parabólico consistem em um concentrador de superfície especular que enfoca os raios do sol e os reflete em um receptor instalado acima do disco em seu ponto focal. Cada disco pode ser uma unidade independente ou ser um módulo de um sistema múltiplo para produzir potência. O fluido em um disco parabólico pode alcançar temperaturas de até 1500°C e pode produzir até 50 kW de eletricidade ou 150 kW de potência térmica. Neste tipo de tecnologia de concentração solar, o gerador, usualmente um motor stirling ou uma micro turbina, está acoplado ao receptor.

(A)

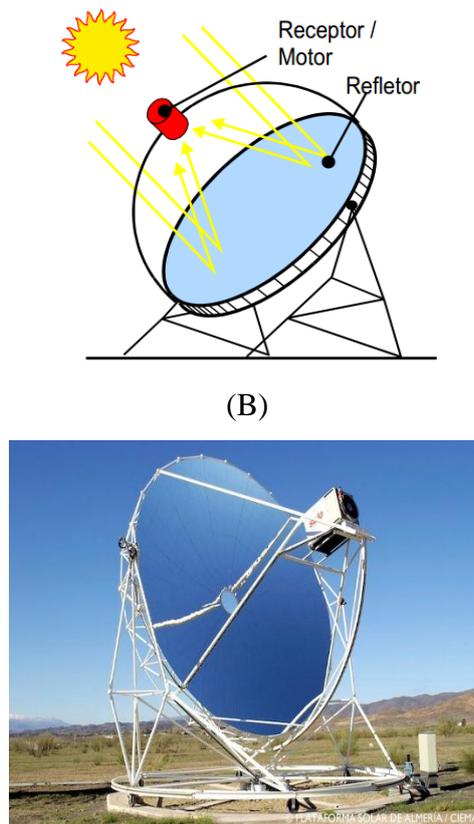


Figura 24 – (A) Modelo de Discos Parabólicos; (B) Concentrador Solar Tipo Disco Parabólico em Funcionamento

Fonte: (A) Onudi, 2014; (B) Disponível em <<http://www.csp-world.com>>

O disco pode operar de forma independente (indicado para uso em regiões isoladas) ou como parte de uma planta composta por vários discos. A energia térmica no fluido pode ser usada de duas maneiras distintas (Kalogirou, 2009):

- Transportada por tubulação para um sistema central.
- Transformada diretamente em eletricidade em um gerador acoplado diretamente no receptor.

Diferentemente das demais tecnologias de concentração solar, disco parabólico, por possuir uma pequena pegada em relação à área ocupada, pode ser instalada em terrenos cuja inclinação é acentuada (IRENA, 2012).

### 3.3.4. Sistemas de receptor central.

O sistema de torre de receptor central ou torre solar, também conhecido como “*Central Receiver System*” (CRS), consiste de um campo de helióstatos dotados de um

sistema de controle permitindo que se movem independentemente e são capazes de rastrear o sol em dois eixos, refletindo a radiação solar direta na direção do receptor central localizado no topo de uma torre próxima ao campo de heliostatos.

Na zona focal se localiza um receptor que absorbe a energia refletida pelo campo de heliostatos, dependendo da potência absorvida, do tamanho do receptor e do tamanho do campo de heliostatos.

O sistema entrega calor ao fluido de transferência a temperaturas que ultrapassam  $1000^{\circ}\text{C}$ , o que posteriormente pode ser usado para alimentar energeticamente um processo industrial que requeira calor a esses níveis de temperatura, ou para produzir vapor em um trocador de calor para alimentar a uma turbina acoplada a um gerador elétrico.

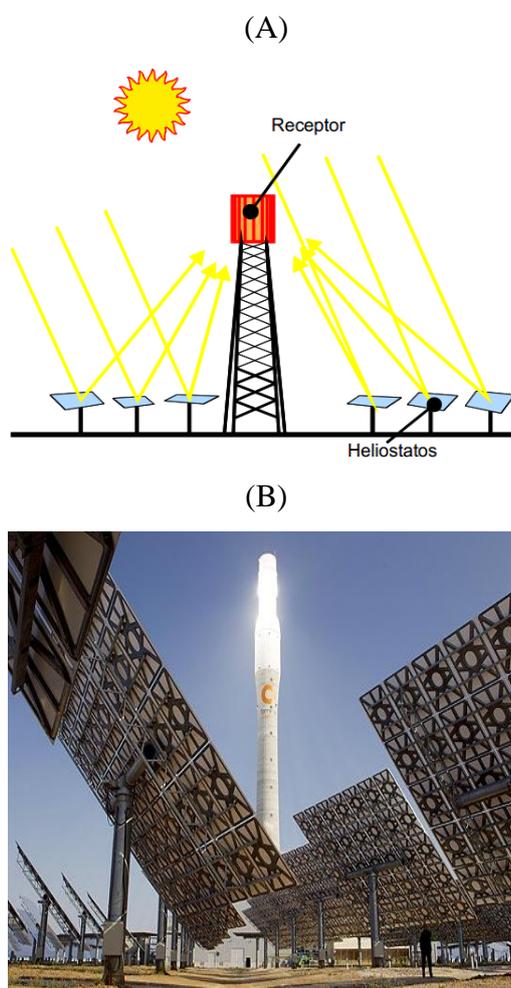


Figura 25 – Modelo de Torre Solar; (B) Torre Solar e Heliostatos

Fonte: (A) Onudi, 2014; (B) Disponível em < <http://ambientalsustentavel.org>>

Na tecnologia de torre de receptor central os dois principais tipos de fluidos de

processo são o sal fundido e o vapor direto que são aquecidos a temperaturas próximas de 565°C. Isto é possível por causa da menor quantidade de tubulação necessária para estes fluidos nos sistemas de torre central e devido à alta concentração de calor no receptor da torre, chegando a temperaturas superiores a 1000°C que proporciona altas temperaturas de operação. Estão sendo investigados sistemas e materiais capazes de funcionar a estas elevadas temperaturas. Sistemas que operam a temperaturas moderadamente elevadas (600°C-700°C) podem permitir que as torres a sal fundido e a vapor se adaptem e usem turbinas comerciais a vapor supercrítico, em oposição aos atuais ciclos Rankine (Barbose *et al.*, 2012).

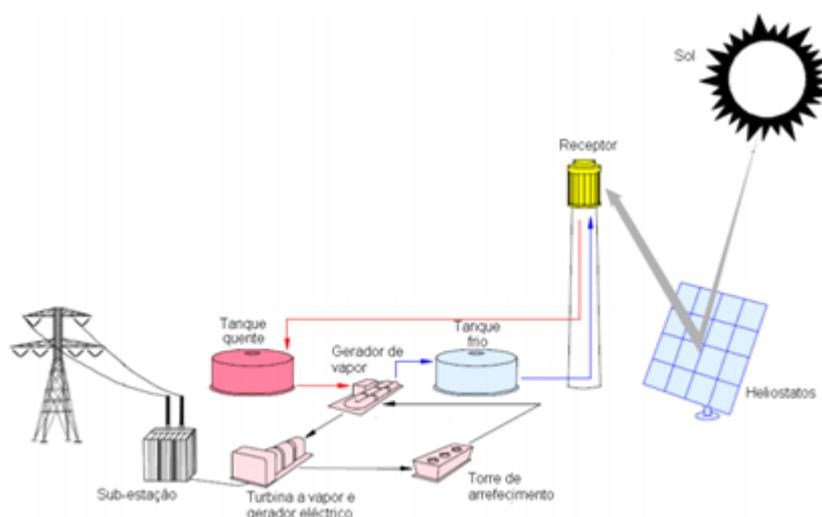


Figura 26 – Esquema de uma central de Torre Solar

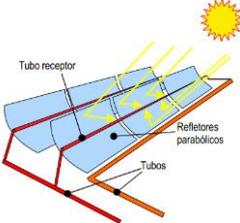
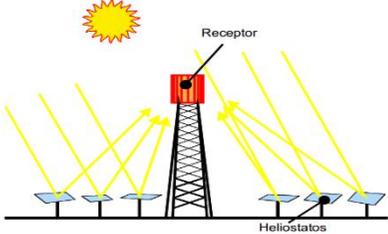
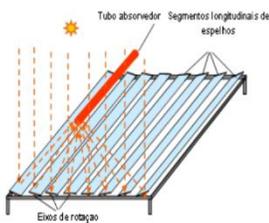
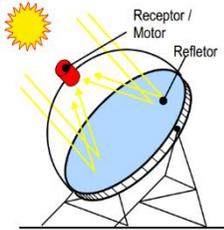
Fonte: Diver, Richard B. e Moss, Timothy A. (2008)

Com o objetivo de reduzir os custos do sistema de rastreamento, que é individual para cada heliostato, reduzindo assim o consumo parasítico de energia elétrica na planta de concentração tipo torre solar, estudos vêm sendo realizados para a concepção de heliostatos de maiores dimensões, podendo chegar a 150 m<sup>2</sup> (Kearney, 2010).

Algumas plantas CSP torre solar podem possuir diversas torres alimentando o mesmo bloco de potência (IEA, 2010).

A quadro 1 descreve uma visão geral das tecnologias de concentração solar térmico para geração de energia.

Quadro 1 – Parâmetros Técnicos das tecnologias de Concentração Solar Térmica

	<b>Cilindro Parabólico</b>	<b>Torre Solar</b>	<b>Refletor Linear Fresnel</b>	<b>Disco Parabólico</b>
				
<b>Capacidade Típica (Mw)</b>	10 - 300	10 – 200	10 - 200	0,01 - 0,025
<b>Foco</b>	Linear	Pontual	Linear	Pontual
<b>Tipo de Receptor</b>	Móvel	Fixo	Fixo	Móvel
<b>Requerimento de Área (ha/MW)</b>	2	2	2	n.a.
<b>Temperatura de operação (°C)</b>	350 – 550	250 – 565	390	550 - 750
<b>Eficiência da Planta (%)</b>	14 – 20	23 – 35*	18	30
<b>Eficiência Anual Solar para Eletricidade (%)</b>	11 – 16	7 – 20	13	12 – 25
<b>Fator d Capacidade anual (%)</b>	25 - 28 (sem AT) 29 - 43 (com AT)	55 (10h AT)	22 – 24	25 – 28

<b>Concentração</b>	70 – 80	1000	60 – 70	> 1300
<b>Hibridização</b>	Sim e direta	Sim	Sim, direta caldeira a vapor)	Não planejada
<b>Estabilidade do Grid</b>	Média a alta (Armazenamento térmico ou hibridização)	Alta (grande capacidade de armazenamento Térmico)	Média (queima de back-up possível)	Baixa
<b>Ciclo</b>	Rankine sp/ Brayton	Rankine sp.	Rankine st.	Stirling/ Brayton
<b>Condições de Pressão (°C/bar)</b>	380 a 540/100	540/100 a 160	260/50	n.a.
<b>Declividade Máxima do Campo solar (%)</b>	< 1 - 2	< 2 – 4	< 4	10% ou mais
<b>Consumo de Água (m<sup>3</sup>/MWh)</b>	3 (Resfriamento úmido) 0,3 (resfriamento seco)	2 - 3 (resfriamento Úmido) 0,25 (resfriamento Seco)	3 (resfriamento úmido) 0,2 (resfriamento seco)	0,05 - 0,1 (Lavagem dos espelhos)
<b>Aplicação</b>	Grid	Grid	Grid	Grid/ sistemas isolados
<b>Resfriamento Seco</b>	Baixa a boa aptidão	Boa aptidão	Baixa aptidão	Ótima aptidão

## **4. Capítulo**

### **4.1. Materiais e Métodos**

Pode ser observado nas literaturas sobre rastreamento solar e sua utilização em concentradores, que a maioria deles descreve sistemas de posicionamento que tanto em modo de malha aberta como em de malha fechada, demonstram que a precisão e o ganho de energia com o rastreamento estão em função da complexidade dos sistemas utilizados. Os sistemas podem utilizar sensores ou calcular em tempo real a posição do sol através da geometria solar. O cálculo do posicionamento do sol em relação a um observador é o primeiro passo para a definição do posicionamento de rastreadores ao longo do dia. Os conceitos principais que envolvem a geometria terra-sol, como o ângulo de declinação, a elevação solar, e outros parâmetros como a equação do tempo são apresentados na literatura solar descrita no ponto 3.2.

Equações que calculam tais parâmetros descrevem as variações dos mesmos diurnamente e sazonalmente, de acordo com os movimentos de rotação e translação terrestres ao longo do dia e do ano (RABL, 1985). O conceito do rastreador solar funcionando como heliostato está ligado à definição dos sistemas de receptores centrais (torres solares), que é baseado em um campo de espelhos rastreadores solares, que refletem os raios solares para um receptor situado no topo de uma torre. Segundo (FRAIDENRAICH; LIRA, 1995). Para o funcionamento dos concentradores de média e alta taxa de concentração, o rastreamento solar torna-se imprescindível devido à necessidade de um posicionamento bem definido da imagem do sol refletida sobre o absorvedor. A habilidade do sistema de controle em apontar corretamente o coletor na direção do sol influencia diretamente no desempenho final do sistema.

O sistema de rastreamento deve, portanto, ter a habilidade de posicionar convenientemente o espelho para que os raios solares que incidam no mesmo sejam refletidos no coletor, conforme a figura 27 (STINE; GEIER, 2001). Aplicando a Lei de Snell, na reflexão, o ângulo incidente de um raio em uma superfície é igual ao ângulo do raio refletido. Com essa definição, observa-se que o sistema de rastreamento deve ser capaz de apontar o refletor de tal forma que o vetor normal do mesmo seja a bissetriz do ângulo formado entre os raios solares e a linha que liga o refletor ao coletor. Na figura 27, o heliostato possui grandes perdas devido a sua posição, necessária para que o raio atinja o

coletor. Dessa forma o ângulo  $\theta$  é maior e a consequência é que a área para reflexão é menor, portanto menor energia refletida para o coletor.

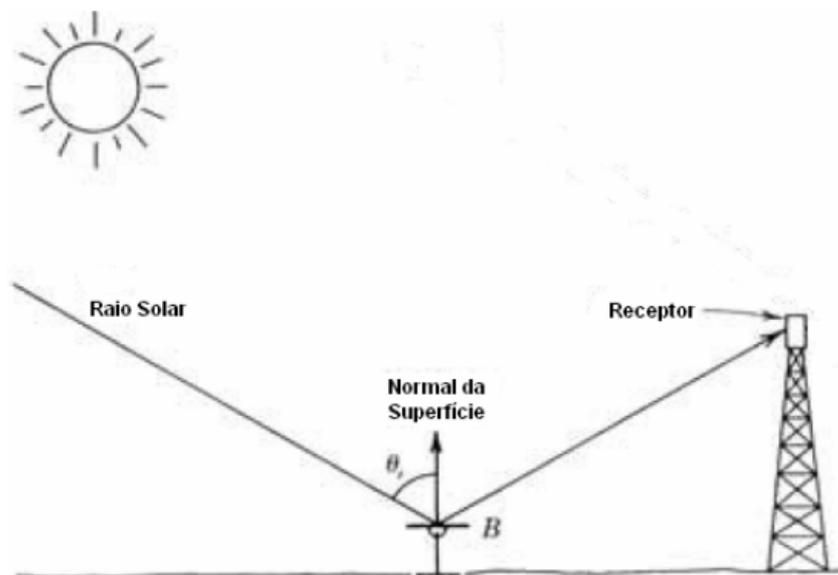


Figura 27 - Heliostato

Fonte: STINE; GEIER, 2001.

Quando o sol está na posição conforme a figura 28, o ângulo  $\theta$  é o menor possível, acarretando que a área de reflexão seja o máximo possível, com isso, uma maior quantidade de energia é refletida para o coletor, aumentando assim a eficiência do sistema.

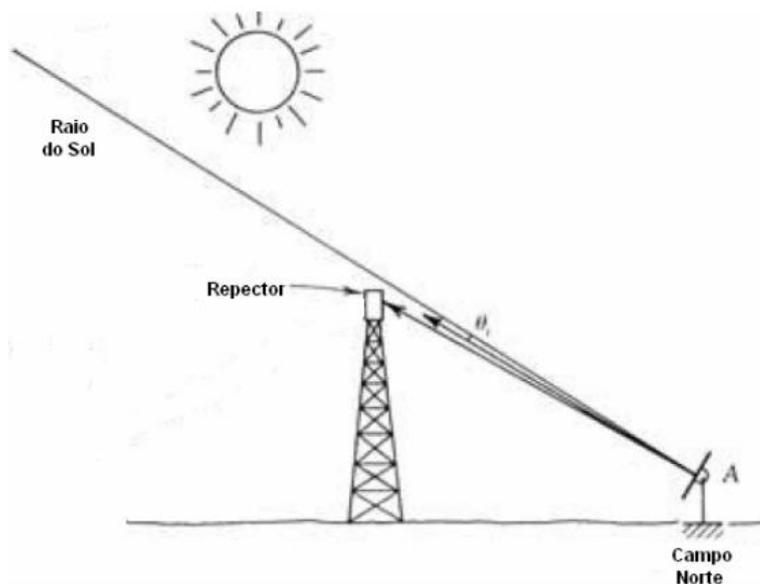


Figura 28 – Posição Favorável do Heliostato

Fonte: STINE; GEIER, 2001.

Na figura 29 pode ser observado o heliostato em posição com maior área de reflexão e na figura abaixo pode ser p heliostato refletindo, porém com uma menor área de reflexão.

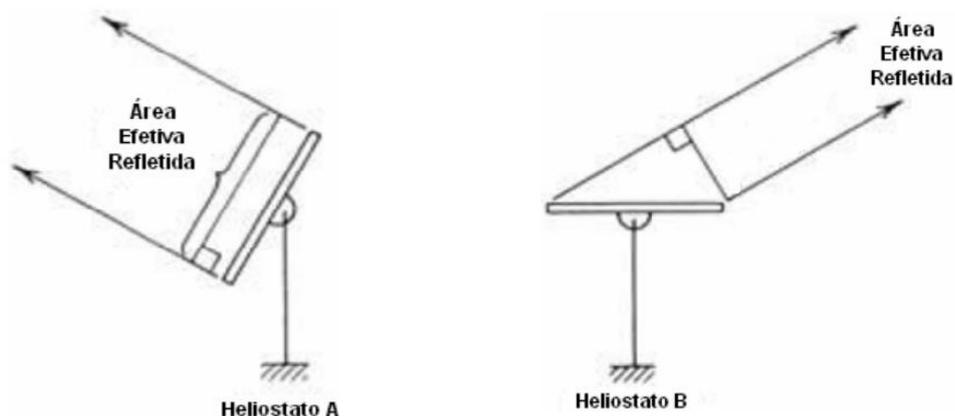


Figura 29 – (a) Heliostato com maior área de reflexão (b) Heliostato com menor área de reflexão

Fonte: STINE; GEIER, 2001.

O sistema proposto neste trabalho aborda uma estrutura mecânica com base metálica que comporta um sistema de dois graus de liberdade, possuindo dois eixos lineares rosqueados que permite uma varredura de 180°. Controlada por servomecanismo dotado de motores de corrente contínua que promovem a movimentação angular do espelho tanto norte - sul quanto leste – oeste. O heliostato possui um algoritmo de comando baseado nas equações solares implementado em um software de computador, permitindo além do controle o monitoramento em tempo real as informações provenientes do heliostato. O projeto mecânico foi desenvolvido em software CAD para um melhor dimensionamento e prospecção do dispositivo. A figura 30 representa a proposta inicial do protótipo de heliostato.

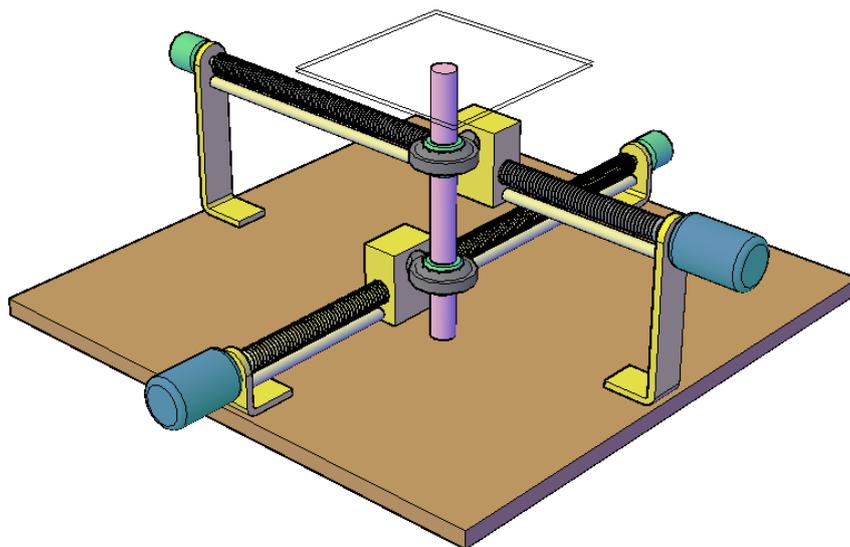


Figura 30 – Proposta Inicial do Heliostato

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Para deslocamento linear o sistema funciona com dois eixos: x posicionado norte - sul e y posicionado leste - oeste respectivamente. Cada eixo possui um carro que desliza linearmente sobre si e sobre dois guias mecânicos, carregando uma junta esférica (rotula mecânica). Na figura 31 pode ser observado um dos eixos e seus respectivos guias.

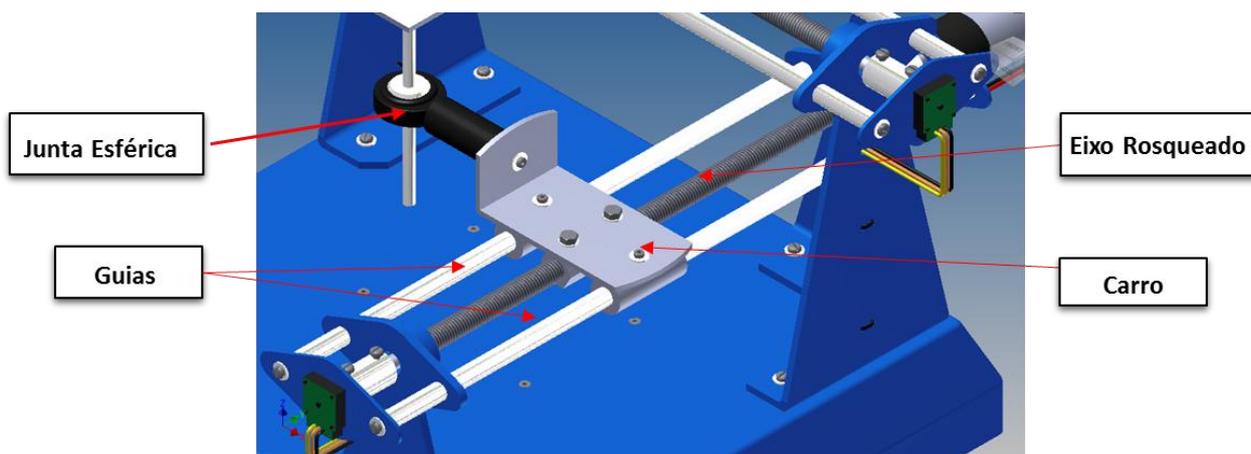


Figura 31 – Eixos e seus respectivos guias

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Para movimentação dos eixos foi utilizado dois motores de corrente contínua de ímã permanente, acoplados em cada eixo. Quando acionado, o motor gira o eixo acarretando um movimento linear no carro. Na outra extremidade do eixo é acoplado um dispositivo encoder circular para monitorar a posição do carro em relação ao eixo. Pode ser observado na figura 32 os motores e os encoders acoplados aos eixos.

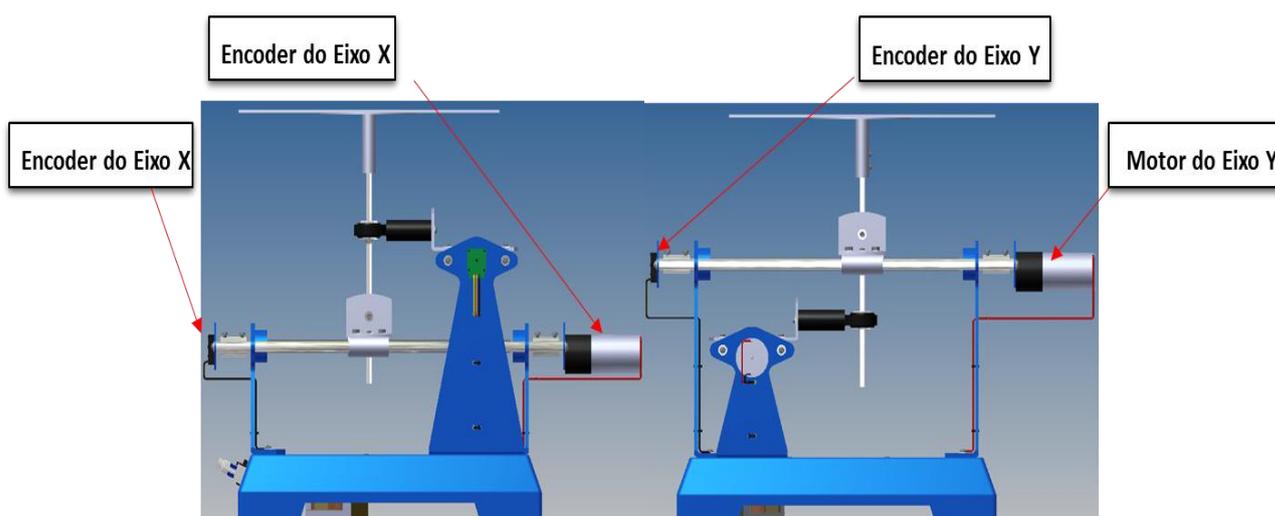


Figura 32 – Motores e os encoders acoplados aos eixos

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Os motores necessitam girar em dois sentidos, para isso foi desenvolvido um drive de acionamento que possui comunicação com o sistema de controle. Este drive consiste em uma placa eletrônica desenvolvida com transistores de potência elétrica necessária para acionar a carga mecânica nos eixos denominada de “ponte H”, arranjo eletrônico para acionar o motor nos dois sentidos de giro. As placas de circuito foram acopladas abaixo da base metálica da máquina bob uma chapa de acrílico isolante. Na figura abaixo podem ser observadas as placas de acionamento dos motores e duas fontes de alimentação, uma de 12V e uma de 5V. A fonte de 12V alimenta os motores e a fonte de 5V alimenta os encoders.

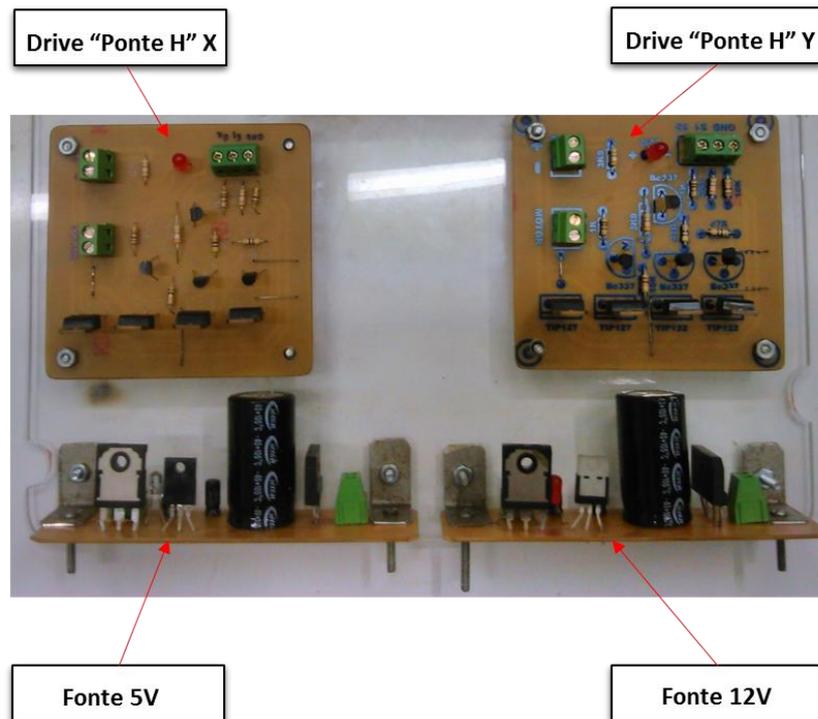


Figura 33 - Placa eletrônica de Interface

Fonte: Produzida pelo próprio autor

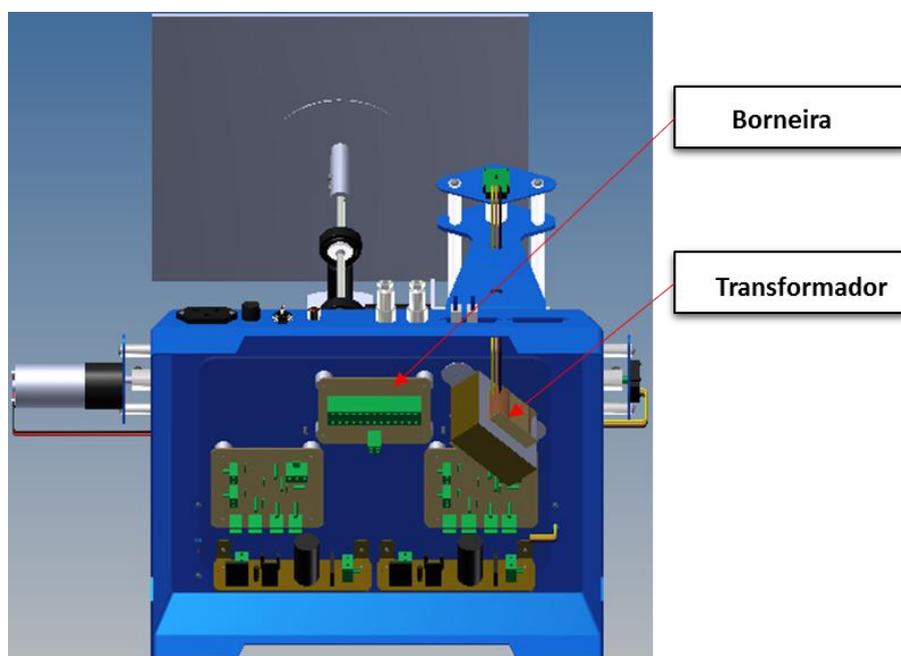


Figura 34 – Transformador e Borneiras

Fonte: Produzida pelo próprio autor

O software escolhido para implementação do algoritmo foi o LabVIEW®. O LabVIEW® (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os sistemas operacionais Windows e Linux.

Segundo (Rocha, 2009) os principais campos de aplicação do LabVIEW são as realizações de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. Um benefício de LabVIEW é o amplo apoio para o acesso a instrumentação e *hardware*. Drivers e captação de camadas para muitos tipos diferentes de instrumentos são incluídos ou estão disponíveis para a inclusão. A imagem 35 demonstra o ambiente de programação e ambiente frontal do LabView.

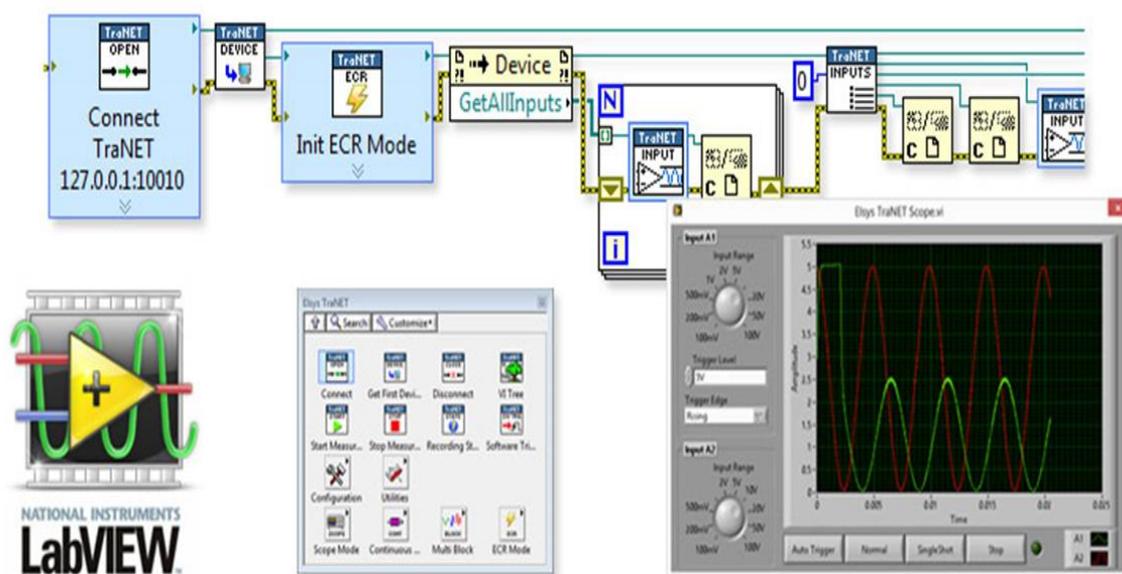


Figura 35 – Software LabView®

Fonte: Disponível em < [www.elsys-instruments.com](http://www.elsys-instruments.com)>.

O dispositivo de hardware utilizado neste trabalho para efetuar a aquisição e geração de dados foi uma placa de aquisição de dados modelo NI USB-6009, da *National Instruments*. Esta placa de aquisição possui conexões para oito canais de entradas analógicas (AI), dois canais de saídas analógicas (AO), 12 canais de entradas/saídas digitais (DIO) e um

contador de 32 *bits* com interface USB. Além disso, a taxa de amostragem de 48 kS/s (NI USB-6008/6009..., 2006a). A placa de aquisição de dados pode ser observada na figura 36



Figura 36 – Placa de aquisição 6009 NI

Fonte: (NI USB-6008/6009, 2006a).

O algoritmo desenvolvido para o rastreamento solar é definido pelas equações solares descritas no ponto 3.2. A determinação do uso das equações que regem a geometria solar para rastreamento em heliostatos e seguidores é devido aos possíveis sombreamentos que dias nublados influenciariam os sensores acarretando movimentos desnecessários para os motores. O primeiro passo é calcular o dia do ano, onde o dia 1 de janeiro trata se do dia 1. Com base nessa informação é possível calcular a declinação solar estacional que por sua vez permite encontrar a hora solar. A partir da hora solar pode ser obtido o ângulo horário que é base para encontrar a altura solar, o zênite solar e o azimute solar. A posição solar é descrita pelo azimute e pela altura, com isso é possível acionar os motores e posicionar o espelho para a posição solar de acordo com sua variação, sendo possível corrigir a variação zenital e azimutal rastreamento o sol durante o dia e durante o ano. Na figura 37 pode ser observado o azimute ( $\gamma_s$ ) e a altura ( $\alpha$ ), ou seja, a posição solar.

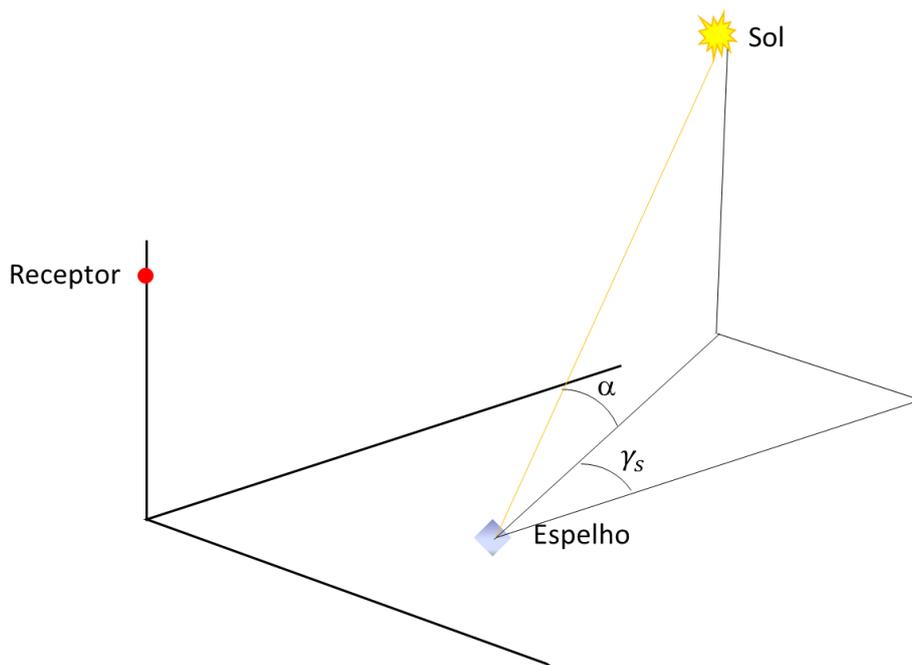


Figura 37 – Azimute ( $\gamma_s$ ) e Altura ( $\alpha$ )

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Esse modelo pode ser utilizado para vários tipos de seguidores solares de dois eixos e pode ser adaptado também a coletores térmicos com absorvedores. As rotinas de software para rastreamento solar utilizadas pelo algoritmo desenvolvido, pode ser observado na figura 38.

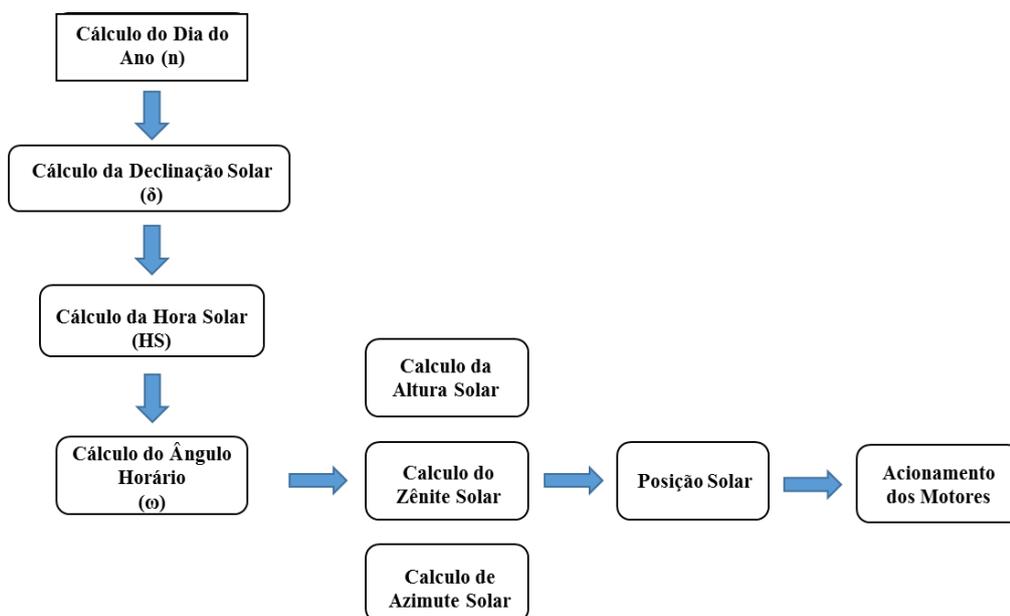
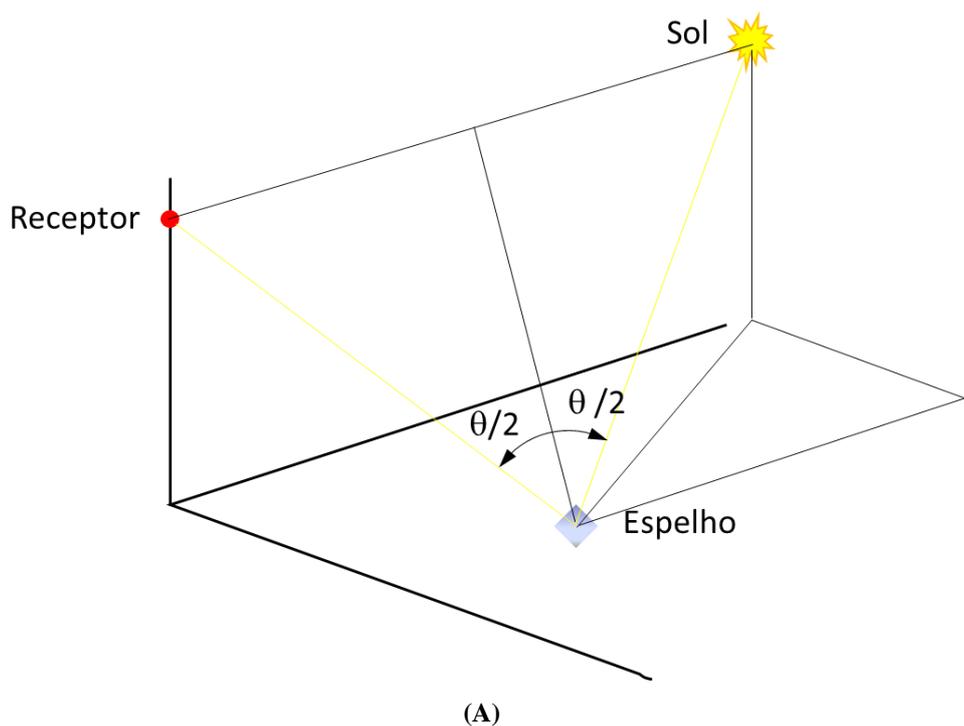


Figura 38– Algoritmo de Rastreamento Solar

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Para o sistema proposto funcionar como heliostato não basta apenas seguir o sol, deve também ser capaz de refletir a radiação solar em um ponto fixo pré-estabelecido (receptor). Para que os raios solares cheguem ao receptor é necessário obter a posição solar. Aplicado as leis da ótica, consideremos que o sol está na mesma altura do receptor, dessa maneira podemos entender que existe um plano imaginário que contém os raios de sol que serão refletidos no espelho. Consideremos a bissetriz do ângulo, figura 39 (A), resultando em mais dois ângulos  $\epsilon$  e  $\Psi$  conforme podemos observar na figura 39 (B).



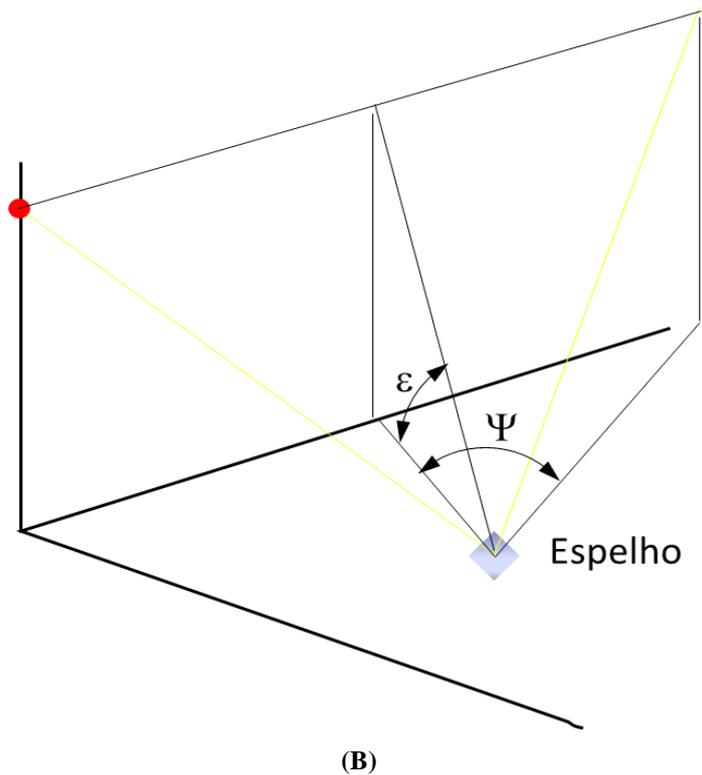


Figura 39 – (a) bissetriz do ângulo (b) ângulos  $\varepsilon$  e  $\Psi$

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Considerando que o espelho está na posição horizontal, deverá gira em torno de “x” um ângulo de  $90-\varepsilon$  e em torno de “z” um ângulo de  $90-(\beta+\Psi)$ , conforme descrito na figura 40.

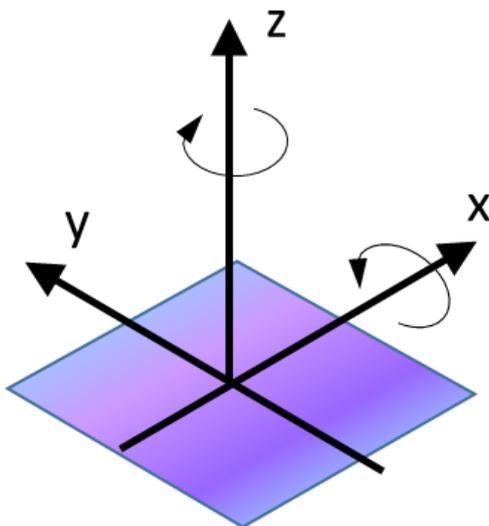


Figura 40 – Espelho com os respectivos movimentos

Fonte: Produzida pelo próprio autor

A configuração completa do sistema desenvolvido é descrita no esquema na figura 41, mostrando a aplicação de todos os dispositivos no sistema. Pode ser observado desde o computador que embarca o software LabView com o algoritmo desenvolvido, a placa de aquisição de dados, os encoders, os drives de acionamento, os motores e o mecanismo de movimentação.

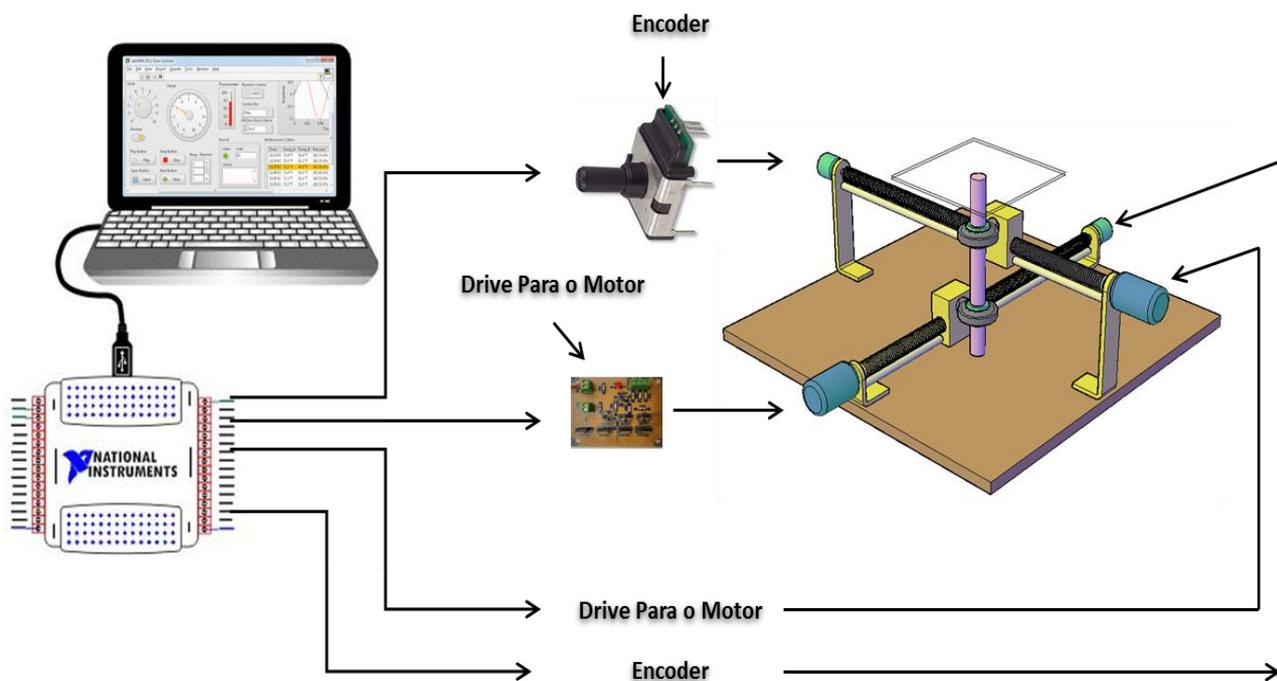


Figura 41 – Configuração do Sistema

Fonte: Produzida pelo próprio autor

## 5. CAPÍTULO

### 5.1. Resultados e Discursões

Com base nos dados reais fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Meteorologia (INMET) foi realizada uma simulação para calcular a energia em MJ/m<sup>2</sup> que será refletida pelo heliostato ao receptor. Foi utilizado a equação 47, segundo (Duffie e Backman, 2006), que considera a energia que chega ao absorvedor seja dada pela radiação direta, a área do espelho utilizado, o índice de reflexão do espelho e a absorvidade do material do absorvedor.

$$Q_a = I_{dir} \cdot A_m \cdot \eta_0 \cdot \alpha_{abs} \quad (47)$$

Pode ser observado na figura 42 o comportamento da radiação global, difusa, direta e a energia refletida ao absorvedor. As perdas em heliostatos podem ser vistas no ponto 3.2.

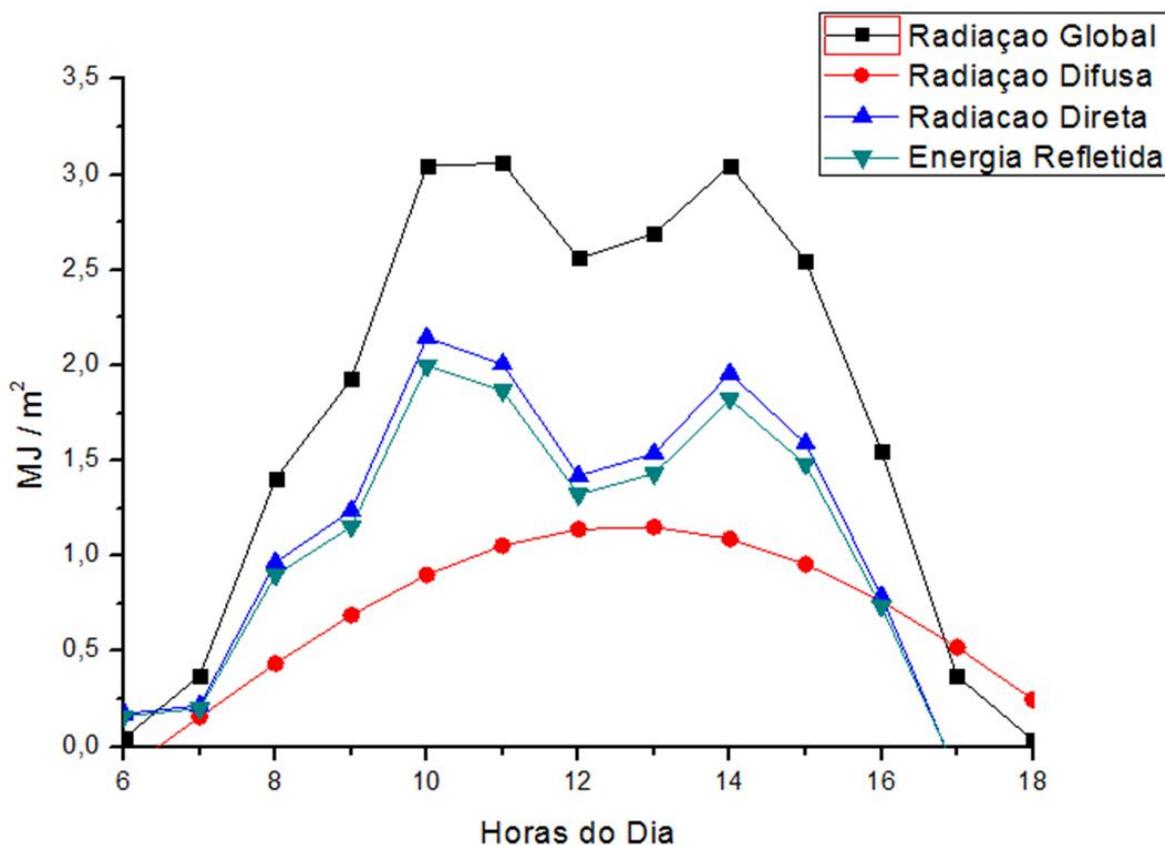


Figura 42 – Simulação do comportamento da radiação global, difusa, direta e a energia refletida ao absorvedor

Fonte: Produzida pelo próprio autor

Para verificação da precisão e exatidão do dispositivo, quando diz respeito a capacidade de reflexão da radiação em um ponto fixo, foi desenvolvida uma plataforma de teste com o intuito de estimar o grau e a faixa de erro de acordo com a localização. Para efeito de teste foi utilizado um feixe de luz pontual, pois possibilita a melhor observação de erro. Foi estabelecido três situações de posições diferentes quanto ao sol e o receptor. A posição 1, descrita da figura 43 e 44 onde o sol localiza se a leste do receptor e o mesmo localiza se no hemisfério sul. Para essa situação de posição solar, estabelecida pelo azimute e altura solar sendo uma manhã, foi constatado um erro médio de 12,1 cm de distância em relação ao ponto central do receptor. A figura 43 descreve o posicionamento do sol, espelho e absorvedor. A figura 44 descreve o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema.

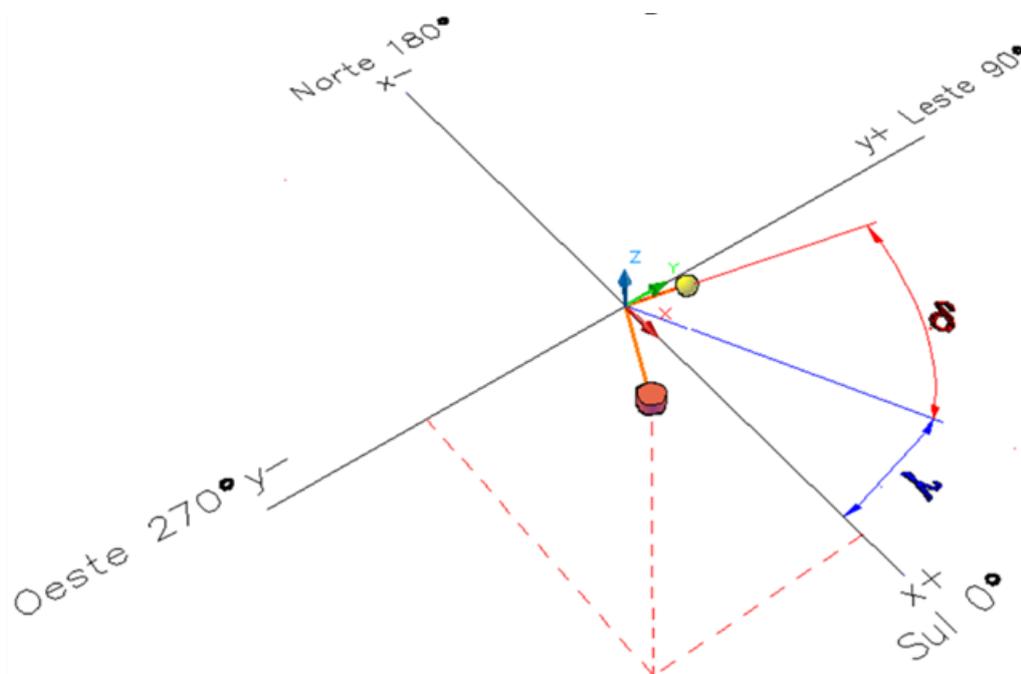


Figura 43 – Representação da posição do sol e do heliostato

Fonte: Produzida pelo próprio autor

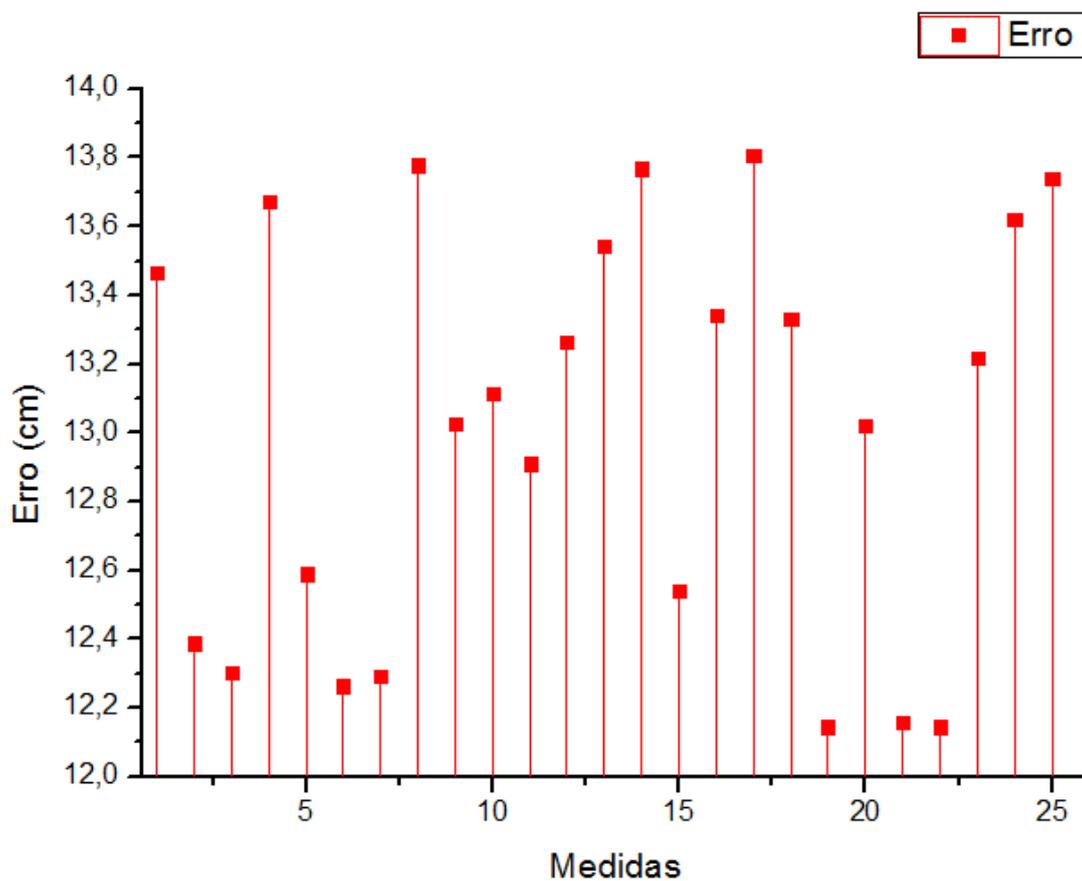


Figura 44 - Erro de reflexão em função de degrau de setpoint

Fonte: Produzida pelo próprio autor

O quadro 2 descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 1.

Quadro 2 – Parâmetros utilizados na situação 1 e obtidos

<b>Erro Médio</b>	<b>12,1cm</b>
<b>Azimute solar (<math>\gamma</math>)</b>	<b>25,79°</b>
<b>Altura Solar (<math>\alpha</math>)</b>	<b>46,16°</b>

O quadro 3 descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise da situação 1.

Quadro 3 – Parâmetros estatísticos obtidos na situação 1

<b>Erro Médio</b>	<b>12,1cm</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,05768cm</b>
<b>Desvio Médio</b>	<b>0,05768cm</b>
<b>Variância</b>	<b>0,00332cm</b>

A posição 2, descrita da figura 45, onde o sol localiza se a norte do receptor e o mesmo localiza se no hemisfério sul. Para essa situação de posição solar, estabelecida pelo azimute e altura solar sendo uma tarde, foi constatado um erro médio de 16,7 cm de distância em relação ao ponto central do receptor. A figura 45 descreve o posicionamento do sol, espelho e absorvedor. A figura 46 descreve o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema.

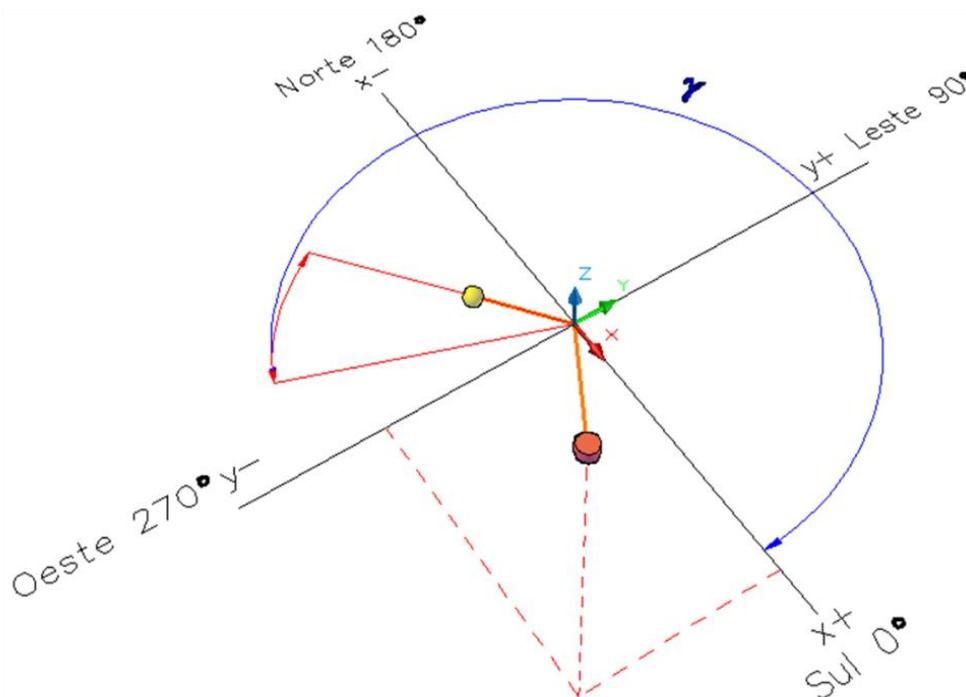


Figura 45 – Representação da posição do sol e do heliostato

Fonte: Produzida pelo próprio autor

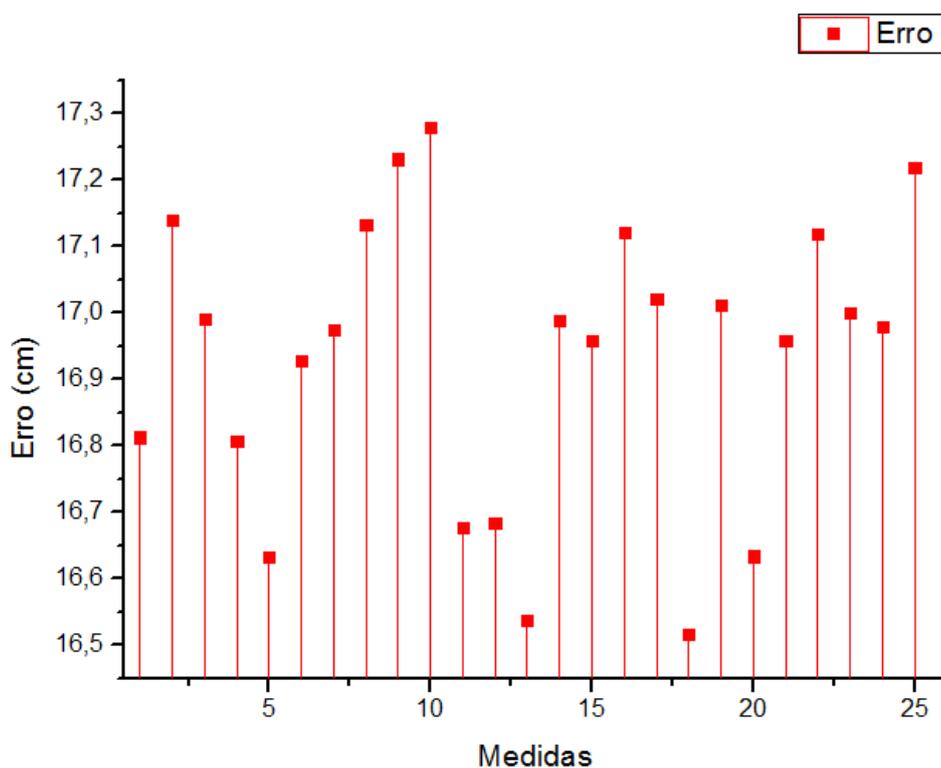


Figura 46 – Erro de reflexão em função de degrau de setpoint

Fonte: Produzida pelo próprio autor

O quadro 4 descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 2.

Quadro 4 – Parâmetros utilizados na situação 2 e obtidos

<b>Erro Médio</b>	<b>16,7cm</b>
<b>Azimute solar (<math>\gamma</math>)</b>	<b>249,88°</b>
<b>Altura Solar (<math>\alpha</math>)</b>	<b>33,98°</b>

O quadro 3 descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise da situação 2.

Quadro 5 – Parâmetros estatísticos obtidos na situação 2

<b>Erro Médio</b>	<b>16,7cm</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,2264cm</b>
<b>Desvio Médio</b>	<b>0,1886cm</b>
<b>Variância</b>	<b>0,0512cm</b>

A posição 3, descrita da figura 47, onde o sol localiza se a oeste do receptor e o mesmo localiza se no hemisfério sul. Para essa situação de posição solar, estabelecida pelo azimute e altura solar sendo uma tarde, foi constatado um erro médio de 14,9 cm de distância em relação ao ponto central do receptor. A figura 48 descreve o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema.

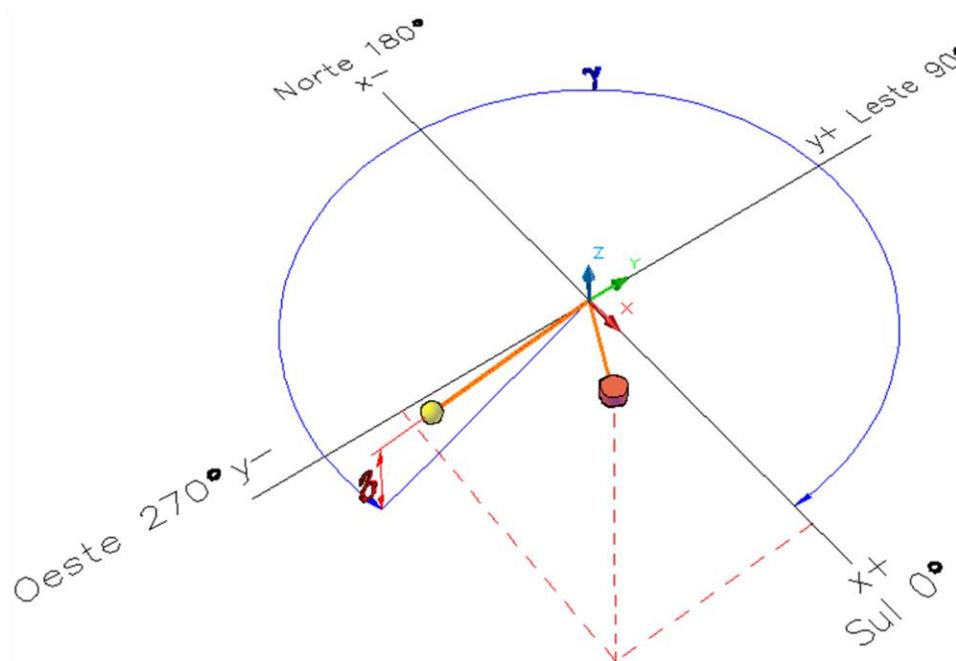


Figura 47 – Representação da posição do sol e do heliostato

Fonte: Produzida pelo próprio autor

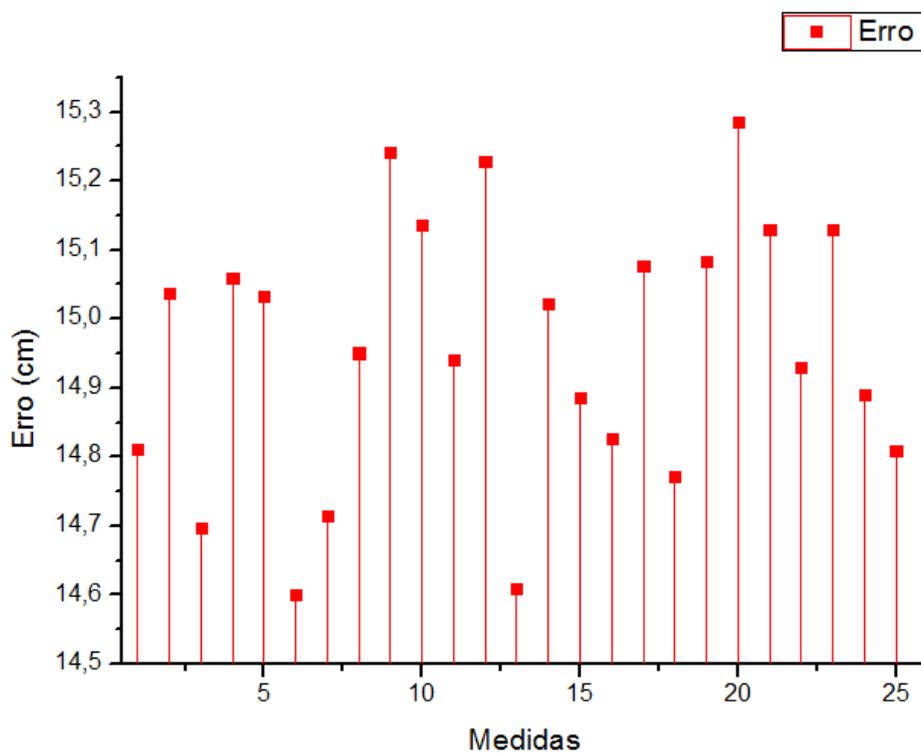


Figura 48 - Erro de reflexão

Fonte: Produzida pelo próprio autor

O quadro 6 descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 3.

Quadro 6 – Parâmetros utilizados na situação 3 e obtidos

<b>Erro Médio</b>	<b>14,9cm</b>
<b>Azimute solar (<math>\gamma</math>)</b>	<b>285,39°</b>
<b>Altura Solar (<math>\alpha</math>)</b>	<b>14,53°</b>

O quadro 7 descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise da situação 3.

Quadro 7 – Parâmetros estatísticos obtidos na situação 3

<b>Erro Médio</b>	<b>14,9cm</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,1857cm</b>
<b>Desvio Médio</b>	<b>0,1524cm</b>
<b>Variância</b>	<b>0,0345cm</b>

Foi observado que no aumento da distância do receptor para o coletor reflete diretamente no erro de posicionamento do sistema. A medida que a distância do coletor para o receptor aumenta o erro de reflexão diminui, segundo o algoritmo proposto, tornando o heliostato mais preciso. A figura 49 descreve o erro em função da distância.

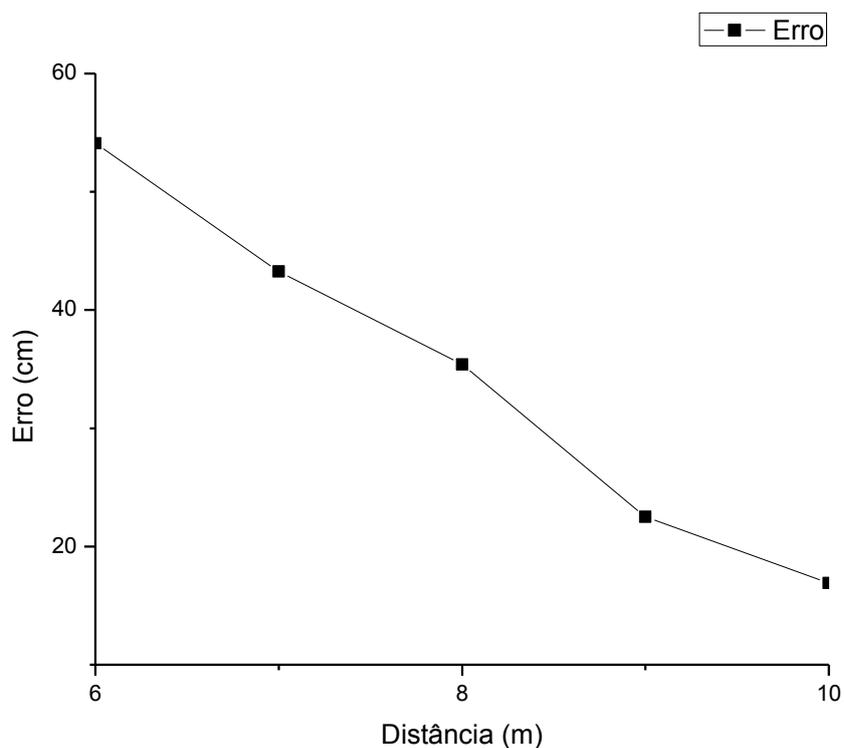


Figura 49 – Erro em função da distância do receptor

Fonte: Produzida pelo próprio autor

O algoritmo desenvolvido mostrou uma precisão feita em passos de  $0,619^\circ$ , porém o mecanismo apresentou erros muito maiores, conforme visto nas situações propostas, pelo uso de um encoder incremental que não apresentou funcionamento adequado para o sistema,

apresentando erros constantes e perdas de medida. O problema gerado pelo encoder justifica também os valores de erros vistos nas situações propostas serem apenas positivo, mostrando as perdas de incrementos no sensor de deslocamento angular. Positional Solar Algorithm) definido por Blanco-muriel et al. (2001) mostrou uma estratégia de controle que é efetuada em passos de  $0,410^\circ$  que são repetidos a cada 69,12s o que proporciona um erro médio de  $0,2^\circ$ , mostrando assim, que com o uso de encoder adequado é possível aplicar um controle muito próximo aos padrões de referência.

Para simular o comportamento dos ângulos solares foi construído um instrumento virtual utilizando a plataforma LabView da *National Instruments*. A primeira tela pode ser observada na figura 50. A ferramenta captura a data e hora do computador a qual está rodando o software e automaticamente processa a quantidade de dias decorridos durante o ano até o presente momento de execução do mesmo. Possui dias abas onde a primeira trata da geometria solar e a segunda de radiação. Com base nos dados de entrada, que são latitude local e longitude, o sistema descrito na primeira aba calcula os parâmetros básicos da geometria solar, conforme observado na figura 50.



Figura 50 – Tela 1 do simulador de sistemas solares

Fonte: Produzida pelo próprio autor

A figura 51 demonstra a segunda aba do sistema que trata dos principais parâmetros de radiação.

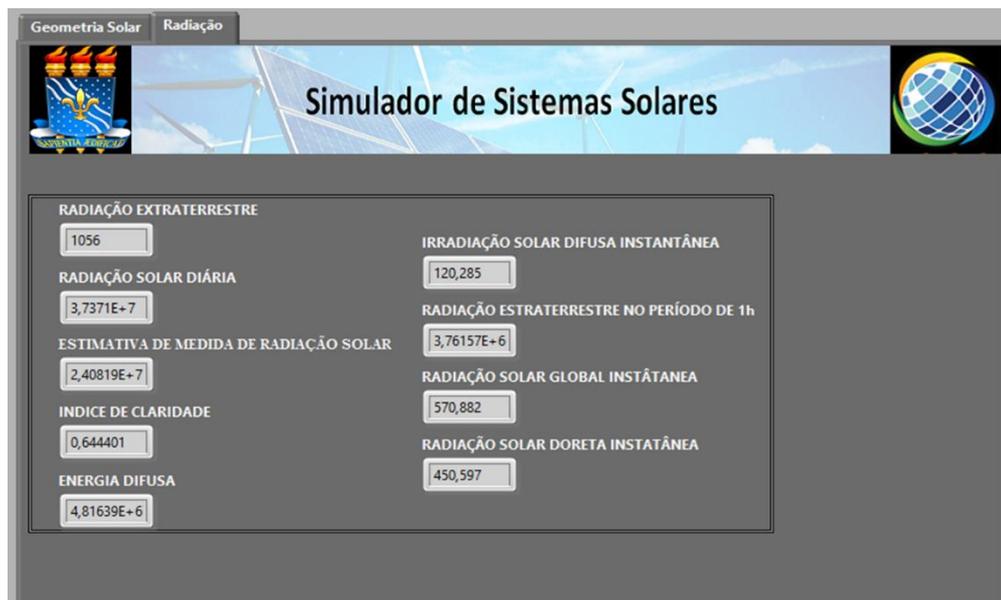


Figura 51 - Tela 2 do simulador de sistemas solares

Fonte: Produzida pelo próprio autor

A figura 50(A) demonstra o heliostato em projeto mecânico desenvolvido em software CAD a figura 50(B) demonstra o protótipo construído para a realização dos testes.

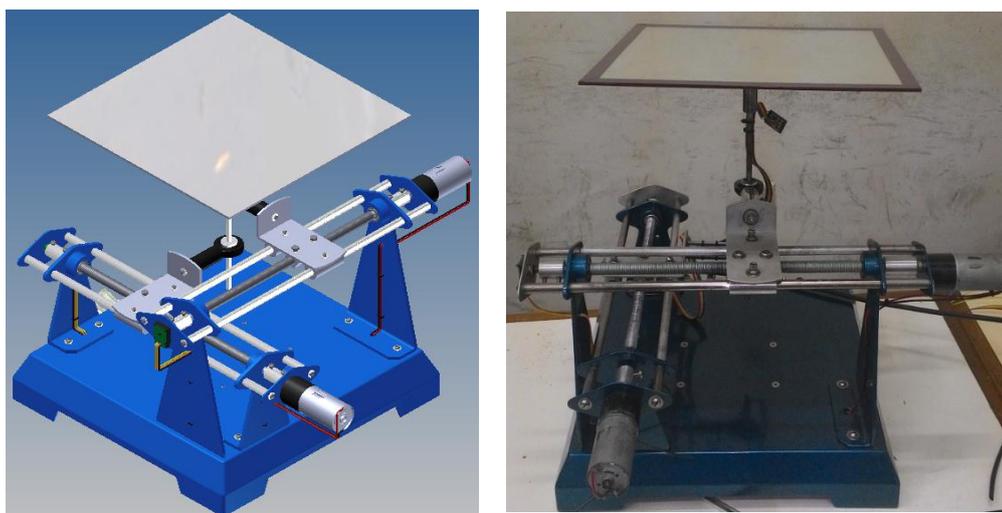


Figura 52 – (A) Projeto do sistema mecânico em CAD; Protótipo construído

Fonte: Produzida pelo próprio autor

## 6. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada atingiu os objetivos propostos, tendo sido desenvolvido um sistema para rastreamento solar e reflexão em ponto fixo sendo possível utilizar o heliostato para geração de energia solar térmica em torres solares.

Uma importante contribuição que a pesquisa apresentada se refere ao projeto de suporte mecânico desenvolvido, o qual posiciona o espelho com dois graus de liberdade dando possibilidade de locar o heliostato em qualquer posição ao redor da torre solar (receptor central), em contrapartida necessita de um algoritmo de maior complexidade com relação aos heliostatos de projeto mecânico mais simplista.

O uso das equações geométricas do comportamento solar para rastreamento da posição do mesmo, apresenta se bastante favorável para evitar movimentos desnecessários em casos de sombras causadas por nuvens. O algoritmo desenvolvido prevê exatidão ao localizar o Sol, acionando motores de maneira a direcionar o espelho refletir a radiação solar no receptor da torre solar. O uso do software LabView® para controle e monitoramento mostrou-se adequado para a atividade de pesquisa desenvolvidas; entretanto, devido ao seu alto custo, conexões elétricas e aquisição de dados demonstrou não ser a melhor solução para este fim específico. O uso aplicado de um sistema embarcado microcontrolado dedicado ao sistema atinge melhor os objetivos e barateia o projeto. Os circuitos eletrônicos utilizados foram satisfatórios em seus funcionamentos, tendo como exceção o encoder circular, que apresentou inúmeros erros de leitura em velocidades altas.

Conforme descrito no ponto 5, foi observado que o dispositivo apresentou erros de reflexão em média de 20cm. A precisão aumenta quando o heliostato está posicionado de maneira que o ângulo  $\theta$  tende a diminuir, conforme o já esperado (descrito na figura 28). Quando o ângulo  $\theta$  tende a aumentar a precisão do sistema diminui (descrito na figura 27). Também pode ser observado que a distância do heliostato para o absorvedor influencia de maneira negativa na precisão do sistema, desta feita em quanto maior a distância maior a precisão.

Para trabalhos futuros sugiro um suporte mecânico diferenciado buscando atender o mesmo fim, porém com um algoritmo menos complexo. Como sugestão também proponho utilizar um sistema embarcado microcontrolado para controle do sistema e implementação de testes de algoritmos mais precisos. Ainda proponho implementação de sistemas rastreadores com sensores e inteligência artificial para estudos comparativos.

## 7. REFERÊNCIAS

- BARBOSE, G., BOLINGER, M., BRINKMAN, B., *et al.* SunShot Vision Study. SunShot U. S. Department of Energy, 2012. Disponível em: <[http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/vision\\_study.html](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/vision_study.html)>. Acesso em: 20 jan. 2013.
- BRAKMANN, G., RAINER, A., TESKE, S., *et al.* Solar Thermal Power 2020: em: <<http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/solarthermal-power-2020/>>. Acesso em: 22 mar. 2013.
- Diver, Richard B. e Moss, Timothy A. (2008), "**Development of a top alignment system for parabolic trough solar collectors**", Sandia National Laboratories.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético nacional**. Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2015.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético nacional**. Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2010.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético nacional**. Ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, 2013.
- KALOGIROU, S. Solar energy engineering: processes and systems. USA: Elsevier, 2009.
- MANOEL, P. S., **Solar Fotovoltaica: Por que já investir na tecnologia do futuro**, Encontro Catarinense da Indústria 2010, Florianópolis, 2010. Solar Millenium (2008), "The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3 - The largest solar power plants in the world", <<http://www.solarmillennium.de>>.
- MILLER, A., LUMBY, B. Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers and Investors. International Finance Corporation, 2012. Disponível em: <<http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/04b38b804a178f13b377ffdd29332b51/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 12 jan. 2013.
- POULEK, V., Libra, M., 1998. "**New solar tracker**". Solar Energy Materials and

Solar Cells, vol.51, pp.113-120.

POULEK, V., Libra, M., 2000. **“A very simple solar tracker for space and terrestrial applications”**. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.60, pp.99-103.

NATIONAL Instruments, **NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications**, National Instruments Corporation, 2006a.

MAVROMATAKIS, F., Franghiadakis, Y., 2008. **“A highly efficient novel azimuthal heliotrope”**. Solar Energy, vol.82, pp.336-442.

ABOUZEID, M., 2001. **“Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller”**. Renewable Energy, vol.23, pp.551-560.

VILELA O.C., Fraidenraich N., Tiba C., 2003. **“Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. Experiments and simulation”**. Solar Energy, vol.74, pp. 45-52.

HEIN M., Dimroth F., Siefert G., Bett A.W., 2003. **“Characterisation of a 300x photovoltaic concentrator system with one-axis tracking”**. Solar Energy Materials & Cells, vol.75, pp.277-283.

POULEK, V., Libra, M., 1998. **“New solar tracker”**. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.51, pp.113-120.

ROTH P., Georgiev A., Boudinov H., 2004. **“Design and construction of a system for sun-tracking”**. Renewable Energy, vol.29, pp.393-402.

CANÁDA J., Utrillas M.P., Martínez-Lozano J.A., Pedrós R., Gómez-Amo J.L., Maj A., 2007. **“Design of a sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330–1100nm range”**. Renewable Energy, vol.32, pp.2053-2068.

COSTA, Heitor Scalabrini. **“Desenvolvimento e avaliação de um sistema de conversão fotovoltaico acoplado a concentradores parabólicos compostos”**. (Mestrado

em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1993.

FRAGA, Antônio Nelson da Silva. **Sistema de Micro-Irrigação Utilizando Gerador CEC – Fotovoltaico**. (Doutorado Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1989.

ROCHA, C.F, 2009, *Técnicas de Controle de Temperatura Utilizando LabVIEW*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto MG

MONTEIRO, FLÁVIO A. M.; **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**. 2007. (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

VIEIRA, M. V.,. **Estudo Experimental e Teórico de um Resfriador de Água por Adsorção Usando Energia Solar**. 2013. (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

OLIVEIRA, CARLOS A. A.; **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007 (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

BIANCHINI, H. M.,. “**Avaliação comparativa de sistemas de energia solar térmica**”. 2013 (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FEUERMANN, DANIEL; GORDON, JEFFREY M.; HULEIHIL, MAHMOUD, **Solar fiber-optics mini-dish concentrators: first experimental results and field experience**. *Solar Energy*, v.72, n. 6, 2002.

BAKOS, GEORGE C. **Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement**. *Renewable Energy*, v. 31, 2006.

NAIDOO, P., BROOKS, M.J. e VAN NIEKERK, T.I. **Intelligent control and tracking**

**of a solar parabolic trough.** In: AFRICAN CONTROL CONGRESS, 1., 2003, África do Sul, Annals, Cidade do Cabo: Universidade da Cidade do Cabo, 2003.

ZOGBI, R.; LAPLAZE, D. **Design and construction of a sun rastreador.** Solar Energy, v. 33, n. 3/4, 1984.

ROCHA, C.F, 2009, **Técnicas de Controle de Temperatura Utilizando LabVIEW.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto MG

CRESB Informe: **Atlas Solarimetrico do Brasil.** 2000, Disponível em.  
<[http://www.cresb.cepel.br/Publicações/doenload/Info5\\_pag8-9.PDF](http://www.cresb.cepel.br/Publicações/doenload/Info5_pag8-9.PDF)> Acesso em:  
08/05/2015.

RAGHEB, M . **Historical Perspective** . University of Illinois at Urbana-champaign, Estados Unidos, 2011. Disponível em:  
<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20498ES%20Energy%20Storage%20Systems/Historical%20Perspective.pdf>.

KREITH, F.; Kreider, J.F. (1978) **Principles of Solar Engineering**” McGraw-Hill Co.

ONUDI, 2014,. **“Energia Solar Térmica”**. Observatório de Energias Renováveis para América Latina e Caribe.

OLIVEIRA, C. A. A., 2007. **“Desenvolvimento de um Protótipo de rastreador Solar de Baixo Custo e sem Baterias”**, Dissertação de Mestrado em Ciências – Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

BURGUI, A. S., 2010. **“Avaliação do potencial técnico de geração elétrica termossolar no brasil a partir de modelagem em sig e simulação de plantas virtuais”** Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético, COPPE, UFRJ, Programa de pós Graduação em Planejamento Energético.

MOUSTAFA, S.; HOEFLER, W.; EL-MANSY, H.; KAMAL, A.; JARRAR, D.; HOPPMAN, H.; ZEWEN, H. **Design specifications and application of a 100 kWe (700 kWth) cogeneration solar power plant.** Solar Energy, v. 32, n. 2, pp. 263-269, 1984.

IEA, 2010. **Technology Roadmap.** Concentrating Solar Power., s.l.: International Energy Agency. Paris, França.

IRENA, 2012. **Concentrating Solar Power.** Renewable Energy Technologies: Cost ANALYSIS Series., s.l.: IRENA Working Paper. Volume 1: Power Sector. Issue 2/5. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos.

KEARNEY, A., 2010. Solar Thermal Electricity 2025. **Clean electricity on demand: attractive STE cost stabilize energy production..** s.l.:A.T. Kearney GmbH. Düsseldorf, Alemanha.

BUIE, D., DEY, C. J., BOSI, S., **The effective size of solar cone for solar concentrating systems.** Solar Energy, v. 74, 2003.

RABL, A. **Active solar collectors and their applications.** New York: Oxford University Press, 1985.

FRAIDENRAICH, N. e LYRA, F. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1995.

STINE, WILLIAM B.; GEYER, MICHAEL, **Power from the sun.** Pomona: California State Polytechnic University ed., 2001.

FILHO, M. H. O. P., 2010. **”Simulação e Análise de Sistemas de Alta Concentração de radiação Solar”**, ”, Dissertação de Mestrado em Ciências – Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., **Solar Engineering of Thermal Process**, 3a edição,

John Miley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.

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