

# RASTREADOR SOLAR APLICADO A UM SISTEMA CONCENTRADOR LFR BASEADO EM ALGORITMO DE POSIÇÃO SOLAR

Álvaro D. Oliveira – alvaronh@hotmail.com

Mario H. Macagnan – mhmac@unisinis.br

Wilson Xavier de Freitas – wilsonxf@unisinis.br

Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

**Resumo.** O aproveitamento da energia solar pode ser uma alternativa muito importante para o atendimento da demanda cada vez maior por energia elétrica. Neste contexto, os concentradores solares acabam surgindo como uma opção bastante promissora. O presente trabalho apresenta um modelo de automação de um rastreador solar que dispensa o uso de sensores para determinação da posição do Sol. Esta determinação se dará apenas com base em aspectos astronômicos, utilizando um algoritmo para cálculo de efemérides, onde é possível prever a posição solar através de dados de tempo, constantemente atualizados por um relógio aplicado ao equacionamento programado em um módulo Arduino. O sistema de rastreamento será aplicado a um conjunto de espelhos projetados para concentrar a radiação em um absorvedor, utilizando a tecnologia do refletor Fresnel linear. Os valores dos ângulos de azimute e de zênite são obtidos no processamento realizado no módulo Arduino. Os resultados obtidos foram verificados através de simulações realizadas na calculadora solar do NOAA. Também foi verificado que o ângulo de inclinação dos espelhos calculado pelo algoritmo, quando aplicado no programa Soltrace, mostrou-se suficientemente preciso para a aplicação desejada.

**Palavras-chave:** Energia solar, Refletor Fresnel linear, Rastreador solar.

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia tem levado a sociedade a diversificar as suas fontes energéticas. Baseado nisso, surge como desafio a busca por alternativas renováveis. Neste contexto, a energia solar térmica aparece como uma boa opção, tanto para a geração de energia elétrica como para a produção de calor de processo.

Entre os sistemas que tem ganhado atenção, destacam-se os concentradores solares térmicos e, dentre esses, o refletor Fresnel linear, no inglês *Linear Fresnel Reflector* (LFR). O LFR é constituído, basicamente, por uma série de tiras de espelhos lineares que concentram a irradiância direta em um receptor fixo montado em uma torre linear horizontal. Segundo Kalogirou (2004), os LFRs podem ser considerados como um refletor parabólico seccionado, como mostrado na Fig.1, e podem ser construídos usando grandes absorvedores fixos.

A maior vantagem deste tipo de sistema é que ele usa refletores planos ou levemente curvos que são mais baratos em comparação com os refletores parabólicos. Além disso, são montados perto do solo, minimizando os requisitos estruturais, normalmente exigidos devido à carga do vento sobre os espelhos.

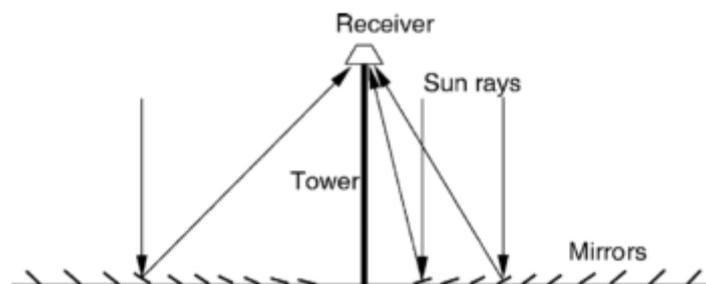


Figura 1- Representação simplificada de um refletor Fresnel linear.

Fonte: Kalogirou (2004).

Um sistema de posicionamento automático ajuda a maximizar a produção de energia em plantas solares através do rastreamento contínuo da posição aparente do Sol. Lodi (2011), afirma que quanto maior a temperatura desejada para a operação, maior deve ser a razão de concentração e também mais precisos devem ser a ótica do concentrador e o sistema de orientação utilizado no rastreador. Ao contrário do que acontece em outros tipos de concentradores, no LFR os espelhos não ficam diretamente alinhados com o plano longitudinal que cruza a posição solar mas sim posicionados de forma que a radiação direta seja refletida por cada um dos espelhos da matriz até o absorvedor, similarmente a um sistema de heliostatos de um concentrador tipo torre solar. No LFR, geralmente, é utilizado um controle ativo para o rastreador, composto de um motor elétrico para o acionamento, atuadores e os mecanismos para a transmissão de

movimento entre os espelhos. Conforme Seme *et al.* (2016), os controles ativos podem ser divididos em: sistema em *loop* fechado e sistema em *loop* aberto. O sistema de *loop* fechado usa um ou mais foto sensores e controles de realimentação para controlar a posição dos refletores. No sistema de *loop* aberto é utilizado um algorítmico matemático que é utilizado pelo controlador, responsável pelo posicionamento de cada refletor.

Diversos métodos para a determinação da posição aparente do Sol são encontrados na literatura, destacando-se os trabalhos de Michalsky (1998), Blanco-Muriel *et al.* (2001) e Reda e Andreas (2008). Os dois primeiros caracterizam-se por apresentar incertezas maiores que  $\pm 0,01^\circ$ , tanto para o ângulo de zênite,  $\theta_z$ , quanto para o ângulo de azimute,  $\gamma_s$ . Além disso, apresentam um período para o cálculo das efemérides também limitado, 1950-2050 para o caso de Michalsky (1998) e de 1999-2015 para o caso de Blanco-Muriel *et al.* (2001).

A determinação da posição solar pelo método de Reda e Andreas (2008), basicamente os ângulos de zênite e de azimute, apresentam um incerteza de  $\pm 0,0003^\circ$ , para o período de anos entre 2000 a 6000. Esses dois ângulos, junto com as informações geográficas do local (latitude e longitude) e tempo universal, permitem prever a posição solar em um determinado local de maneira relativamente simples e precisa.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar os parâmetros necessários para a automação do acionamento deste conjunto de espelhos.

## 2. METODOLOGIA

O modelo de automação foi implementado em um módulo Arduino e a programação do algoritmo de Reda e Andreas (2008) foi feita utilizando a linguagem C. As variáveis de tempo são fornecidas por um relógio de tempo real, *Real Time Clock* (RTC).

O RTC utilizado é próprio para o módulo Arduino e será o responsável pela atualização do sistema e consequente rastreamento solar.

O diagrama de blocos, mostrado na Fig. 2, ilustra a sequência de componentes responsáveis pelo acionamento dos espelhos.

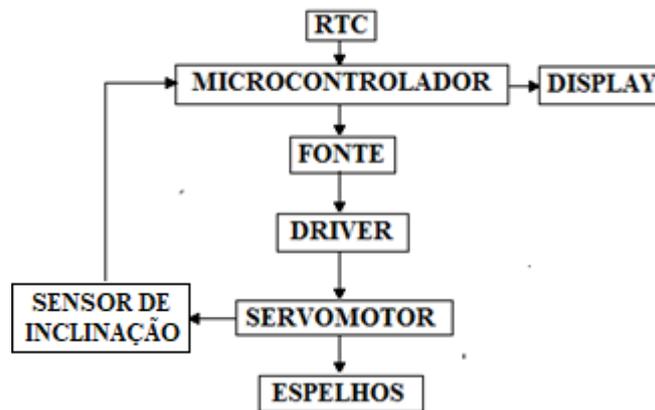


Figura 2 - Diagrama de blocos dos componentes responsáveis pelo acionamento dos espelhos.

A lógica, em linguagem de programação C, é baseada no algoritmo de controle do motor, inserido no microcontrolador do Arduino. As etapas para a montagem e implantação são apresentadas na Fig.3.

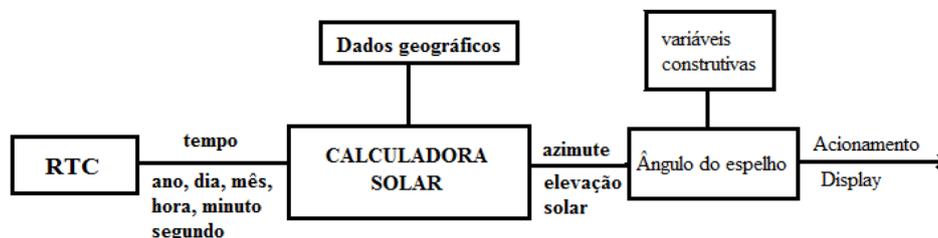


Figura 3 – Diagrama de blocos mostrando as principais variáveis do sistema.

Alguns dados de entrada são fixos, como os valores geográficos do local onde será instalado o sistema. Neste caso, o Laboratório de Fontes de Energias Renováveis, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), cujas coordenadas geográficas são  $-29,794^\circ$  e  $-51,149^\circ$ , de latitude e longitude, respectivamente.

Os valores de tempo fornecidos pelo RTC são atualizados a cada segundo. Esses valores envolvem ano, mês, dia, hora, minuto e segundo. A Fig.4 mostra a imagem do relógio utilizado.

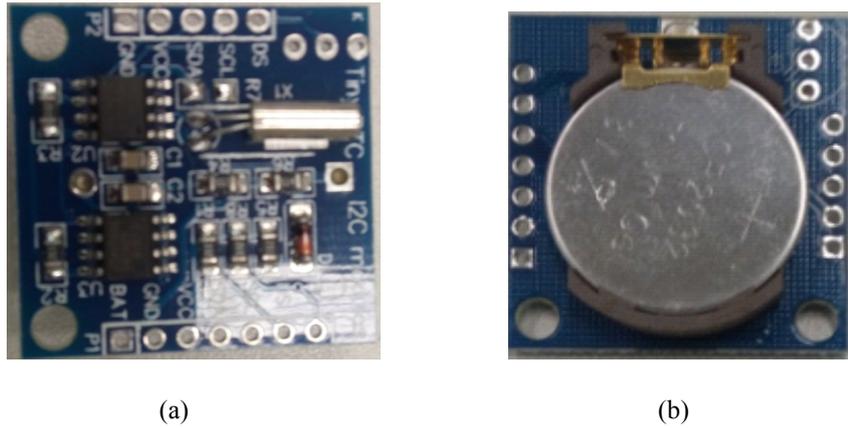


Figura 4 – Vista de um módulo RTC: (a) parte frontal e (b) parte posterior, com os componentes responsáveis pela contagem de tempo e a bateria para manter o horário em caso de falta de energia.

## 2.1 Determinação dos ângulos de inclinação dos espelhos (ou ângulos de reflexão)

O programa utilizado para o cálculo dos ângulos de inclinação dos espelhos,  $\theta_n$ , pelo módulo Arduino utiliza os valores dos ângulos de azimute,  $\gamma_s$ , e de zênite,  $\theta_z$ .

Considerando o sistema de coordenadas para a posição do Sol em relação a um refletor Fresnel linear com o eixo dos espelhos orientados horizontalmente na direção norte-sul, os espelhos devem movimentar-se seguindo o Sol na sua trajetória leste-oeste. Como apresentado por Muller (2016) e mostrado na Fig. 7,  $V$  é o vetor Terra-Sol. A sua posição instantânea em relação à normal de uma superfície horizontal é dada pelo ângulo de zênite,  $\theta_z$ . A projeção desse vetor no plano horizontal define o ângulo de azimute,  $\gamma_s$ . A projeção do vetor  $V$  em um sistema de coordenadas ortogonais fornece então os três vetores, conforme as Eq. (1), Eq.(2) e Eq.(3).

$$V_x = V \sin \theta_z \cos \gamma_s \quad (1)$$

$$V_y = V \sin \theta_z \sin \gamma_s \quad (2)$$

$$V_z = V \cos \theta_z \quad (3)$$

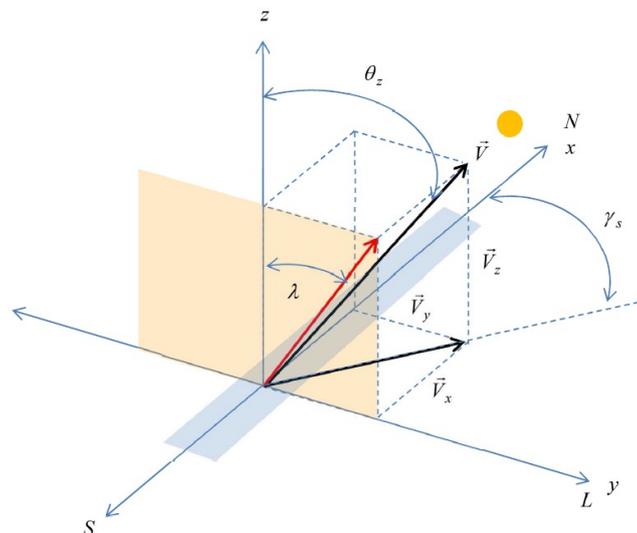


Figura 5- Projeção do Sol no plano transversal ao eixo do espelho.  
Fonte: Muller (2016).

A projeção do vetor  $V$  em um plano transversal ao eixo dos espelhos é chamada de ângulo de incidência projetado,  $\lambda$ , calculado pela Eq. (4).

$$\tan \lambda = \frac{\text{sen} \lambda}{\cos \lambda} = \frac{V_y}{V_z} = \frac{V \text{sen} \theta_z \text{sen} \gamma_s}{V \cos \theta_z} = \frac{\text{sen} \theta_z \text{sen} \gamma_s}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

A inclinação do espelho em relação ao plano horizontal,  $\theta_n$ , juntamente com os demais ângulos complementares, são representados na Fig. 6. Nessa figura,  $H$  é a altura do absorvedor em relação ao plano contendo o eixo dos espelhos,  $Q_n$  é a distância do centro de cada espelho em relação ao centro do refletor,  $\varphi_n$  é o ângulo formado entre a normal do plano do absorvedor e o raio refletido do centro do espelho que incide no absorvedor, chamado de ângulo de incidência no absorvedor e  $\xi_n$  é o ângulo de incidência em cada espelho que é igual ao ângulo de reflexão, de acordo com a lei de Snell.

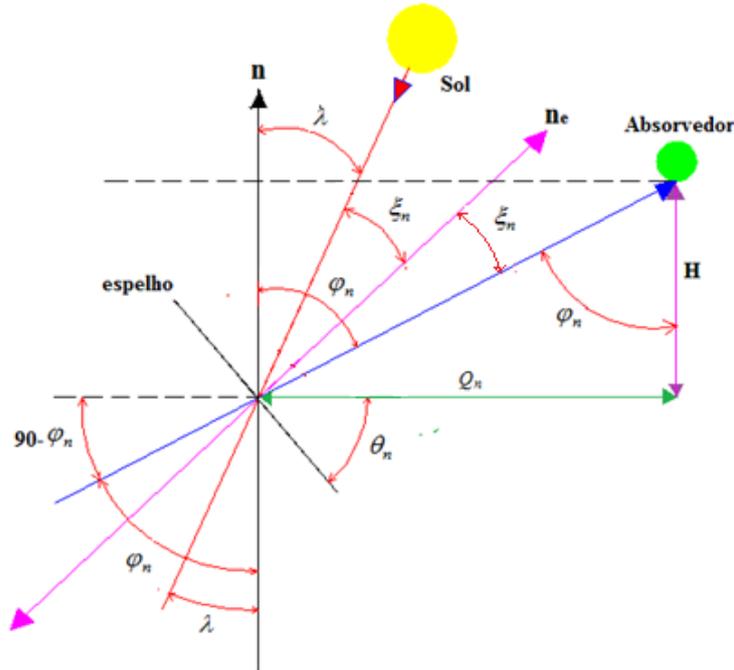


Figura 6 - Ângulos complementares para a determinação da inclinação dos espelhos.

Através da geometria mostrada na Fig. 6, considerado um raio incidente na superfície do espelho formando um ângulo  $\xi_n$  em relação à sua normal, o raio é refletido com o mesmo ângulo  $\xi_n$ . Para que esse raio atinja o centro do absorvedor, é necessário que o espelho esteja inclinado com um ângulo  $\theta_n$  em relação à horizontal para um espelho situado a uma distância  $Q_n$  do centro do coletor e situado a uma altura  $H$ . Nessa condição, o ângulo de incidência no absorvedor,  $\varphi_n$ , pode ser determinado conforme as Eq. (5) e (6):

$$\tan \varphi_n = \frac{\text{sen} \varphi_n}{\cos \varphi_n} = \frac{Q_n}{H} \quad (5)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{Q_n}{H} \right) \quad (6)$$

O ângulo de reflexão de cada espelho é dado pela Eq. (7):

$$\xi_n = \frac{\varphi_n - \lambda}{2} \quad (7)$$

Pela análise da Fig. 6, pode-se notar que o ângulo de inclinação do espelho,  $\theta_n$ , é determinado conforme a Eq. (8):

$$\varphi_n = \lambda + 2\xi_n \quad (8)$$

resultando na Eq.(9):

$$\theta_n = \frac{\varphi_n - \lambda}{2} \quad (9)$$

A Fig.7 mostra como seria o ângulo determinado para um dos espelhos, considerando a posição do Sol em um dado instante, em relação à posição do espelho e do absorvedor.

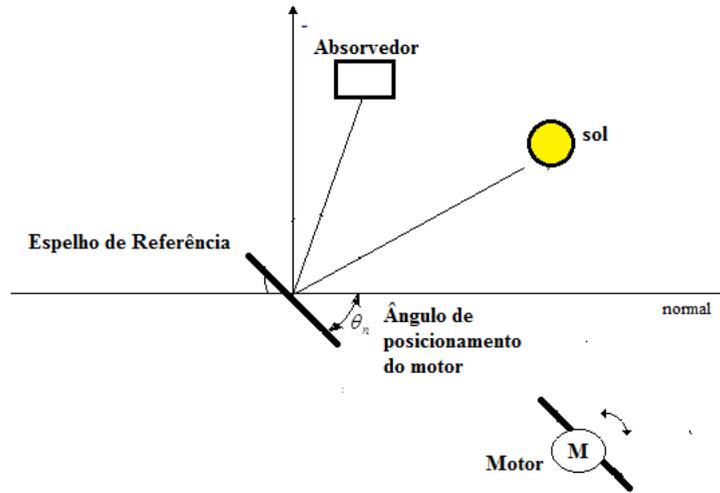


Figura 7 – Posição do ângulo de inclinação,  $\theta_n$ , para um espelho aplicado ao posicionamento do motor.

## 2.2 Controle do motor para posicionamento em função do ângulo de inclinação do espelho, $\theta_n$

O motor de passo tem como principal função o posicionamento giratório através de uma sequência de pulsos. Para o adequado funcionamento do motor de passo é necessário um módulo de controle (*driver*), que é um equipamento dedicado à conversão das informações de posição em pulsos digitais de onda quadrada. Este sinal tem origem no equacionamento do módulo Arduino.

Considerando as opções de número de pulsos por cada volta fornecidos pelo fabricante do módulo de controle, as opções de seleção são mostradas na Tab.1.

Tabela 1- Opções de resolução do módulo de controle aplicado ao motor de passo.

| Opção | Número de passos por volta | Resolução, ° |
|-------|----------------------------|--------------|
| 1     | 200                        | 1,8          |
| 2     | 400                        | 0,9          |
| 3     | 2.000                      | 0,18         |
| 4     | 5.000                      | 0,072        |
| 5     | 12.800                     | 0,028125     |
| 6     | 20.000                     | 0,018        |

Como uma volta possui 360°, o cálculo da sequência de pulsos do *driver* é dada pela Eq. (10):

$$R_p = \frac{N_{driver}}{360} \cdot \theta_n \quad (10)$$

onde  $R_p$  é o número de pulsos enviados do módulo Arduino para a *driver* de potência,  $N_{driver}$  é o número de pulsos programados nos seletores do *driver* entre as seis opções disponíveis e  $\theta_n$  é o ângulo de inclinação do espelho, já calculado no Arduino na etapa anterior. Esses pulsos são formados por uma sequência de sinais que alternam entre 0 a 5 V. Cada intervalo de 0 a 5 V representa um pulso. Cada pulso dura em torno de 20 ms. É a quantidade de pulsos enviados ao motor que irá determinar o posicionamento do seu eixo e dos espelhos.

À medida que os valores vão sendo estabelecidos, a atualização do ângulo é feita pelo incremento do número de pulsos. Desta forma, a mudança de posição do Sol é corrigida com um acréscimo de uma nova sequência de pulsos enviadas ao motor.

Um exemplo deste processo é mostrado na Eq. (11), tendo como base a variação do ângulo de inclinação do espelho,  $\theta_n$ , e considerando a opção em que os valores do *driver* de potência do motor estejam selecionados em 2.000

pulsos por volta e  $\theta_n$  tenha no primeiro momento um valor de  $45^\circ$ . Pode-se determinar, com base na Eq. (11), que se houver a variação de  $0,72^\circ$ , a diferença entre as duas situações será corrigida com o envio de 4 pulsos para o motor. As Eq. (10) e Eq.(11) trazem um exemplo de conversão da variação do ângulo  $\theta_n$ , de  $45^\circ$  para  $45,72^\circ$  através do incremento de 4 pulsos conforme seleção do *driver* de potência do motor de passo.

$$\begin{aligned} 2000 \times \frac{45}{360} &= 250 \text{ pulsos} \\ 2000 \times \frac{45,72}{360} &= 254 \text{ pulsos} \end{aligned} \quad (11)$$

Considerando o uso de um sistema de redução mecânica entre o motor e o eixo do espelho de 5:1, é feita compensação multiplicando o número de pulsos obtidos através da Eq. (11) por 5, para se obter a quantidade de pulsos total para cada posição desejada.

### 2.3 Conferência de posicionamento do espelho

Embora o equacionamento elaborado no módulo Arduino seja preparado para se obter o menor desvio possível da posição solar ( $0,0003^\circ$ ), o sistema como um todo não está isento de eventuais erros que possam ocorrer nas etapas posteriores, como nos componentes de potência (*driver* de potência e o motor de passo), além de eventuais folgas na parte mecânica (estrutura e sistema de transmissão entre o motor de passo e o eixo onde é fixado o espelho). Com o intuito de efetuar a leitura final do ângulo  $\theta_n$  e também corrigir eventuais desvios dos elementos citados entre a saída do módulo Arduino e o posicionamento final dos espelhos, será utilizado um sensor de inclinação do tipo absoluto, mostrado na Fig. 8. Trata-se de um inclinômetro, modelo Kinax N702, do fabricante Camile Bauer, que apresenta uma incerteza de  $\pm 0,2^\circ$ . Os terminais responsáveis pelo sinal de saída do sensor de inclinação (sinal analógico, de 4 a 20 mA) serão conectados ao módulo Arduino para que esse possa efetuar a sua leitura. Uma rotina de programação irá comparar o valor calculado inicialmente com o valor medido pelo sensor e se houver diferença entre ambos, efetuará a correção através do envio de pulsos ao *driver* do motor de passo, até que o sensor indique que o valor lido pelo sensor seja igual ao valor calculado.



Figura 8 - Sensor de inclinação Kinax N702.

## 3. RESULTADOS

Após determinação dos dados atualizados pelo RTC e utilizando o algoritmo para o cálculo dos ângulos de azimute,  $\gamma_s$ , e de zênite,  $\theta_z$ , os resultados calculados são mostrados em um display, juntamente com o horário atualizado, para que possam ser conferidos e comparados com mais facilidade. Na Fig. 9 é apresentado um LCD (*liquid crystal display*) onde aparecem essas informações. O ângulo de elevação solar apresentado é o complemento do ângulo de azimute.



Figura 9 - Disposição dos dados em um display do tipo LCD (16x2) com as respectivas informações de data, hora, ângulos de azimute e ângulo de elevação solar.

### 3.1 Comparação dos resultados para a posição solar

A conferência dos valores obtidos com a aplicação do algoritmo para a determinação da posição solar foi feita utilizando dados da calculadora solar do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). A Fig. 10 foi obtida da tela principal do próprio site e mostra a localização da Unisinos, com latitude de -29,794 e longitude -51,149, onde será instalado o sistema, bem como as informações de data da consulta, dia 30 de Agosto de 2017 e horário 09 h 00 min AM. Os valores obtidos para os ângulos de azimute e de elevação solar aparecem destacados no canto inferior direito e são respectivamente 60,28° e 27,42°.

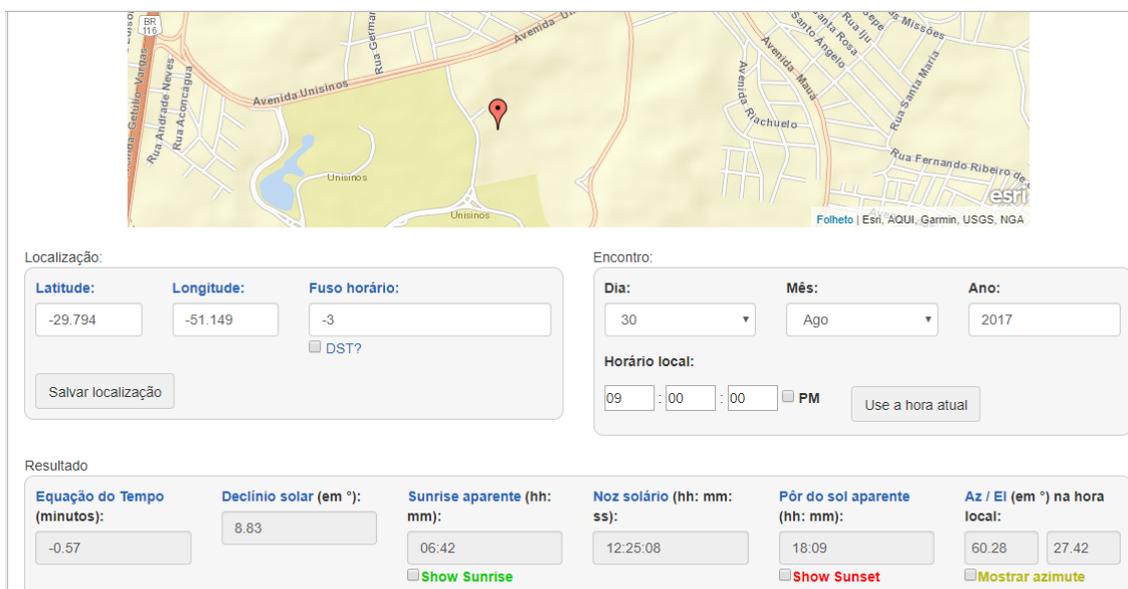


Figura 10 - Localização da Unisinos, com destaque no canto direito para as informações dos ângulos de azimute e de elevação solar no canto inferior direito da figura, utilizando a calculadora solar do NOAA.

### 3.2 Comparação do ângulo de inclinação calculado com o simulado no programa Soltrace

Como a execução do projeto ainda não foi finalizada, para a comprovação dos valores obtidos pela metodologia mostrada anteriormente foi utilizado o programa de simulação Soltrace. Esse programa permite a análise óptica da movimentação dos espelhos individuais ou de todo o conjunto de espelhos de um LFR.

A Fig. 11 mostra os raios solares refletidos pelo espelho, a uma dada inclinação e que atingem o absorvedor, considerando um afastamento do espelho da posição central,  $Q_n$ , igual a 2,4 m e uma altura do absorvedor,  $H$ , igual a

3,5 m, além de um horário onde os ângulos de azimute solar e de zênite correspondem a valores de  $60,28^\circ$  e de  $62,58^\circ$ , respectivamente. Considerando os valores mostrados no gráfico da Fig. 11, formando um seguimento de reta no eixo x de comprimento 2,343821 unidades, entre os pontos -0,199813 e 2,144008, e o eixo y com 2,4946996 unidades, formado entre os pontos -0,0074996 e 2,4872, é possível determinar o ângulo de inclinação do espelho como a relação entre essas coordenadas, indicando o ângulo de  $46,78^\circ$ .

Com essas mesmas informações e utilizando o algoritmo implementado no Arduino, foi verificado que o ângulo de inclinação do espelho,  $\theta_n$ , resultou igual ao valor simulado no Soltrace, indicando que o método utilizado é preciso em relação à referência adotada.

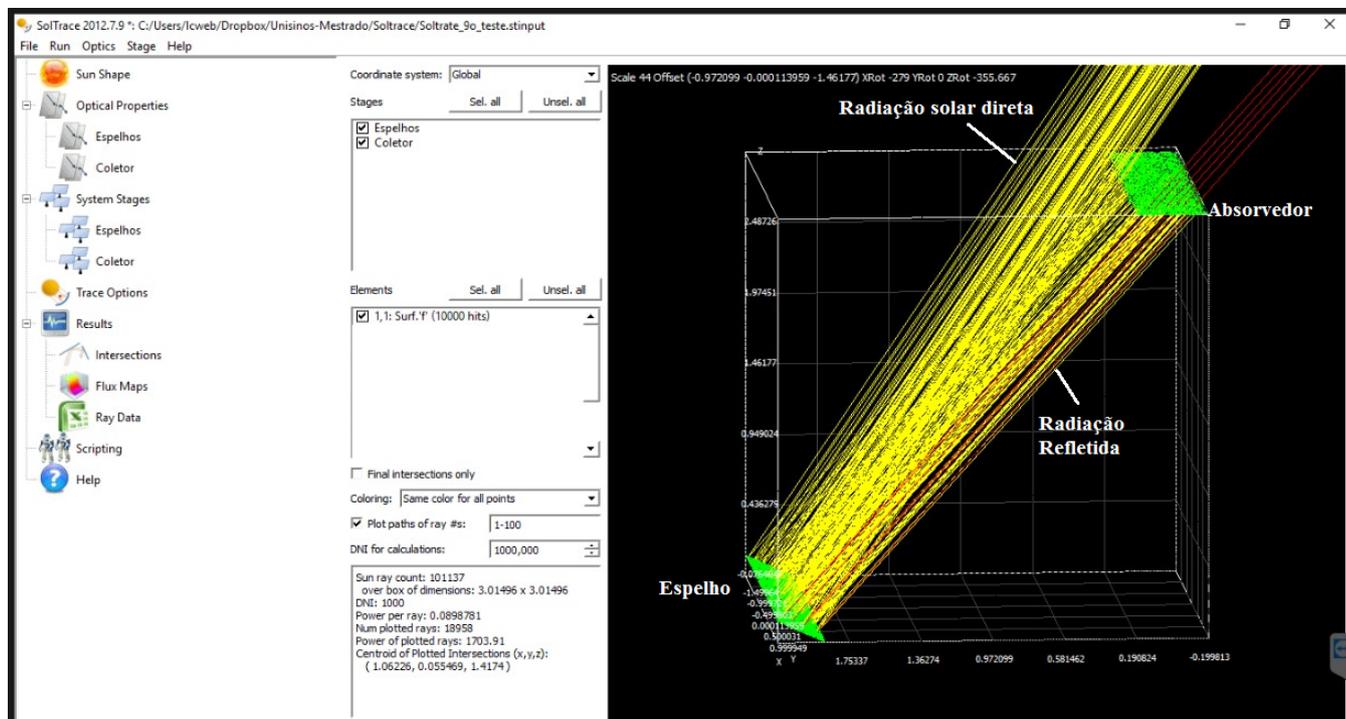


Figura 11- Simulação da posição de um espelho no programa Soltrace.

#### 4. CONCLUSÃO

Embora o conjunto ainda não tenha sido testado na prática devido a alguns ajustes pendentes na montagem, foi possível analisar através dos dados comparados dos ângulos de azimute e de zênite entre os dados calculados no módulo e mostrados no display da Fig. 9 e os obtidos na calculadora solar do NOAA, conforme a Fig. 10, que o desenvolvimento de um sistema automático de rastreamento solar com base apenas em aspectos astronômicos, dispensando o uso de sensores de radiação é viável tecnicamente.

Os valores calculados também foram mostrados na Fig. 11 e pode-se verificar que o sistema apresenta uma boa exatidão, à medida que se observa que, quando aplicados os valores calculados na simulação no software Soltrace, uma grande parcela da radiação solar refletida pelo espelho atinge o absorvedor.

O fato de se utilizar um sensor de inclinação com precisão  $\pm 0,2^\circ$  também irá agregar confiabilidade ao sistema efetuando a leitura do ângulo em tempo real e corrigindo eventuais erros alheios ao controle central.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro dentro da Chamada Linha 2 - Energia Heliotérmica, processo 406976/2013-9, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos, modalidade taxa.

#### REFERÊNCIAS

- Blanco-Muriel, M.; Alarcón-Padilla, D.C.; López-Moratalla, T.; Lara-Coira, M., 2001. Computing the solar vector. Solar Energy, vol.70, pp. 431-441.
- Cavalcante, C. N. S., 2016 Controle e instrumentação de energia solar fotovoltaica e térmica com um grau de liberdade. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasil.

- Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, n.3, pp.231-295.
- Lodi, C., 2011. Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Michalsky, J.J., 1988. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position. Solar Energy, vol. 40, pp. 227-235.
- Muller, J.C., 2016. Estudo geométrico de um refletor Fresnel linear para a produção de energia térmica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Brasil.
- NOAA. Solar calculator. Disponível em : <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> -acesso em 30/08/17.
- Reda, I.; Andreas, A., 2008. Solar position algorithm for solar radiation applications. Technical report: NREL/TP-560-34302. Golden, USA.
- Seme, S.; Stumberger, B.; Hadziselimovic, M., 2016. A novel prediction algorithm for solar angles using second derivative of the energy for photovoltaic sun tracking purposes. Solar Energy, vol. 137, pp. 201-211.

### **SOLAR TRACKER APPLIED TO A LFR CONCENTRATOR SYSTEM BASED ON SOLAR POSITION ALGORITHM**

**Abstract.** *The use of solar energy can be a very important alternative for meeting the growing demand for electricity. In this context, the solar concentrators come to appear as a very promising option. The present work presents a model of automation of a solar tracker that dispenses the use of sensors to determine the position of the Sun. This determination will only be based on astronomical aspects, using an algorithm for calculating ephemeris, where it is possible to predict the solar position through time data, constantly updated by a clock applied to the equation programmed in an Arduino module. The tracking system will be applied to a set of mirrors designed to concentrate the radiation into an absorber using linear Fresnel reflector technology. The values of the azimuth and zenith angles are obtained in the processing performed in the Arduino module. The results obtained were verified through simulations performed on the NOAA solar calculator. It was also verified that the angle of inclination of the mirrors calculated by the algorithm, when applied in the Soltrace program, was sufficiently precise for the desired application.*

**Key words:** *Solar energy, Fresnel linear reflector, Solar tracker.*