

DESENVOLVIMENTO DE UM HELIOSTATO DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE PARA GERAÇÃO HELIOTERMICA EM TORRES SOLARES

Alysson Domingos Silvestre, silvestredomingos01@gmail.com¹

Melquisedeque S. B. da Silva Gomes, gomesmelquisedeque8@gmail.com²

Jose Maurício A. M. Gurgel, josemauriciogurgel@gmail.com¹

¹Universidade Federal da Paraíba

²Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba

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. 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) e o uso das equações geométricas do comportamento solar para rastreamento da posição do mesmo, apresentando se bastante favorável para evitar movimentos desnecessários em casos de sombras causadas por nuvens.

Palavras-chave: Energia solar, termosolar, heliostato, controle, Labview®

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 energéticos 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

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).

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 relações mais equilibrada entre produção energética e sustentabilidade.

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 heliotermicas 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.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

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).

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 sobre geometria esférica solar. 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 1 (STINE; GEIER, 2001, adaptado). 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 1, o heliostato possui grandes perdas devido a sua posição, necessária para que o raio atinja o coletor. Dessa forma o ângulo θ é maior e a consequência é que a área para reflexão é menor, portanto, menor energia refletida para o coletor. Quando o sol está na posição conforme a figura 2, o ângulo θ 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. Na figura 3(a) pode ser observado o heliostato em posição com maior área de reflexão e na figura 3(b) pode ser observado o heliostato refletindo, porém com uma menor área de reflexão.

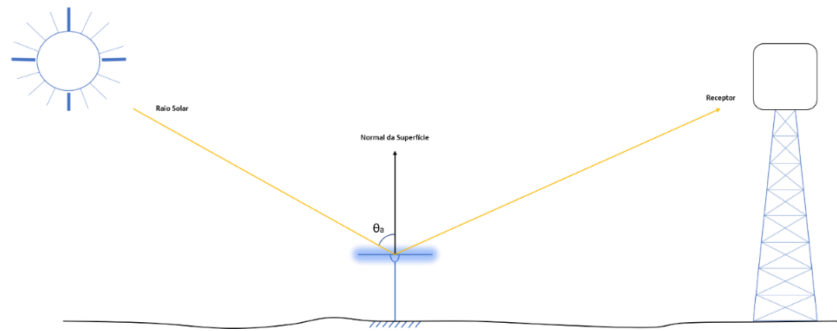


Figura 1 – Heliostato

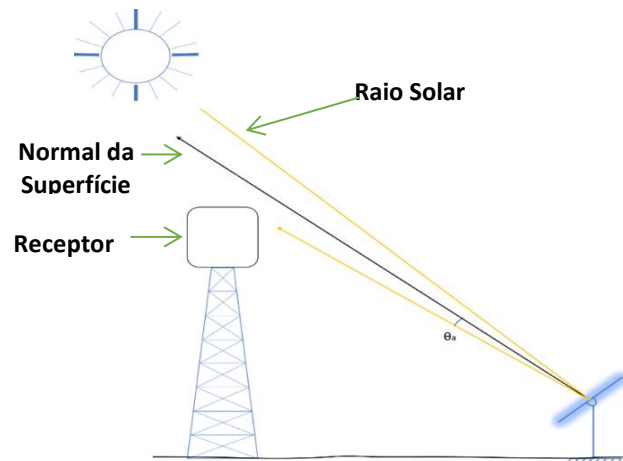


Figura 2 – Posição Favorável do Heliostato

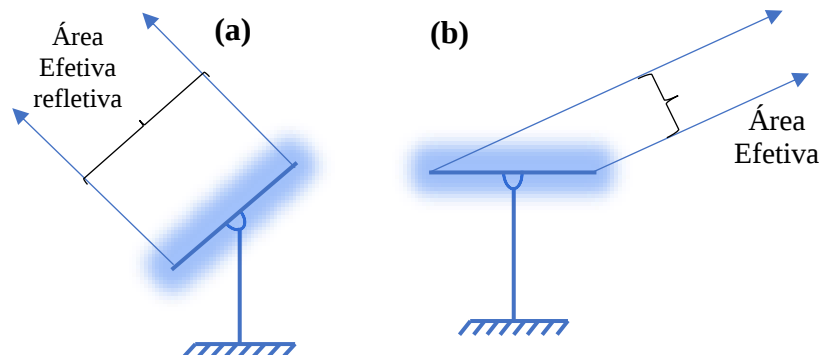


Figura 3 – (a) Heliostato com maior área de reflexão. (b) Heliostato com menor área de reflexão

3. MATERIAIS E METODOS

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 dispositivo. O projeto mecânico foi desenvolvido em software CAD para um melhor dimensionamento e prospecção do dispositivo. 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 4(a) pode ser observado um dos eixos e seus respectivos guias. 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 digital para monitorar a posição do carro em relação ao eixo. Pode ser observado na figura 4(b) os motores e os encoders acoplados aos eixos. 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 sob 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. 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. 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).

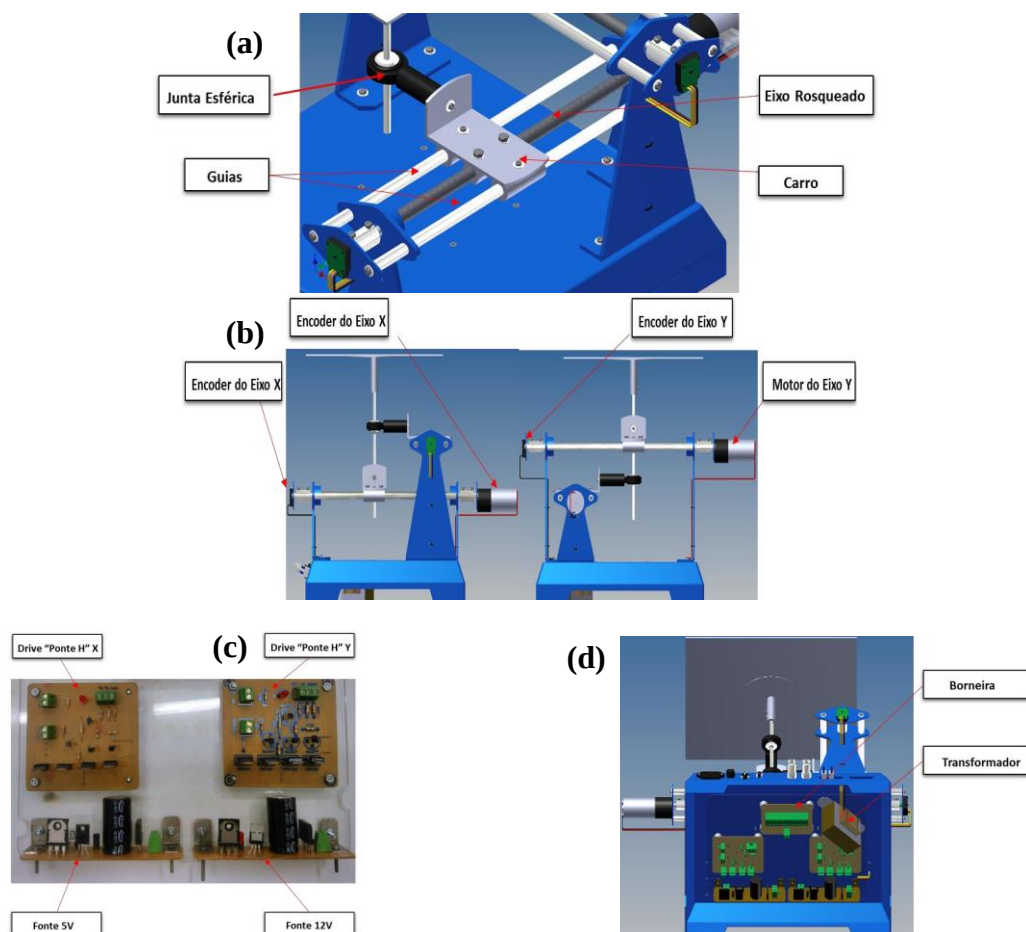


Figura 4 –Componentes Eletromecânicos do Dispositivo

(a) Eixos, fusos e seus respectivos componentes. (b) Motores e os encoders acoplados aos eixos. (c) Placa eletrônica de interface. (d) Transformador e borneiras.

3.1. Algoritmo de Rastreamento

O algoritmo desenvolvido para o rastreamento solar é definido pelas equações solares descritas, posteriormente. 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 atuariam 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 rastreando o sol durante o dia e durante o ano. Na figura 5(a) pode ser observado o azimute (γ_s) e a altura (α), ou seja, a posição solar. Esse modelo pode ser utilizado para vários tipos de seguidores solares de dois eixos e pode ser adaptado também a coletores térmicos com absorvedores. O diagrama de blocos das rotinas de software para rastreamento solar utilizadas pelo algoritmo desenvolvido, pode ser observado na figura 5(b).

Segundo (Duffie e Backman, 2006; Klüppel 1985): Declinação Solar (δ) - 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:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin \left[360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

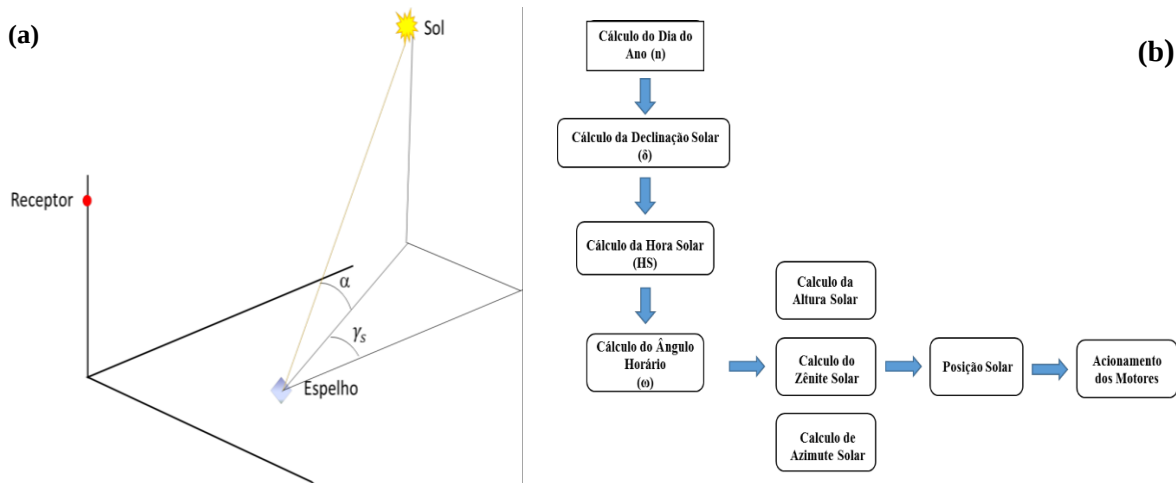


Figura 5 – Azimute (γ_s) e Altura. (b) Algoritmo de Rastreamento Solar

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

$$E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (2)$$

Onde:

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

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° referente a cidade de Brasília – DF, L_l é a longitude local e E é a equação do tempo.

Ângulo Horário (ω) - É o ângulo formado pela projeção no plano do equador da linha centro a centro com a projeção do meridiano local, ou seja, é a hora solar expressa em deslocamento angular. É dado pela equação.

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

O ângulo azimutal da superfície (γ_{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.

$$\gamma_{\text{sup}} = 180^\circ \quad (6)$$

Altura solar (α_s) - corresponde ao ângulo entre os raios solares e sua projeção em um plano horizontal. A altura solar pode ser dada pela equação:

$$\text{sen}(\alpha_s) = (\text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi) + ((\cos \delta \cdot \cos \phi) \cdot \cos \omega) \quad (7)$$

Azimute solar (γ_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:

$$\text{sen} \gamma_z = \frac{\text{sen}(\omega) \cdot \cos(\delta)}{\cos h} \quad (8)$$

$$\cos \gamma_z = \frac{\cos \delta - \cos \omega - \cos \phi - \cos h}{\text{sen} \phi \cdot \cos h} \quad (9)$$

$$\gamma_z = \cos^{-1} \gamma_z \quad (10)$$

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

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (11)$$

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

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\omega) \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (12)$$

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

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

$$\cos(\theta_z) = \cos(90 - \delta) \cdot \cos(90 - \phi) + \text{sen}(90 - \delta) \cdot \text{sen}(90 - \phi) \cdot \cos(\omega) \quad (14)$$

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 7 (a), resultando em mais dois ângulos ε e Ψ conforme podemos observar na figura 7 (b).

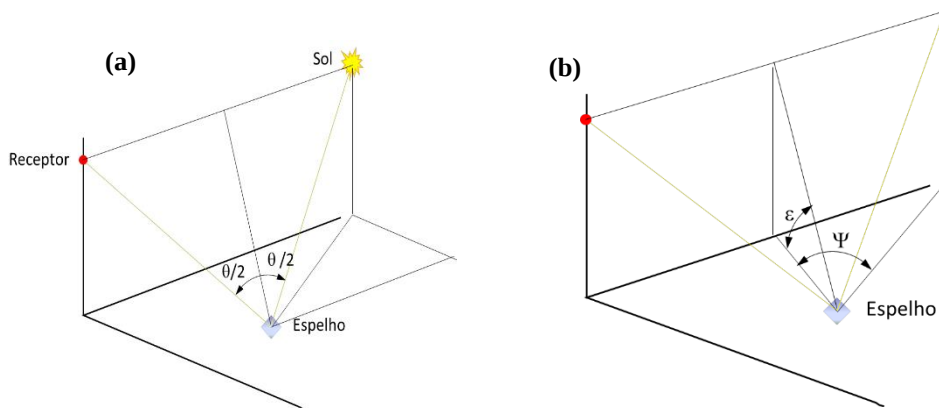


Figura 7 – (a) bissetriz do ângulo. (b) ângulos ε e Ψ

Considerando que o espelho está na posição horizontal, deverá girar em torno de “x” um ângulo de $90 - \varepsilon$ e em torno de “z” um ângulo de $90 - (\beta + \Psi)$, conforme descrito na figura 8.

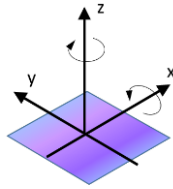


Figura 8 – Espelho com os respectivos movimentos
Fonte: Produzida pelo próprio autor

3.2. Estudo Cinemático

Para o estudo cinemático e comportamento da mesa, foi considerado o equipamento de forma simplificada, conforme figura 9(a) e (b). Foi denominado γ (gama) o ângulo na horizontal que o espelho deve girar, e δ (delta) o ângulo que o espelho deve girar para cima. Considerando, γ (GA) = 120° e δ (DE) = 45° .

O comprimento da projeção (L) é dado por:

$$L = \frac{AF}{\text{Tang } \delta} \quad (15)$$

Onde AF é a altura entre os eixos de deslocamento linear. O deslocamento do fuso de inferior (x) em mm:

$$x = -L \cdot \text{sen } \gamma \quad (17)$$

O deslocamento do fuso superior (y) em mm:

$$y = -L \cdot \text{cos } \gamma \quad (18)$$

Na figura 9 pode ser observado o deslocamento em mm nos fusos.

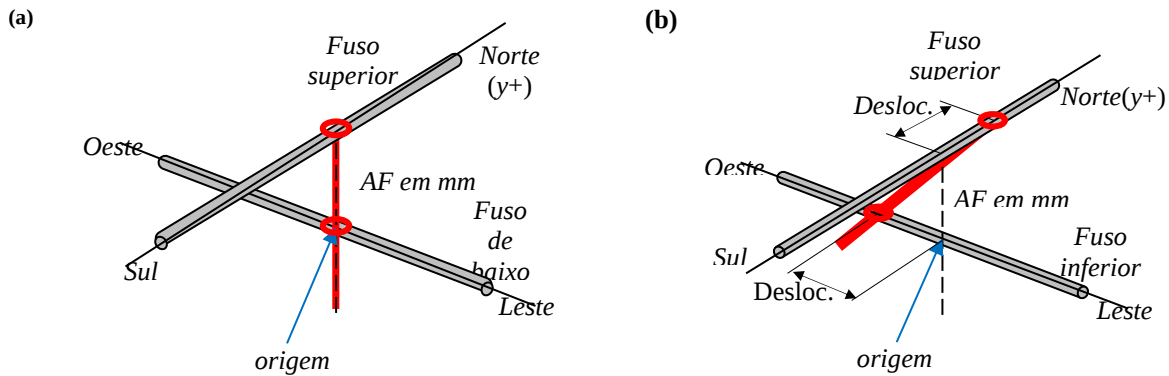


Figura 9 – (a) Modelo analítico de Deslocamento. (b) Modelo Analítico Deslocado em x e em y

A configuração completa do sistema desenvolvido é descrita no esquema na figura 10, 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.

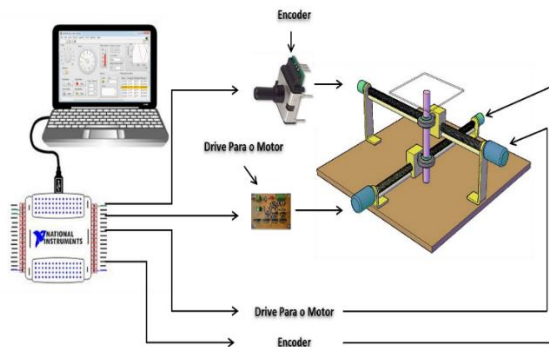


Figura 10 – Configuração do Sistema

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 11(a) e (b), 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 11(a) mostra o posicionamento do sol, espelho e absorvedor. A figura 11(b) mostra o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema. Na tabela 1(a) descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 1 e na tabela 1(b) descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise também da situação 1.

Tabela 1- (a) Parâmetros utilizados na situação 1 obtidos. (b) Parâmetros estatísticos obtidos na situação 1

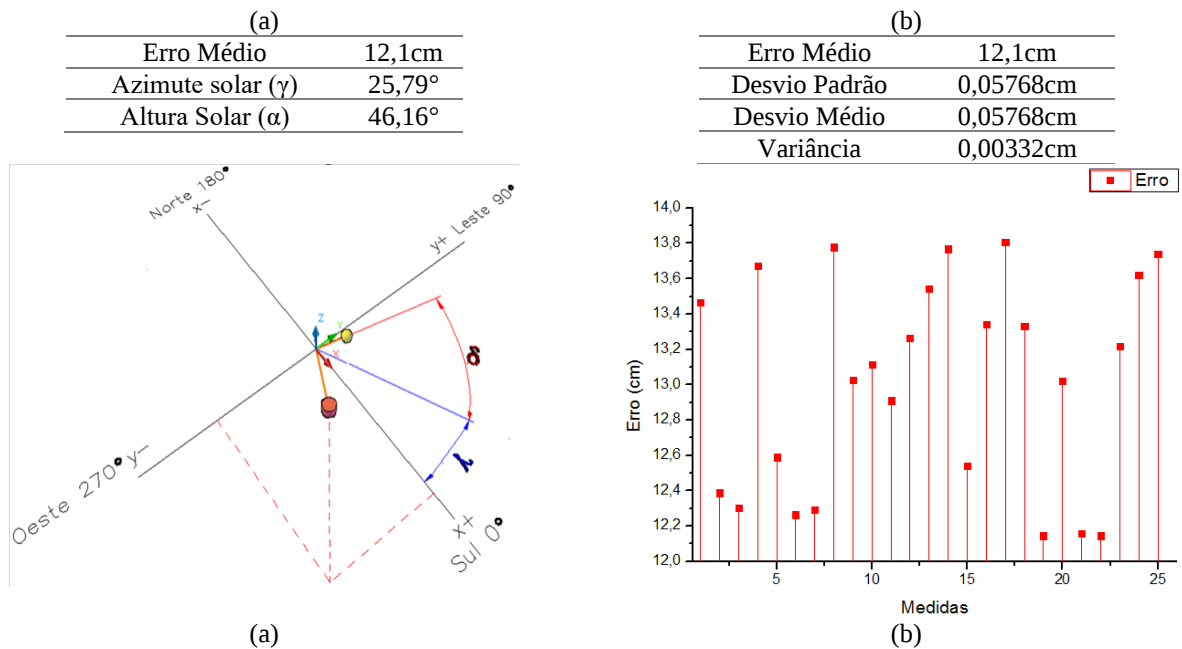


Figura 11 – Configuração do Sistema

A posição 2, descrita da figura 12(a), 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 12(b) descreve o posicionamento do sol, espelho e absorvedor. A figura 13(b) descreve o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema. Na tabela 2(a) descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 1 e a tabela 2(b) descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise da situação 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na situação 2 e obtidos

(a)		(b)	
Erro Médio	16,7cm	Erro Médio	16,7cm
Azimute solar (γ)	249,88°	Desvio Padrão	0,2264cm
Altura Solar (α)	33,98°	Desvio Médio	0,1886cm
		Variância	0,0512cm

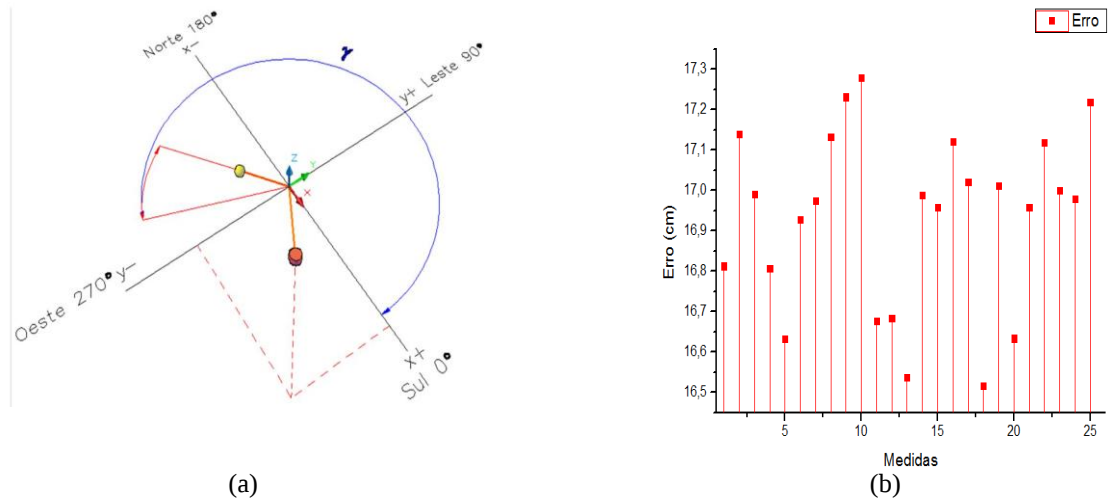


Figura 12 – Configuração do Sistema

A posição 3, descrita da figura 13(a), 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 13(b) descreve o erro em centímetros em função dos degraus de setpoint submetidos ao sistema. A tabela 3(a) descreve os parâmetros de posição solar, azimute e altura, utilizados na situação 3 e a tabela 3(b) descreve os parâmetros estatísticos obtidos na análise da situação 3.

Tabela 3 – (a) Parâmetros utilizados na situação 3 e obtidos. (b) Parâmetros estatísticos obtidos na situação 2

(a)		(b)	
Erro Médio	14,9cm	Erro Médio	14,9cm
Azimute solar (γ)	285,39°	Desvio Padrão	0,1857cm
Altura Solar (α)	14,53°	Desvio Médio	0,1524cm
		Variância	0,0345cm

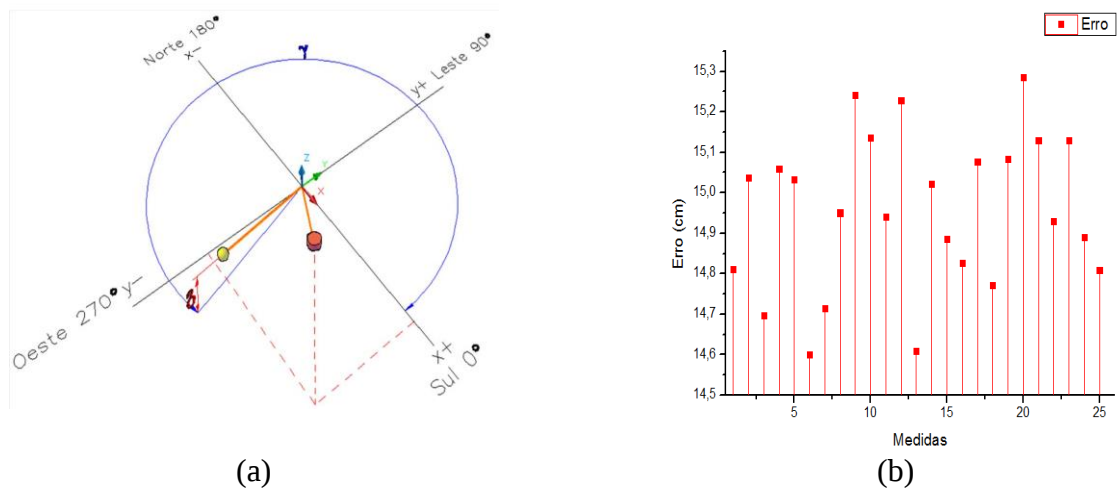


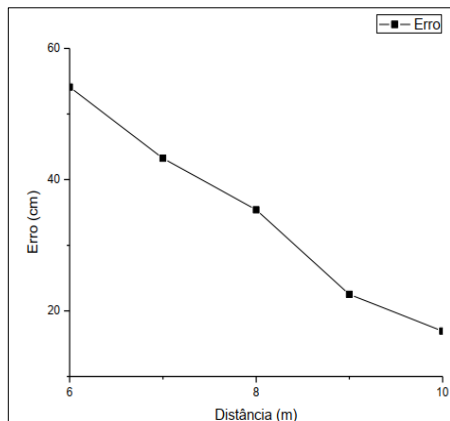
Figura 13 – Configuração do Sistema

Foi observado que no aumento da distância do receptor para o coletor reflete diretamente no erro de posicionamento do sistema. À 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 14(a) descreve o erro em função da distância.

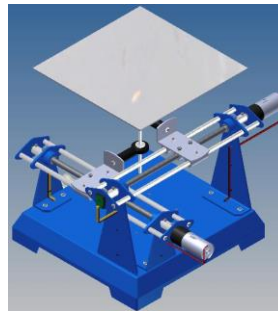
O algoritmo desenvolvido mostrou uma precisão feita em passos de 0,619°, porém o mecanismo apresentou erros muito maiores, conforme visto nas situações propostas, pelo uso de um encoder incremental que não apresentou funcionamento adequado para o sistema, apresentando erros constantes e perdas de medida.

O problema gerado pelo enconder 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° que são repetidos a cada 69,12s o que proporciona um erro médio de 0, 2°, mostrando assim, que com o uso de encoder adequado é possível aplicar um controle muito próximo aos padrões de referência.

A figura 14(b) e (c) demonstra o heliostato em projeto mecânico desenvolvido em software CAD e o protótipo construído para a realização dos testes respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – (a) Erro em função da distância; (b) Projeto mecânico desenvolvido em software CAD; (c) Protótipo construído.

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 onde aplicados, tendo como exceção o encoder circular, que apresentou inúmeros erros de leitura em velocidades altas. 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 θ tende a diminuir. Quando o ângulo θ tende a aumentar a precisão do sistema diminui. 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 sugerimos 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.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Pernambuco e ao Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas – LASEA UFPB

6. REFERÊNCIAS

- 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.
- Canãda J., Utrillas M.P., Martinez-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.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, 3a edição, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.
- Epe - Empresa De Pesquisa Energética. *Balanco Energético nacional. Ano base 2015*. Rio de Janeiro: EPE, 2015.
- 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.
- Fraidenraich, n. E Lyra, f. *Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1995.

- Mavromatakis, F., Franghiadakis, Y., 2008. "A highly efficient novel azimuthal heliotrope". Solar Energy, vol.82, pp.336-442.
- Manoel, P. S., Solar Fotovoltaica: Por que já investir na tecnologia do futuro, Encontro Catarinense da Indústria 2010, Florianópolis, 2010. Solar Millennium (2008), "The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3 - The largest solar power plants in the world" <http://www.solarmillennium.de>.
- 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.
- 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.
- National Instruments, NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications, National Instruments Corporation, 2006a.
- 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.
- Rabl, A. Active solar collectors and their applications. New York: Oxford University Press, 1985.
- Rocha, C.F, 2009, Técnicas de Controle de Temperatura Utilizando LabVIEW. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto MG.
- Stine, William B.; Geyer, Michael, Power from the sun. Pomona: California State Polytechnic University ed., 2001.
- Klüppel, R., Apostila Energia Solar, João Pessoa, 1985.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF A HELIOSTAT FOR HELIOTHERMIC GENERATION IN SOLAR TOWERS

Alysson Domingos Silvestre, silvestredomingos01@gmail.com¹

Melquisedeque S. B. da Silva Gomes, gomesmelquisedeque8@gmail.com²

Jose Maurício A. M. Gurgel, josemauriciogurgel@gmail.com¹

¹Universidade Federal da Paraíba

²Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba

Abstract. *With the increase in world perspectives regarding renewable energies and the use of concentrated solar thermal energy, with the objective of increasing the flux of incident solar radiation in thermal systems, it has been shown to be a viable solution for the generation of electric energy. Heliostat devices have the ability to track the sun and reflect radiation at a pre-established fixed point, commonly known as a solar tower, located in the middle of a field of heliostat devices. Solar towers have been the subject of studies because they have great potential for generating electricity. The higher the system's intended concentration values, the greater the requirements for heliostat tracking and reflection accuracy and the quality of reflective surfaces. This work aims to design and build a two-degree-of-freedom heliostat for power generation in solar tower systems using control methods for tracking and optimal reflection in the LabView platform. Applying tracking algorithms based on the equations of solar behavior and mechanical design allowing a dynamics of two degrees of freedom, results of 0.201 degrees of accuracy were obtained in the tracking of radiation reflection.*

Keywords: Solar energy, Thermosolar, Heliostat, Control, LabView®