

CARACTERIZAÇÃO DE UM FOTODIODO DE QUATRO QUADRANTES PARA SEGUIDORES SOLARES

OLIVEIRA, F. T. V., GÓMEZ-MALAGÓN, L. A.

Laboratório de Fotônica, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco

R. Benfica, 455 - Madalena, Recife - PE, 50720-001

E-mails: fernandaatavaress@gmail.com, lagomezma@poli.br

Abstract— This paper aims to characterize a four element photodiode for concentrated systems solar trackers. Mathematical modeling and experimental analysis of the sensor electrical outputs were done. The results showed that the range of the sensor depends on the geometry and values between 0.6 and 2.7° were obtained. Also, considering a 10 bit A/D converter, the resolution of the sensor is less than 0.1°, which is requested for concentrated solar systems. Thus, the four element sensor is a good candidate for solar trackers applied to concentrated solar systems.

Keywords— solar position sensor; four element photodiode; solar trackers; concentrated solar system.

Resumo— Este artigo tem por objetivo caracterizar um fotodiodo de quatro quadrantes para seguidores solares em sistemas com concentração solar. Modelagem matemática e análise experimental das saídas elétricas do sensor foram realizadas. Os resultados mostraram que a faixa de medição do sensor depende da geometria e valores entre 0,6 e 2,7° foram obtidos. Também, considerando um conversor A/D de 10 bits, a resolução do sensor é menor que 0,1°, o que é exigido por sistemas de concentração solar. Sendo assim, o sensor de quatro quadrantes é um bom candidato para seguidores solares aplicados a sistemas com concentração.

Palavras-chave— sensor de posição solar; fotodiodo de quatro quadrantes; seguidores solares; concentradores solares.

1 Introdução

O Sol é uma fonte inesgotável de energia e apresenta um baixo impacto ambiental quando comparada a outras formas de geração de energia.

O aproveitamento da radiação solar pode acontecer de duas formas: energia solar fotovoltaica, que consiste na conversão direta da energia do sol em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos; e energia solar térmica, que é um processo relacionado à geração de calor, através de coletores solares. Em ambos os casos, podem-se utilizar superfícies refletoras para concentrar a energia solar em um foco. Concentradores solares podem ter razões de concentração, que é a razão entre a área de abertura do coletor e a área da superfície de absorção, que variam desde a unidade até valores da ordem de 10^5 . Uma razão de concentração mais alta implica em uma maior eficiência, mas também na necessidade de precisão em qualidade óptica e posicionamento do sistema. Torna-se imprescindível a utilização de rastreadores solares (Duffie, 2013).

O sistema de rastreamento solar faz com que o coletor acompanhe o movimento solar diário, recebendo radiação solar direta durante todo o dia. O ângulo de incidência é o ângulo entre a direção dos raios solares e a normal à superfície (Duffie, 2013). A energia captada pelo coletor é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo de incidência, quanto menor o ângulo de incidência, maior a captação de energia (Rabl, 1985).

Os concentradores solares operam com radiação solar direta. Por isso, todo sistema com concentração da luz solar exige um mecanismo de rastreamento solar. O ângulo de aceitação determina o campo angular no qual a radiação pode ser coletada sem movimentar o concentrador (Rabl, 1985). No

caso ideal, os raios dentro do intervalo de aceitação são absorvidos e os raios fora do intervalo são rejeitados. O ângulo de aceitação de um coletor pode ser definido experimentalmente, caracterizando o efeito de erros na orientação do mecanismo de rastreamento. Isto é feito medindo a eficiência do coletor em vários pontos fora de foco à medida que o Sol se desloca no céu. O ângulo de aceitação é o intervalo no qual a eficiência não varia mais do que 2% em relação à eficiência máxima quando os raios incidem perpendicularmente (Khan, 2010). Dessa forma, em sistemas com concentração, manter o alinhamento do sistema óptico com os raios solares exige uma resolução da ordem de 0,1°.

Um dos componentes dos seguidores solares é o sensor de posição, o qual indica a posição do coletor solar em relação à direção da radiação direta. Os sensores de posicionamento solar podem ser baseados em pares de fotodetectores que, quando alinhados com os raios solares, produzem um mesmo sinal de saída porque detectam a mesma quantidade de luz. Na literatura, pares de resistores dependentes de luz (LDR, do inglês *Light Dependent Resistor*) (Khan, 2010) (Lee, 2009) (Kalogirou, 1996) e fotodiodos foram explorados como sensor de posição.

Fotodiodos segmentados podem ser utilizados como sensor de posicionamento solar para seguidores solares. Fotodiodos segmentados são fotodiodos produzidos em substratos comuns e divididos em dois ou quatro segmentos separados por lacunas. O fotodiodo de dois segmentos pode ser utilizado em rastreamento solar de um eixo, enquanto o fotodiodo de quatro segmentos pode ser utilizado em rastreamento solar de dois eixos (Osioptoelectronics) (UDT Instruments).

A utilização de sensores de posição solar baseados em fotodiodo de quatro quadrantes já foi abordada na literatura (Roth, 2004) (Lee, 2009) (Fontani, 2011) (Jiang, 2003). No entanto, a modelagem matemática é um aspecto ainda não muito explorado em tais trabalhos. Este trabalho, portanto, propõe-se a caracterizar um fotodiodo de quatro quadrantes, de acordo com a sensibilidade, através da modelagem matemática e análise experimental.

2 Materiais e métodos

O sistema de sensoriamento consiste em um fotodiodo de quatro quadrantes dentro de um cilindro com uma abertura circular de diâmetro d na face superior, conforme Figura 1.

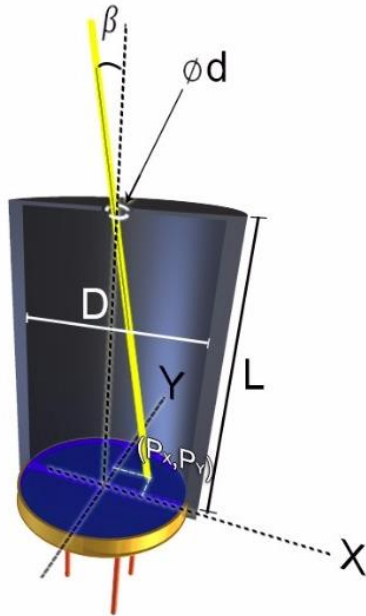


Figura 1. Sistema de sensoriamento

Considerando que o feixe de luz apresenta uma pequena divergência, uma imagem de mesmo diâmetro da abertura circular é formada no fotodiodo de quatro quadrantes quando um feixe de luz incide através da abertura circular.

Quando a fonte de luz estiver diretamente acima do sistema de sensoriamento e o feixe de luz incidir no centro do fotodiodo de quatro quadrantes, estes serão igualmente iluminados e fotocorrentes iguais serão geradas em cada segmento.

À medida que a fonte de luz se movimentar, haverá um deslocamento da imagem formada no fotodiodo e as saídas elétricas de cada segmento começarão a apresentar diferença de valor. Este sistema de sensoriamento permite obter as coordenadas $(P_x; P_y)$ correspondentes ao centro da imagem formada com referência aos eixos x e y indicados na Figura 1 (Osioptoelectronics) (Fontani, 2011). As coordenadas $(P_x; P_y)$ são calculadas de acordo com as Equações (1) e (2).

$$P_x = \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1)$$

$$P_y = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2)$$

Onde V_A, V_B, V_C e V_D são as saídas (em Volts) de cada quadrante mostrado na Figura 1.

Na modelagem matemática, foi considerado um fotodiodo de dois quadrantes em vista que a resposta é igual na direção dos eixos x e y mostrados na Figura 1. Neste caso, a imagem projetada no fotodiodo inicia-se completamente no quadrante A e desloca-se para o quadrante B, como mostra a Figura 2.

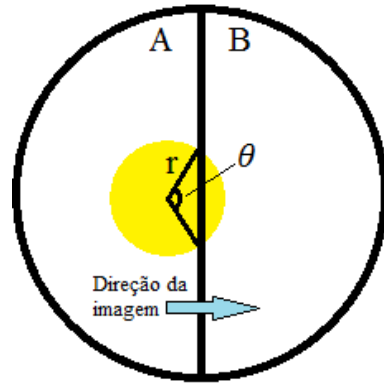


Figura 2. Fotodiodo de dois quadrantes e imagem formada

Durante a transição da imagem do quadrante A para o quadrante B, o sinal de saída do quadrante A será proporcional ao fluxo de fótons incidentes no detector e à área do segmento subtraída da área do círculo. Portanto,

$$V_A = K \left\{ \pi r^2 - \left[\frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta) \right] \right\} \cos \beta \quad (3)$$

Onde K é uma constante de proporcionalidade, r é o raio da imagem, θ é o ângulo correspondente à abertura do segmento, em radianos, conforme Figura 2, e β é o ângulo de incidência do feixe de luz no fotodiodo, conforme Figura 1. O ângulo β é medido em relação ao eixo vertical, sendo negativo em sentido horário e positivo em sentido anti-horário.

Já o sinal de saída do quadrante B é proporcional à área do segmento. Portanto,

$$V_B = K \left[\frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta) \right] \cos \beta \quad (4)$$

O ângulo de incidência do feixe de luz β está relacionado ao ângulo θ correspondente à abertura do segmento de acordo com a Equação (5):

$$r \cos \frac{\theta}{2} = L \tan \beta \quad (5)$$

Onde L é a distância entre a abertura circular e o fotodetector, conforme Figura 1.

O campo de visão (FOV, do inglês *Field Of View*) do sistema depende do tamanho do fotodiodo e da distância L e pode ser determinado através da Equação (6):

$$FOV = 2 \arctg \frac{D}{2L} \quad (6)$$

Onde D corresponde à lateral do fotodetector [8].

Testes em laboratório foram realizados utilizando um *laser* de diodo THORLABS CP635R emitindo radiação a 635 nm e um sistema de rotação motorizado THORLABS NR360S controlado por *software* com resolução menor que 1 arcseg, como mostrado na Figura 3.

O *laser* foi montado em uma haste controlada pelo sistema de rotação. O feixe de luz atravessa a abertura circular e, então, atinge o detector de quatro quadrantes. As saídas de cada quadrante foram medidas a cada 0,1° de rotação do sistema.

Testes em campo também foram realizados, na cidade de Recife-PE, aproveitando a radiação solar direta. Neste caso, as saídas do fotodiodo foram medidas a cada 30 segundos, o que corresponde a 0,125° de movimento da radiação direta.



Figura 3. Teste realizado no laboratório

Para a realização do experimento, o fotodiodo operou no modo fotovoltaico. Para amplificar a tensão gerada, foi utilizado um amplificador operacional 741 alimentado por uma fonte simétrica de 9 V para a leitura de cada quadrante. O circuito eletrônico do sistema de sensoriamento através do qual as saídas V_A , V_B , V_C e V_D foram obtidas pode ser visto na Figura 4.

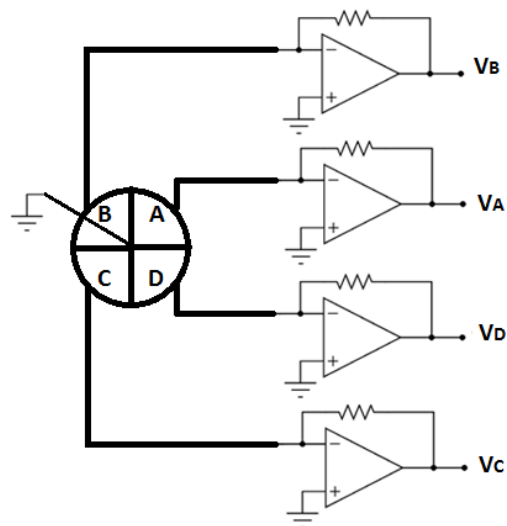


Figura 4. Circuito eletrônico do sistema de sensoriamento baseado em um fotodiodo de quatro quadrantes

As saídas V_A , V_B , V_C e V_D foram lidas através de um osciloscópio e os valores foram armazenados e analisados utilizando o *software* Microsoft Excel. Para caracterizar o sensor, a sensibilidade, faixa de medição e resolução foram determinadas.

A sensibilidade de um sensor é definida, de modo geral, como a entrada mínima de um parâmetro físico capaz de gerar uma mudança detectável no sinal de saída (National Instruments). No nosso caso, a saída vai ser o sinal de tensão nos terminais do sensor e os valores de entrada serão os ângulos de incidência. Sendo assim, a sensibilidade será dada em mV/°.

A faixa são os valores mínimo e máximo que podem ser medidos pelo sensor (National Instruments). No nosso caso, os valores de ângulo de incidência, em graus.

A resolução é definida como o mínimo incremento no sinal de entrada que pode ser detectado no sinal de saída (National Instruments). Esta será calculada considerando um conversor A/D capaz de converter uma medida analógica de 0 a 5 V em um valor binário de 10 bits.

3 Resultados

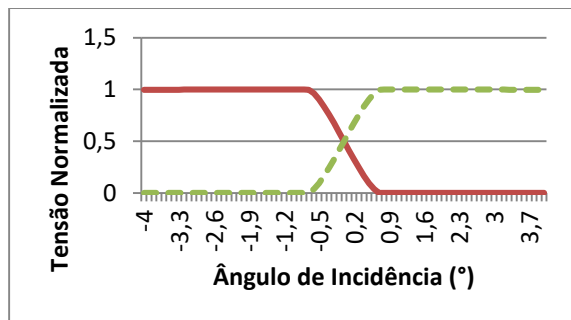
A modelagem matemática foi realizada utilizando as Equações (3) a (5) variando a distância L da abertura circular ao fotodiodo em 20, 30 e 40 mm e o diâmetro da abertura circular d em 0,5; 1 e 2 mm.

O FOV correspondente a cada distância L entre a abertura circular e um fotodiodo de lateral D igual a 10 mm pode ser visto na Tabela 1.

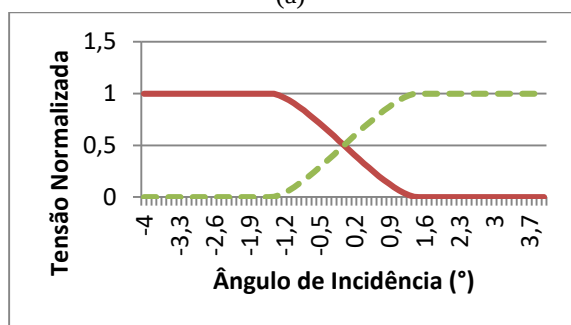
Tabela 1. FOV correspondente às variações de L

L (mm)	FOV (°)
20	28,07
30	18,92
40	14,25

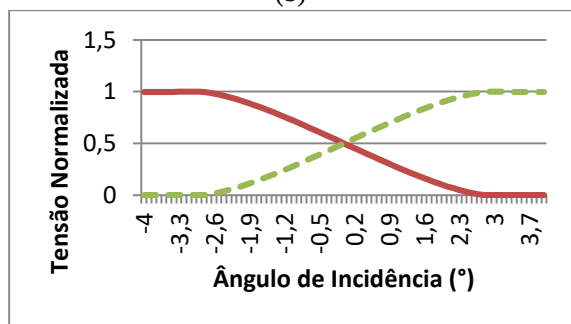
Para sistemas com L igual a 20, 30 e 40 mm, as saídas correspondentes aos quadrantes A e B em função do ângulo de incidência (em graus) do feixe de luz no cilindro podem ser vistas nas Figuras 5 a 7, respectivamente, para uma abertura circular de (a) 0,5 mm, (b) 1 mm e (c) 2 mm de diâmetro.



(a)

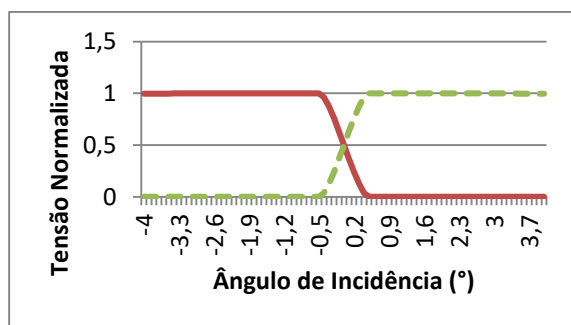


(b)

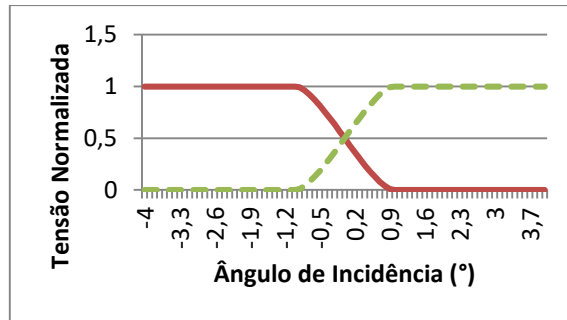


(c)

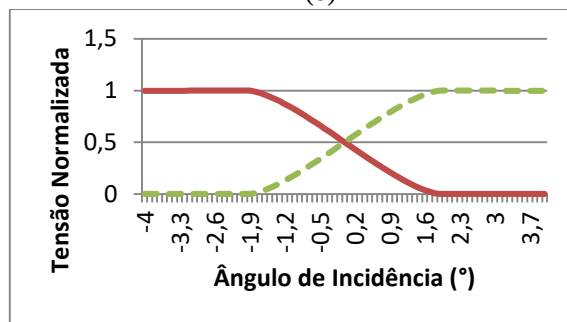
Figura 5. Saídas dos quadrantes A (linha contínua) e B (linha tracejada) para L igual a 20 mm e diâmetro da abertura igual a (a) 0,5 mm; (b) 1 mm e (c) 2 mm.



(a)

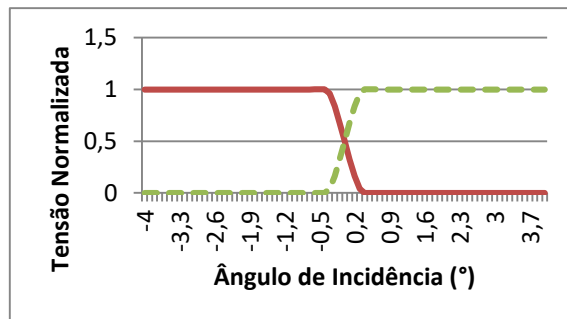


(b)

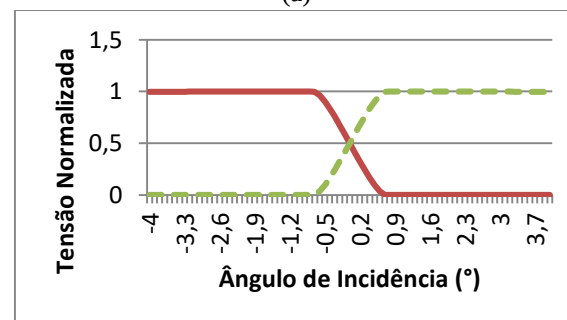


(c)

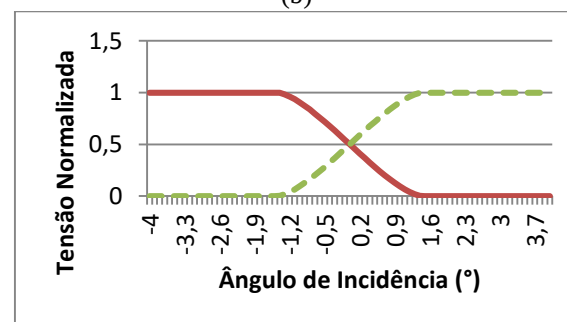
Figura 6. Saídas dos quadrantes A (linha contínua) e B (linha tracejada) para L igual a 30 mm e diâmetro da abertura igual a (a) 0,5 mm; (b) 1 mm e (c) 2 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Saídas dos quadrantes A (linha contínua) e B (linha tracejada) para L igual a 40 mm e diâmetro da abertura igual a (a) 0,5 mm; (b) 1 mm e (c) 2 mm.

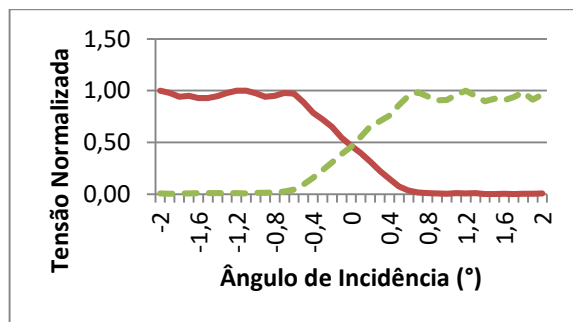
A faixa obtida na modelagem matemática para cada sistema de sensoriamento de acordo com a distância L e o diâmetro da abertura pontual pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2. Faixa para cada sistema de sensoriamento

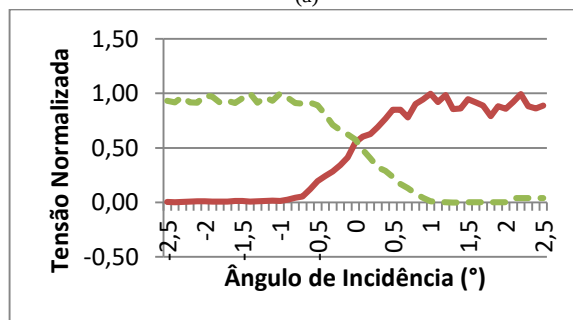
L (mm)	d (mm)	Faixa ($^{\circ}$)
20	0,5	$\pm 0,7$
20	1,0	$\pm 1,4$
20	2,0	$\pm 2,8$
30	0,5	$\pm 0,4$
30	1,0	$\pm 0,9$
30	2,0	$\pm 1,9$
40	0,5	$\pm 0,3$
40	1,0	$\pm 0,7$
40	2,0	$\pm 1,4$

O experimento foi realizado para uma distância L igual a 30 mm e diâmetro da abertura circular igual a 0,5; 1; 2 e 3 mm.

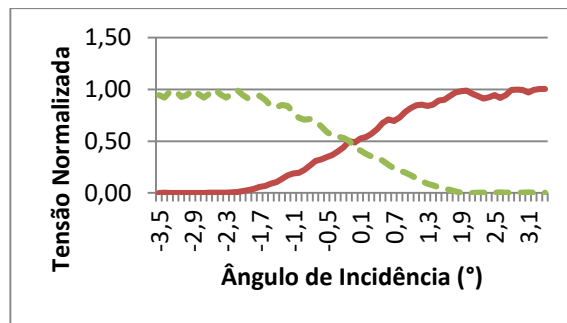
As saídas correspondentes aos quadrantes A e B em função do ângulo de incidência (em graus) podem ser vistas na Figura 8 para uma abertura circular de (a) 0,5 mm, (b) 1 mm, (c) 2 mm e (d) 3 mm de diâmetro. A tensão medida foi normalizada para melhor visualização, sendo a constante de normalização de 245, 275, 1700 e 3220 mV para 0,5; 1; 2 e 3 mm, respectivamente.



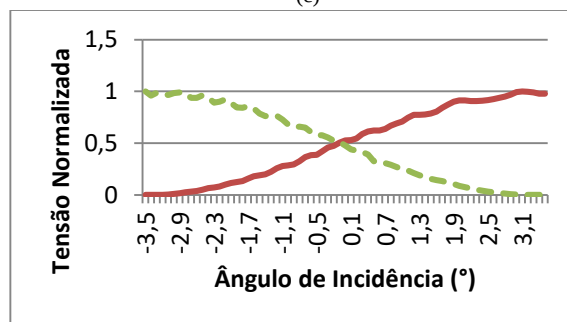
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8. Saídas dos quadrantes A (linha contínua) e B (linha tracejada) para L igual a 30 mm e diâmetro da abertura igual a (a) 0,5 mm; (b) 1 mm, (c) 2 mm e (d) 3 mm (resultado experimental).

A sensibilidade obtida na avaliação experimental para cada sistema de sensoriamento de acordo com a distância L e o diâmetro da abertura circular e a resolução, considerando um conversor A/D capaz de medir entre 0 e 5 V com resolução de 0,0049 V, podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Faixa, sensibilidade e resolução para cada sistema de sensoriamento (avaliação experimental)

L (mm)	d (mm)	Faixa ($^{\circ}$)	Sensibilidade (mV/ $^{\circ}$)	Resolução ($^{\circ}$)
30	0,5	$\pm 0,6$	204,2	0,024
30	1,0	$\pm 0,9$	152,8	0,032
30	2,0	$\pm 1,9$	447,4	0,010
30	3,0	$\pm 2,7$	596,3	0,008

O experimento foi realizado em campo para uma distância L igual a 40 mm e diâmetro da abertura circular igual a 1 mm. As saídas correspondentes aos quadrantes A e B em função do ângulo de incidência (em graus) podem ser vistas na Figura 9. A tensão medida foi normalizada para melhor visualização, sendo a constante de normalização de 650 mV.

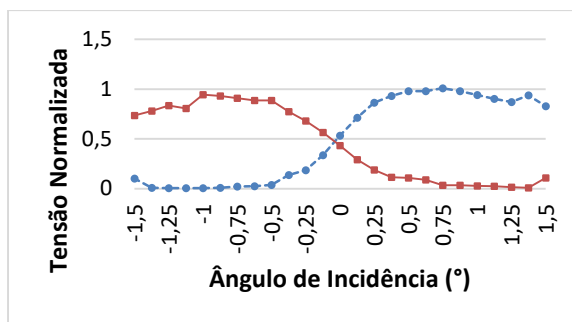


Figura 9. Saídas dos quadrantes A (linha contínua) e B (linha tracejada) para L igual a 40 mm e diâmetro da abertura igual a 1 mm.

Os resultados para o teste em campo pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4. Faixa, sensibilidade e resolução obtidas no teste em campo

L (mm)	d (mm)	Faixa (°)	Sensibili- dade (mV/°)	Resolu- ção (°)
40	1,0	$\pm 0,7$	464,3	0,010

Resultados teóricos e experimentais mostram que o diâmetro da abertura circular e a altura do cilindro influenciam na faixa, sensibilidade e resolução do sistema de sensoriamento.

Os resultados da modelagem matemática revelaram que L e a faixa são inversamente proporcionais. Já a abertura circular d e a faixa são diretamente proporcionais.

A faixa esperada e a faixa obtida através dos experimentos podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5. Faixa esperada e faixa obtida em cada experimento

L (mm)	d (mm)	Faixa Esperada (°)	Faixa Obtida (°)
30	0,5	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$
30	1,0	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$
30	2,0	$\pm 1,9$	$\pm 1,9$
40	1,0	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$

Dessa forma, pode ser observado que resultados experimentais confirmaram os resultados teóricos. Os valores obtidos teoricamente e experimentalmente foram semelhantes, apresentando apenas uma pequena divergência para uma abertura pontual de 0,5 mm de diâmetro. É possível que a divergência tenha ocorrido devido à dificuldade de ajustar a abertura em 0,5 mm.

4 Conclusão

Neste trabalho foi realizada modelagem matemática, montagem e avaliação experimental de um sistema de sensoriamento de posição solar baseado em fotodiodo de quatro quadrantes.

Os resultados atingidos concordam com trabalhos desenvolvidos anteriormente, como o de Fontani (Fontani, 2011), que atingiu resolução de 0,01°.

Dessa forma, o fotodiodo de quatro quadrantes é adequado para utilização em seguidores solares para sistemas com concentração solar.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) através do Projeto PRONEX.

Referências Bibliográficas

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc., v.3, Nova Jersey.
- Fontani, D., Sansoni, P., Francini, F., Jafrancesco, D., Mercatelli, L. and Sani, E (2011). Pointing sensors and sun tracking techniques. International Journal of Photoenergy, 3 Março 2011, pp. 1-9.
- Jiang, W.; Cao, M (2003). Emulation Sunflower. In: Proceedings of the International Symposium on Test and Measurements, pp. 1-5.
- Kalogirou, S. A (1996). Design and construction of a one-axis sun-tracking system. Solar energy, v.57, n.6, pp. 465-469.
- Khan, T., Tanzil, S. M., Rahman, R. and Alam, S. M (2010). Design and Construction of an Automatic Solar Tracking System. In: 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 326-329.
- Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M. and Lin, C. F (2009). Sun tracking systems: a review. Sensors, v.9, n.5, pp. 3875-3890.
- National Instruments. Sensor terminology. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/14860/en/>>. Acesso em: 21 abril 2016.
- Osiptoeletronic. PSD Characteristics. Disponível em: <www.osiptionelectronics.com>. Acesso em: 25 Abril 2016.
- Osiptoeletronic. Photodiode Characteristics and Applications. Disponível em: <<http://www.osiptionelectronics.com>>. Acesso em 22 Dezembro 2015.
- Rabl, A, 1985. Active solar collectors and their applications. Oxford University Press, Nova York.
- Roth, P.; Georgiev, A.; Boudinov, H (2004). Design and construction of a systema for sun-tracking. Renewable Energy, vol. 29, n.3, pp. 393-402.
- UDT Instruments. Non-contact Position Sensing Using Optical Detectors. Disponível em: <<http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2012/06/Non-Contact-Position-Sensing-Using-Optical-Detectors.pdf>>. Acesso em 25 abril 2016.