

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE ALINHAMENTO PARA RASTREADORES SOLARES DE ALTA PRECISÃO

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manoel.henrique@yahoo.com.br
Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira.
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.
Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.
Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.

Resumo. *O uso de concentradores solares de médias e altas taxas de concentração trouxe à tona a necessidade da obtenção de rastreadores solares de alta precisão, para garantir o perfeito alinhamento dos raios solares com o eixo dos concentradores. Este artigo mostra o desenvolvimento de um sensor de alinhamento de rastreadores solares utilizando o princípio da formação de uma imagem projetada através de um pequeno orifício em um tubo. A imagem do sol incide sobre um fototransistor que por meio de um circuito eletrônico indica se o ângulo de desalinhamento está acima ou abaixo do valor projetado, permitindo assim a medição e supervisão de tais equipamentos indicando desvios da ordem de 0,3°.*

Palavras-chave: *Concentração Solar, Rastreamento Solar, Sensor, Energia Solar.*

1. INTRODUÇÃO

Desenvolvimentos recentes de células solares de varias camadas (multijunção), associadas ao uso de concentradores de alta relação de concentração, permitiram atingir eficiências de conversão em torno de 40% (Spectrolab, 2007). Essas eficiências são alcançadas utilizando-se o fluxo concentrado da radiação solar, obtido com concentradores ópticos. Os concentradores de média e alta taxa de concentração utilizam rastreadores solares para seu funcionamento para que seja possível a formação de uma imagem refletida do sol sobre o absorvedor.

Quanto maior a taxa de concentração, maiores são os requisitos de precisão no seguimento do sol por parte do rastreador, devido ao fato que o ângulo de aceitação é inversamente proporcional à taxa de concentração. Tais requisitos envolvem a precisão com que o equipamento acompanha o movimento do sol tanto diurnamente quanto sazonalmente (Fraidenraich e Lyra, 1995).

O erro de rastreamento, definido como a diferença entre a posição do vetor solar e do vetor normal ao coletor, indicado neste trabalho pelo ângulo γ , pode ser da ordem de 0,1° para rastreadores de alta precisão comerciais. O objetivo deste artigo é mostrar o desenvolvimento de um dispositivo que permita a supervisão do funcionamento de tais rastreadores, indicando quando o alinhamento dos mesmos estiver acima de determinado valor. O dispositivo desenvolvido também permite a medição discreta do erro de rastreamento.

2. DESENVOLVIMENTO E PROCEDIMENTO DE TESTES DO SENSOR

Para avaliação do alinhamento de rastreadores de alta precisão, foi desenvolvido um sensor cujo princípio de funcionamento está baseado na propagação do feixe luminoso de uma fonte distante através de um pequeno orifício em um tubo de seção circular, efeito conhecido como buraco de agulha (em inglês pinhole).

2.1 Projeto do sensor

Tomando-se o sol como a fonte de radiação distante, e considerando que os raios luminosos são irradiados sob a forma de um cone (cone solar), o feixe luminoso dentro do tubo também terá a forma de um cone com o mesmo raio angular do sol (meio ângulo $\theta_s = 4,7\text{mrad} = 0,267$ graus). O tamanho da imagem formada na base do tubo irá variar dependendo do diâmetro do furo no topo do tubo e da altura do tubo conforme Fig. 1-A e Eq. (1).

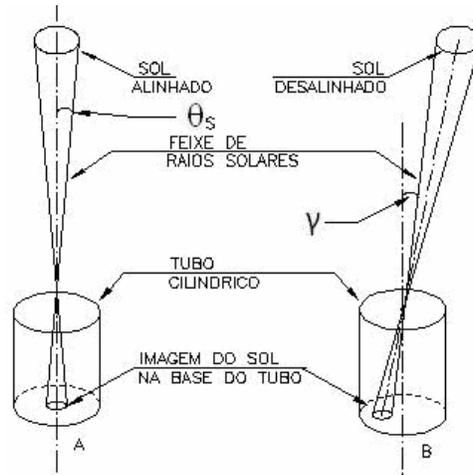


Figura 1 – Sensor de alinhamento, A – sol alinhado, B – sol desalinhado.

$$\operatorname{tg}(\theta_s) = \frac{R_{\text{imag}} - R_{\text{furo}}}{h} \Rightarrow R_{\text{imag}} = R_{\text{furo}} + h \operatorname{tg}(\theta_s) \quad (1)$$

Onde, h é a altura do tubo, R_{furo} é o raio do furo no topo do tubo e R_{imag} o raio da imagem formada na base do mesmo. A imagem da abertura iluminada pelo Sol tem uma distribuição de intensidade. Existe uma região central uniformemente iluminada e uma região periférica de penumbra, com iluminação decrescente. No que segue será adotada a aproximação de uma imagem constituída exclusivamente pela região central. Como será descrito nesta mesma Seção, o dispositivo eletrônico desenvolvido para detectar a imagem do Sol tem um nível de offset que permite “observar” preferencialmente a região central da imagem.

Caso haja um desalinhamento, representado pelo ângulo γ entre o feixe de raios e o eixo do tubo, a imagem formada estará deslocada do eixo, conforme mostrado na Fig. 1-B. Um fototransistor, posicionado na base do tubo, na região central, fornece a informação de alinhamento/ desalinhamento, baseado na incidência da imagem do sol sobre o mesmo. A incidência da imagem sobre o fototransistor indica que o tubo está alinhado com os raios solares, caso contrário, identifica-se o desalinhamento.

Pode-se visualizar o efeito do desalinhamento na Fig. 2, onde γ é o ângulo de desalinhamento e δr é o deslocamento da imagem necessário para não incidir no fototransistor.

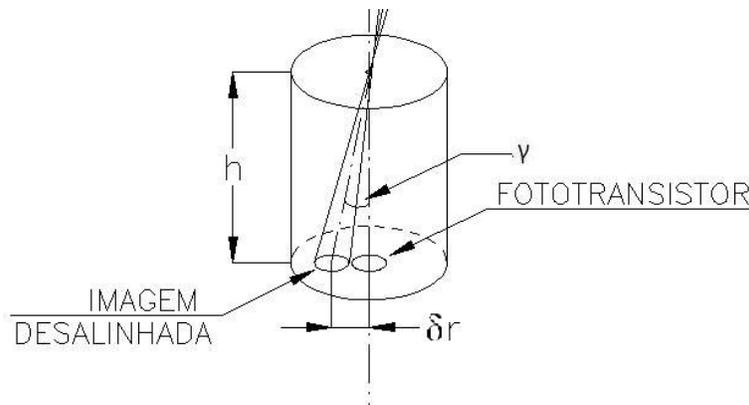


Figura 2 – Deslocamento da imagem devido a um desalinhamento.

Vários tamanhos de tubo foram calculados para avaliar diferentes ângulos de desalinhamento. O valor do ângulo de desalinhamento depende da altura do tubo, do semiângulo solar, do diâmetro do furo no topo do tubo, e do diâmetro do fototransistor segundo a Eq. (2).

$$h = \frac{R_{\text{furo}} + R_{\text{ft}}}{\operatorname{tg}(\gamma) - \operatorname{tg}(\theta_s)} \quad (2)$$

Onde R_{ft} é o raio do fototransistor e γ o ângulo de desalinhamento.

A Tab. 1 foi elaborada para permitir a visualização do ângulo de desalinhamento teórico que cada tubo permitirá medir.

Tabela 1. Altura e ângulo de medição de cada tubo.

Denominação	Altura (mm)	γ (graus)
A	2000,00	0,35
B	500,00	0,61
C	235,00	1,00

Os tubos utilizados são de ferro galvanizado com parede grossa, para permitir a abertura de rosca e diminuir a possibilidade de estarem empenados, foram fechados utilizando uma tampa de PVC pintada de preto, o que permite uma boa centralização do furo e do fototransistor, o furo em todas as tampas superiores é de 1mm de diâmetro. A Fig. 3 mostra o dispositivo desenvolvido instalado no painel de um rastreador de alta precisão, utilizado para os testes de funcionamento do sensor.

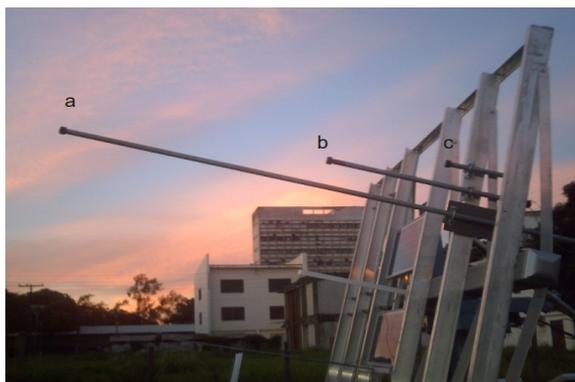


Figura 3 - Sensor instalado no painel do rastreador.

Para o alinhamento do tubo de 2 m, foi elaborada uma chapa que permite, por meio de parafusos, ser movimentada lateralmente, para permitir o alinhamento do mesmo, que consistiu em se observar a imagem do sol no fundo do tubo e movimentar a chapa até que a imagem esteja centralizada. O mesmo procedimento foi utilizado com os outros tubos, porém, para ajuste do alinhamento foi utilizada apenas a braçadeira e arruelas para fazer o tubo ficar alinhado, Fig. 4.



Figura 4 – Suporte dos tubos do sensor instalado no painel do rastreador.

Um circuito eletrônico foi acoplado ao dispositivo de medição. O circuito está baseado em um amplificador operacional (U2A) que compara o valor de tensão proporcional à energia luminosa incidente em um fototransistor (Q1) com um valor de referência ajustável (R21), segundo a Fig. 5.

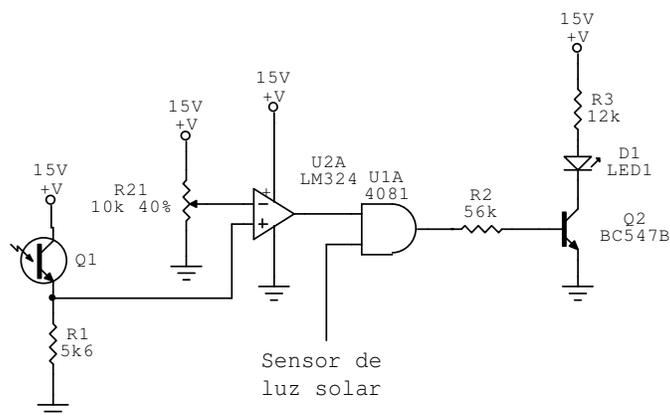


Figura 5 - Circuito eletrônico do sensor.

Se a tensão proporcional à energia luminosa incidente for maior que o valor ajustado, a saída do comparador (U2A) irá para nível alto e o led (D1) acenderá indicando que o alinhamento do tubo está dentro do ângulo para o qual este foi especificado. Caso contrário, o led (D1) ficará apagado, indicando que existe um desalinhamento maior do que o determinado para o tubo em questão.

Para cada tubo projetado existe um circuito comparador, (Fig.5), e para que cada comparador funcione de acordo com a descrição acima, é necessário que antes da medição seja efetuado um ajuste em cada potenciômetro de cada fototransistor para diferenciar do sinal de saída os níveis de iluminação que correspondem à irradiância difusa que eventualmente pode atingir os sensores.

O ajuste é feito apontando o dispositivo para uma região fora do alinhamento com o sol, assim, a tensão fornecida pelo fototransistor indica o nível de iluminação para o qual o sensor é considerado desalinhado, nesse caso, a irradiância que atinge o mesmo é **basicamente difusa**. O procedimento utilizado registra o sinal ao longo de um deslocamento gradual permitindo, desta forma, descartar também a região menos iluminada da imagem do Sol na base do tubo (**penumbra**).

Como o elemento sensor do fototransistor tem dimensões muito pequenas em relação à lente do mesmo, não foi considerada a existência de influência óptica da lente e das dimensões internas do elemento sensor do fototransistor sobre o funcionamento deste sensor de alinhamento.

A Fig. 6 mostra o processo de ajuste do sensor, onde, inicialmente, (Fig. 6-A), o sensor está alinhado e a imagem incide centralizada no fototransistor. Conforme o desalinhamento ocorre, a imagem se afasta do fototransistor (Fig. 6-B, C e D). Nesta condição, o sensor indica desalinhamento apenas quando a imagem deixa de incidir totalmente sobre o fototransistor, Fig. 6-E. A intensidade de corrente produzida pelo fototransistor diminui abruptamente, e o circuito eletrônico informa que para aquele ângulo, o sensor encontra-se desalinhado.

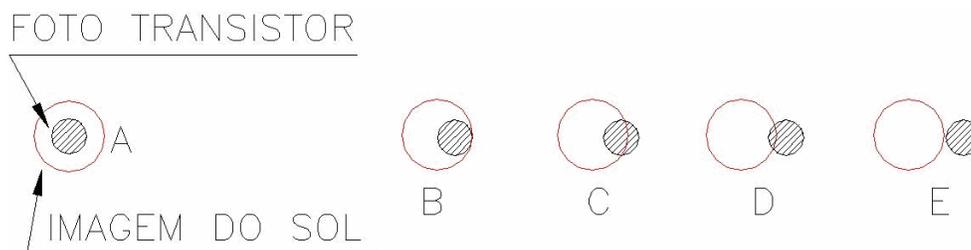


Figura 6 - Deslocamento da imagem dentro do tubo.

Uma vez ajustados os potenciômetros, os leds do equipamento acenderão, indicando em que patamar de alinhamento o rastreador encontra-se.

2.2 Metodologia dos ensaios

Para avaliação do funcionamento do sensor de alinhamento, inicialmente, foi desenvolvido um sistema de monitoramento do sensor que permite visualizar as indicações do mesmo em um computador, tal sistema visa facilitar a leitura do sensor e manter um monitoramento constante do erro de alinhamento.

Para o desenvolvimento deste sistema, utilizou-se uma maleta de aquisição de dados composta por módulos ADAM-4080 (monitoramento de grandezas digitais) e ADAM-4017 (monitoramento de grandezas analógicas) e interligado a esta maleta um computador com o software Elipse, que permite por meio de programação, a aquisição e monitoramento de dados.

A Fig. 7 mostra a configuração do sistema de monitoramento do sensor.

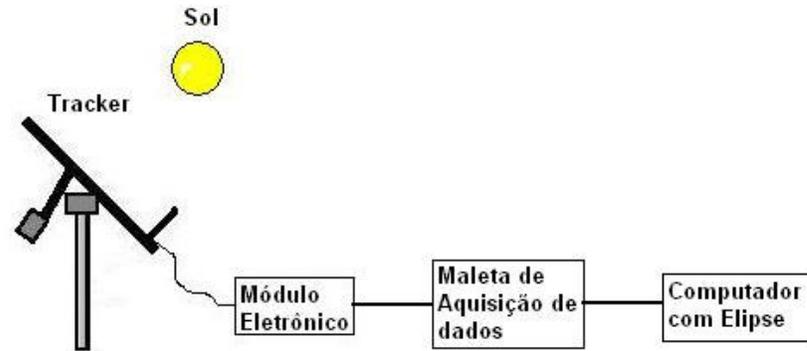


Figura 7 - Sistema de supervisão do sensor de alinhamento.

O funcionamento do sensor de alinhamento foi verificado por meio da comparação entre o ângulo que cada tubo deveria medir com o ângulo que efetivamente ele mediu.

Para obtenção do valor do ângulo medido, utilizou-se o seguinte procedimento:

Com o sistema de monitoramento funcionando e o rastreador no modo manual, alinha-se o rastreador com o sol.

Marca-se o dia e horário em que foi efetuado o alinhamento.

Este dia e horário permite calcular o zênite e o azimute do painel do rastreador, que como o mesmo está alinhado com o sol, é o mesmo do sol.

Observa-se no software de monitoramento em que horário cada tubo apresentou desalinhamento.

Com este horário, que chamaremos de horário final, calcula-se, utilizando a Eq. 3 (Rabl, 1985) o valor de γ , o ângulo que o sol faz com a normal do painel, que por definição, é o ângulo de desalinhamento do sol com o tubo do sensor Fig. 8. O azimute e ângulo zenital foram calculados utilizando-se o modelo de Grena (2007), que fornece uma precisão da ordem de 0,008 graus.

$$\begin{aligned} \cos\gamma = \cos\delta \cdot \cos\beta \cdot \cos\lambda \cdot \cos\omega + \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\lambda \cdot \cos\beta + \cos\delta \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{sen}\omega + \\ \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \text{sen}\lambda \cdot \text{sen}\beta \cdot \cos\varphi - \text{sen}\delta \cdot \cos\lambda \cdot \text{sen}\beta \cdot \cos\varphi \end{aligned} \quad (3)$$

A Eq. 3 fornece o ângulo de desalinhamento (γ) dos raios solares sobre um coletor instalado num local de latitude (λ) com seu plano inclinado de um ângulo (β) em relação ao plano horizontal e com um azimute (Φ) em relação à direção sul, em um determinado horário do dia (ω) e uma determinada data representada pela declinação (δ). Estes parâmetros foram determinados segundo o procedimento descrito para obtenção do valor do ângulo de desalinhamento acima.

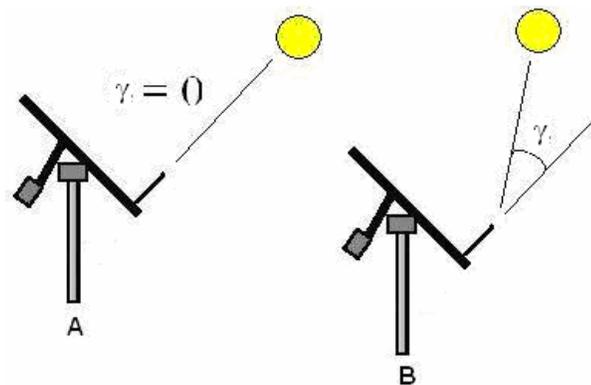


Figura - Avaliação do sensor.

As medições foram feitas no dia 20 de abril de 2010, um dia de céu aberto, sem nuvens. Para cada tubo, foram efetuadas oito medições no intervalo de 7:00 as 10:00 horas.

2.3 Resultados experimentais

Os valores apresentados na Tab. 2 mostram os resultados do ângulo γ calculados segundo o procedimento descrito, para os tubos A, B e C.

Tabela 2 - Resultados das medições do ângulo γ em graus

Tubo	A (0,35 graus)		B (0,61 graus)		C (1,0 grau)	
Horário Inicial	Horário Final	γ calculado	Horário Final	γ calculado	Horário Final	γ calculado
07:10:00	07:11:40	0.379	07:12:40	0.624	07:14:20	1.034
07:25:15	07:26:45	0.342	07:27:50	0.609	07:29:40	1.059
07:30:30	07:31:50	0.303	07:32:58	0.581	07:34:30	0.958
07:40:15	07:41:50	0.367	07:42:55	0.633	07:45:00	1.145
07:55:30	07:56:55	0.329	07:57:57	0.583	07:59:30	0.964
09:15:30	09:16:40	0.278	09:17:50	0.565	09:19:20	0.933
09:30:20	09:31:20	0.238	09:32:20	0.484	09:34:50	1.098
09:40:30	09:41:35	0.259	09:42:40	0.526	09:44:30	0.976
	Média	0.312	Média	0.576	Média	1.021
	Desvio padrão	0.051	Desvio padrão	0.051	Desvio padrão	0.076
	Coef de variação	16.3%	Coef de variação	8.8%	Coef de variação	7.4%

Na (Tab. 3) os valores médios para as diversas alturas (Tab. 2) são comparados com os resultados esperados (Tab. 1).

Tabela 3 - Comparação dos valores projetados e calculados.

Denominação	Altura (mm)	γ projetado (graus)	γ calculado (graus)	Variação Percentual
A	2000,00	0,35	0,312	10,9 %
B	500,00	0,61	0,576	5,6 %
C	235,00	1,00	1,021	2,1 %

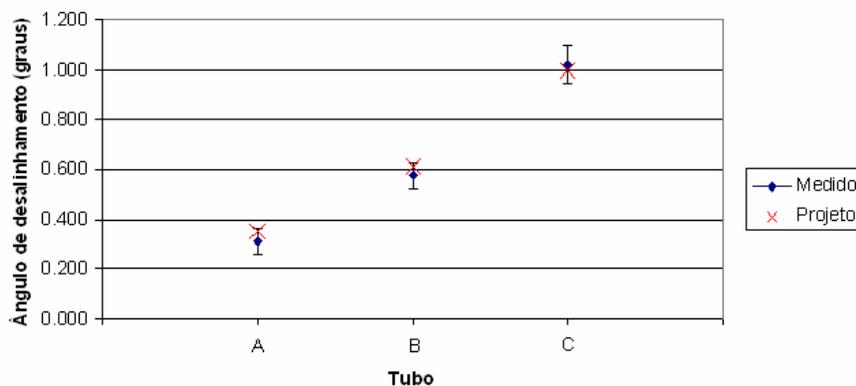


Figura 9 – Resultados dos testes com os tubos

Na Fig 9, observa-se o resultado dos testes com os tubos, e de acordo com a Tab. 3, os sensores denominados B, C foram os que apresentaram resultados mais próximos dos valores teóricos. Os tubos que fornecem menor precisão (maior valor de γ), mais curtos, apresentam menores diferenças com os valores esperados. Atribuem-se às diferenças

encontradas à confecção dos tubos, à precisão do alinhamento dos mesmos no painel do rastreador e à precisão do circuito comparador.

3. CONCLUSÕES

A projeção da imagem do Sol no plano onde está localizado um fototransistor, através de uma janela circular de pequenas dimensões, possibilita a determinação do desalinhamento de um rastreador de alta precisão, para valores de ângulos da ordem de $0,3^\circ$. O sensor foi acoplado a um sistema de supervisão que indica quando o erro de rastreamento ultrapassa determinado valor.

O dispositivo desenvolvido permite avaliar um parâmetro importante no desempenho de sistemas com média e alta taxa de concentração.

REFERÊNCIAS

- Fraidenraich, N. e Lyra, F., 1995. Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica, Ed. Universitária da UFPE, Recife.
- Grena, R., 2007. An algorithm for the computation of the solar position, Solar Energy, vol. 82, n. 5, pp. 462-470.
- Rabl, A., 1985. Active solar collectors and their applications, Oxford University Press, New York.
- Spectrolab, 2007. CDO-100-IC Concentrator Photovoltaic Cell with Welded Leads (ICs).

ALIGNMENT SENSOR DEVELOPMENT FOR HIGH PRECISION SOLAR TRACKERS

Abstract. *The research in medium and high concentrators brought about the use of high precision solar trackers, with tracking errors about $0,1^\circ$, necessary for a perfect alignment between the solar tracker plane and direct solar rays. This paper presents the development of an alignment sensor using the principle called pinhole which forms an image through a small aperture on the head of a tube. The sun image illuminates a phototransistor that, using an electronic circuit, indicates if the alignment error is larger or smaller than an offset value, allowing the measurement and supervision of the tracker position with a an accuracy of the order of $0,3^\circ$.*

Key words: *Solar Concentration, Solar Tracking, Solar Energy.*