



Desenvolvimento de um rastreador solar de dois eixos utilizando resistores dependentes de luz (LDR)

Juliano da Rocha Queiroz¹ – juliano.queiroz@ifpr.edu.br
Anacreone da Silva Souza¹ – anacreone.souza@ifpr.edu.br
Cid Marcos Gonçalves Andrade² – cmgandrade@uem.br

1 – Instituto Federal do Paraná – Campus Ivaiporã
2 – Universidade Estadual de Maringá

Resumo: Este trabalho relata o desenvolvimento parcial de um sistema rastreador solar. O rastreador solar é um dispositivo que segue a posição relativa do sol, com o intuito de manter o painel solar perpendicular aos raios solares, maximizando a transferência de energia. Os principais objetivos do trabalho foram: construir duas estruturas mecânicas, uma para rastrear a posição do sol com sensores LDR e outra para sustentar e posicionar um painel solar; desenvolver um algoritmo de rastreamento solar baseado na diferença de iluminação nos LDRs; e implementar um controlador PID na plataforma Arduino para o posicionamento do painel. Como resultado obteve-se o rastreamento luminoso com erro médio de 1,5 graus e controle de posição do painel com precisão de 1 grau. Para melhorar estes resultados, será adicionado um sistema de rosca sem fim no rastreador, com intuito de diminuir o passo do motor e aumentar a precisão. Neste sentido, também serão adicionadas caixas de redução nos motores de corrente contínua da estrutura do painel.

Palavras-chave: Rastreador solar; Energia renovável; Controle PID; Arduino.

1. Introdução

O consumo mundial de energia elétrica tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Atualmente, cerca de 80% da energia elétrica consumida tem sua origem na queima de combustíveis fósseis e em usinas nucleares. Estas fontes energéticas são reconhecidamente danosas ao meio ambiente, devido a emissão de gases e ao lixo tóxico gerado. Em contrapartida, as fontes de energia renováveis despertam interesse pela sua sustentabilidade e baixo impacto ambiental. Apesar de representar um pequeno percentual da matriz energética mundial, essas fontes já são consideradas indispensáveis e ocupam importante espaço nas políticas públicas e nos investimentos privados (VILLALVA, 2012).

Dentre as diversas fontes de energia renovável, a energia solar é a mais abundante. A

superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar suficiente para suprir inúmeras vezes as necessidades energéticas mundiais no mesmo período (VILLALVA, 2012). A energia solar pode ser convertida em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, que consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz (BRASIL, 2014). As aplicações da energia solar fotovoltaica variam de pequenos sistemas isolados ou autônomos a grandes sistemas integrados a rede de distribuição elétrica (VILLALVA, 2012).

Com o intuito de maximizar a geração de energia elétrica fotovoltaica, são estudados sistemas para orientar o arranjo de painéis de forma que estejam sempre voltados para o sol, a fim de que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície dos mesmos (OLIVEIRA, 2008). Estes sistemas, chamados de rastreadores solar, são capazes de aumentar a incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos em mais de 30% (OLIVEIRA, 2007).

Neste contexto, este trabalho relata o desenvolvimento parcial de um rastreador solar, com base em um sistema microcontrolado de sensoriamento e controle de posição, aplicado a geração de energia solar fotovoltaica. Foram construídas duas estruturas mecânicas, uma para o rastreamento da posição do sol através de sensores dependentes de luz e outra para sustentação e posicionamento do painel fotovoltaico. Adicionalmente, implementou-se um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) na plataforma Arduino, o qual aciona os motores de

corrente contínua através de *drivers* ponte H.

2. Revisão bibliográfica

Os rastreadores solares podem ser classificados quanto a quatro características principais, sendo elas: ativo ou passivo; de um ou dois eixos; estratégia de rastreamento cronológica ou por sensores (ou ambas em conjunto); sistema de controle em malha aberta ou fechada (NSENGIYUMVA et al, 2018).

Nos sistemas de rastreamento passivo, não existe um sistema eletrônico responsável por rastrear o céu em busca do melhor posicionamento em relação ao sol. A posição dos módulos é alterada por um algum arranjo mecânico e este movimento ocorre devido à radiação solar não homogênea sobre a superfície do sistema. Já os sistemas de rastreamento ativo possuem um conjunto composto por sensores e motores, capaz de orientar os painéis perpendicularmente aos raios solares, condição que permite a máxima captação de energia pelo sistema. Os sistemas ativos possuem eficiência comprovadamente superior aos sistemas passivos.

Quanto a quantidade de eixos de rotação, os rastreadores usualmente são classificados em sistemas com um ou dois eixos. Os sistemas de um eixo apresentam grande aplicabilidade devido à sua simplicidade construtiva e fácil sistema de controle. Em contrapartida, os sistemas com dois eixos de rotação possibilitam um posicionamento mais preciso do painel solar em relação ao sol, com a desvantagem da maior complexidade construtiva. A bibliografia indica que os sistemas de duplo eixo alcançam desempenhos entre 20 e 50% maiores em relação aos painéis fixos (NSENGIYUMVA et al, 2018).

Em relação a estratégia de rastreamento, os sistemas podem ser classificados em três grupos: posicionamento através de equações levando em consideração a data e o horário, utilização de sensores ótico-eletrônicos para determinar a posição relativa do sol e mesclando estas duas estratégias. Na estratégia de rastreamento utilizando a posição teórica do sol, um conjunto de equações astronômicas determina a orientação ideal do sistema a partir da data, do horário e das coordenadas geográficas do local. Nos sistemas que utilizam sensores para rastrear a posição do sol, usualmente são empregados dois pares de

resistores dependentes de luz (LDR) em uma estrutura em formato de cruz (MAKWANA; LAD, 2017). A diferença de iluminação entre estes sensores é convertida em diferentes níveis de tensão, que são utilizados como sinais de entrada para o algoritmo que determinará o posicionamento dos painéis. A iluminação igualitária dos quatro sensores indica que a superfície do painel está exatamente perpendicular aos raios solares e, portanto, recebendo a maior quantidade de energia luminosa possível. Já a estratégia híbrida mescla tanto a utilização de sensores quanto o posicionamento a partir da posição teórica do sol. Tharamuttam e Ng (2017) compararam a tensão gerada por um painel fixo e por um rastreador solar de dois eixos utilizando estratégias de controle cronológica, de sensores e híbrida. Nesta análise, os autores obtiveram ganhos de 8,5, 10 e 13%, respectivamente, em comparação com o painel fixo (THARAMUTTAM; NG, 2017).

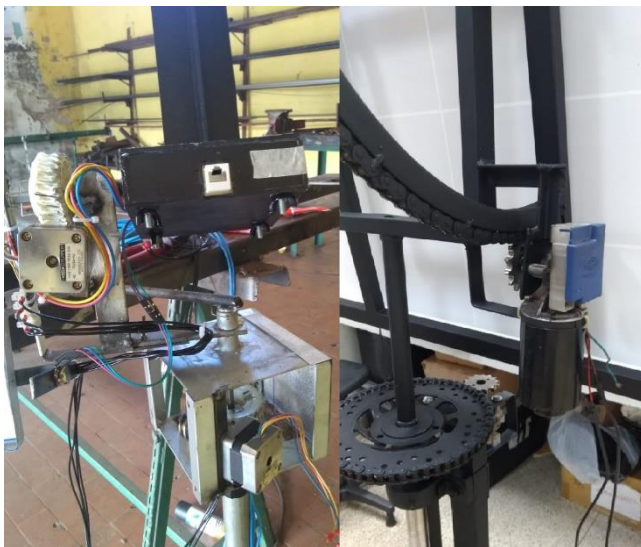
O rastreador solar também pode ser classificado quanto a estratégia de controle utilizada: malha aberta ou malha fechada. Os controladores em malha fechada apresentam como principal característica a realimentação do sinal da variável de saída. São utilizados sensores para determinar os parâmetros apropriados da posição do sol, os quais são manipulados pelo controlador através de algoritmos e técnicas de rastreamento e controle, para então acionar mecanismos de reorientação do dispositivo em direção ao sol (MISHRA et al, 2017). De maneira oposta, os controladores em malha aberta não utilizam a realimentação e as tomadas de decisões são baseadas apenas no estado atual do sistema. Dessa maneira, os controladores em malha aberta são mais simples e baratos, porém, não permitem corrigir erros de estado estacionário, assim como compensar perturbações durante o funcionamento do sistema (SIDEK et al, 2017).

3. Materiais

O sistema desenvolvido é um rastreador solar de dois eixos, composto por duas estruturas, sendo uma dedicada ao rastreamento da posição do sol com auxílio dos resistores dependentes de luz (LDR), e a outra para sustentar e posicionar o painel solar, com potência nominal de 275 *Wp* e massa de 18 *kg*. A estrutura do rastreador está

equipada com dois motores de passo do tipo bipolar modelo Nema 17, com tensão nominal de 12 V e passo de 1,8°, responsáveis pela movimentação nos ângulos de altitude e azimute, como mostra a Figura 1a. Já a estrutura do painel é movimentada através de motores de corrente contínua com tensão nominal de 12 V e engrenagens para aumentar o torque e diminuir a rotação (Figura 1b). Adicionalmente, em ambas estruturas são empregados potenciômetros lineares fixos nos eixos de rotação para realizar a realimentação do sistema.

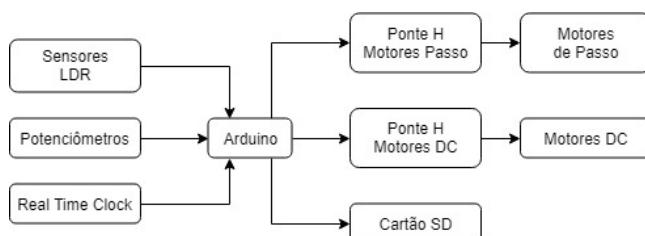
Figura 1: Estruturas do rastreador e do painel solar



Fonte: Autoria própria.

A eletrônica do sistema é composta por uma placa de prototipagem Arduino Mega 2560, um relógio digital DS3231, um controlador de cartão SD, duas placas *driver* ponte H para acionamento dos motores de passo e de corrente contínua, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Eletrônica do sistema



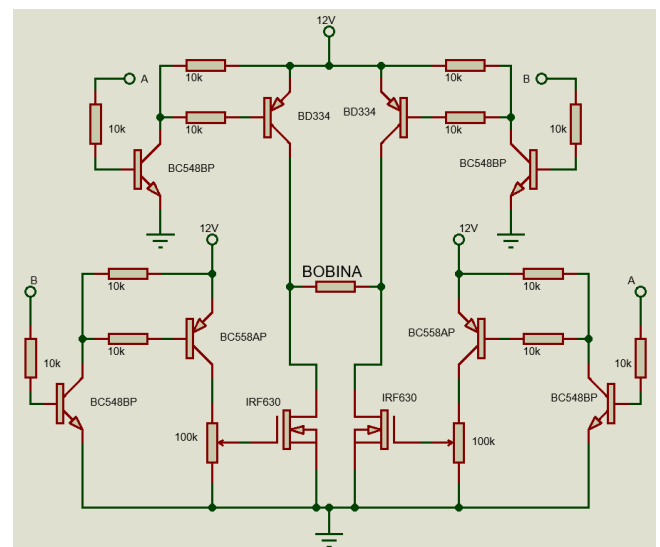
Fonte: Autoria própria.

A plataforma Arduino vem sendo utilizada como central de processamento em estudos de eletrônica e robótica em geral, devido à facilidade de programação em linguagem C e à disponibilidade de recursos, sendo um produto de *hardware* e *software* livre de baixo custo (SILVA

et al, 2012). O Arduino Mega 2560 é composto por um microcontrolador ATmega2560 e um circuito integrado ATmega16U2 como conversor serial-USB, disponibiliza 54 pinos de entrada ou saída digital, dentre os quais 15 podem ser utilizados como PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*, modulação por largura de pulso), 16 entradas analógicas com resolução de 10 *bits*, 4 módulos UART, 256 *kB* de memória FLASH, 8 *kB* de SRAM e 4 *kB* de memória EEPROM (informações disponíveis no *site* do fabricante).

O circuito de acionamento dos motores, conhecido como ponte H, é composto por quatro transistores de potência, sendo dois BD334 (transistor bipolar de junção do tipo PNP) e dois IRF630 (transistor de efeito de campo do tipo NPN), cuja polarização é realizada através de transistores BC548 e BC558, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Circuito de acionamento ponte H



Fonte: Autoria própria.

O controle de corrente na bobina é determinado pelo divisor de tensão no potenciômetro ligado à base dos transistores NPN. Os pinos A e B são ligados ao Arduino e são utilizados para determinar o sentido de passagem da corrente pela bobina. Para os motores de corrente contínua, estes pinos são ligados a saídas PWM, possibilitando o controle de sentido e de velocidade. Já para os motores de passo, se faz necessário o uso de um circuito para cada bobina, sendo que o sentido de rotação é dado pelo acionamento sequencial das bobinas.

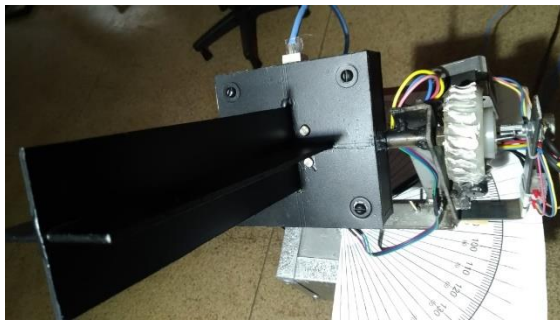
O relógio digital DS3231, juntamente com o controlador de cartão SD, são utilizados para

armazenar os dados de data e hora, da leitura dos sensores e do sistema de controle dos motores. O sistema é alimentado por uma fonte chaveada de 12 V e corrente máxima de 5 A.

4. Estratégia de rastreamento

A estratégia de rastreamento utilizada está baseada na diferença de iluminação em quatro resistores dependentes de luz (LDR). Estes LDRs estão dispostos nos quadrantes de uma estrutura em cruz com base de 6 cm por 6 cm e altura de 20 cm, como mostra a Figura 4. Durante o funcionamento do sistema, a incidência dos raios solares não alinhados com a estrutura causa uma diferença de iluminação nos sensores, a qual pode ser mensurada pelo Arduino através do conversor analógico-digital. Quando ocorre o alinhamento, a sombra gerada não influencia nos sinais fornecidos pelos LDRs.

Figura 4: Sensoriamento luminoso

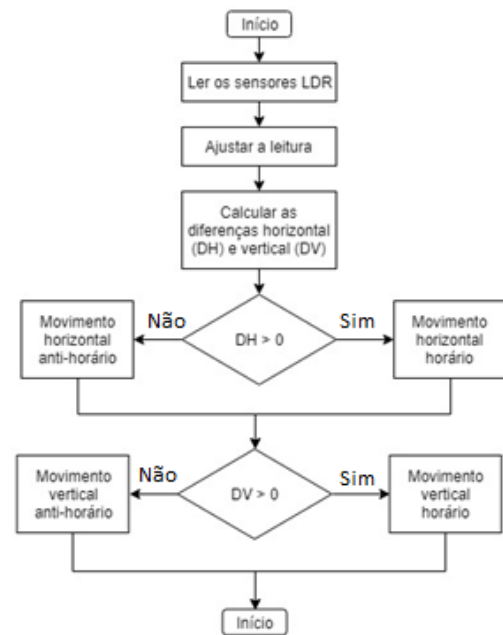


Fonte: Autoria própria.

O algoritmo de rastreamento inicia com a leitura individual dos sensores através do conversor AD com resolução de 10 bits. Em seguida, os valores obtidos são ajustados conforme a calibragem inicial, para então serem efetuados os cálculos das diferenças de iluminação entre os pares de sensores, tanto na vertical como na horizontal. Um fator de tolerância na diferença de iluminação foi inserido devido a distância entre os sensores e ao passo mínimo dos motores. O sentido de rotação dos motores é determinado pelas diferenças calculadas. Este algoritmo está representado no fluxograma da Figura 5.

Para testar e validar a estratégia de rastreamento, posicionou-se um refletor em nove ângulos diferentes em uma sala escura, com o intuito de simular o movimento relativo do Sol. O erro angular foi calculado através do comprimento da sombra gerada pela estrutura. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 1.

Figura 5: Fluxograma da estratégia de rastreamento



Fonte: Autoria própria

Tabela 1: Validação da estratégia de rastreamento

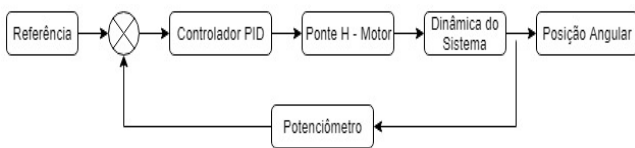
Ponto	Sombra Horizontal	Sombra Vertical	Erro Azimute	Erro Altitude
6hr	4 mm	5 mm	1,1515°	1,4392°
7h30	4 mm	5 mm	1,1515°	1,4392°
9hr	5 mm	5 mm	1,4392°	1,4392°
10h30	2 mm	5 mm	0,5758°	1,4392°
12hr	4 mm	4 mm	1,1515°	1,1515°
13h30	5 mm	6 mm	1,4392°	1,7269°
15hr	6 mm	5 mm	1,7269°	1,4392°
16h30	5 mm	6 mm	1,4392°	1,7269°
18hr	0 mm	5 mm	0°	1,4392°

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 1, pode-se notar que a sombra apresenta uma média de 5 mm, que representa a distância entre o sensor e a cruz. Para resolver este problema, o sensor será posicionado com distância mínima, a fim de diminuir o erro nos ângulos de azimute e altitude.

5. Controle PID

O sistema de controle tem como objetivo posicionar o painel solar nos ângulos encontrados através da estratégia de rastreamento. Para tanto, são utilizados potenciômetros lineares de 100 kΩ fixos nos eixos de rotação, atuando como sensor na realimentação angular. Optou-se por utilizar um controlador PID no Arduino, o qual realiza a leitura do ângulo atual, calcula o erro e determina a velocidade de atuação do motor, conforme o diagrama da Figura 6.

Figura 6: Sistema de controle

Fonte: Autoria própria.

O controlador PID (do inglês, *Proportional-Integral-Derivative*, Proporcional-Integral-Derivativo) é empregado na maioria dos processos industriais devido às suas características importantes: possui realimentação, elimina o erro de estado estacionário e pode antecipar o futuro através da ação derivativa (ASTROM; HAGLUND, 1995). A ação de controle de um controlador PID é dada pela equação

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right], \quad (1)$$

onde $u(t)$ e $e(t)$ representam a ação do controlador e o sinal de erro, respectivamente, K_p , T_i e T_d são os parâmetros relacionados às ações proporcional, integral e derivativa (BASILIO; MATOS, 2002).

Durante a implementação do controlador no Arduino foi necessário determinar o ciclo de trabalho mínimo para o motor vencer a grande inércia do sistema. Também foi adicionado uma variável para controle de valor máximo na integração do erro, conhecido como *wind-up* (ASTROM; HAGLUND, 1995). Dessa forma, utilizou-se o algoritmo de controle presente no Quadro 1.

Quadro 1: Algoritmo de controle simplificado

```

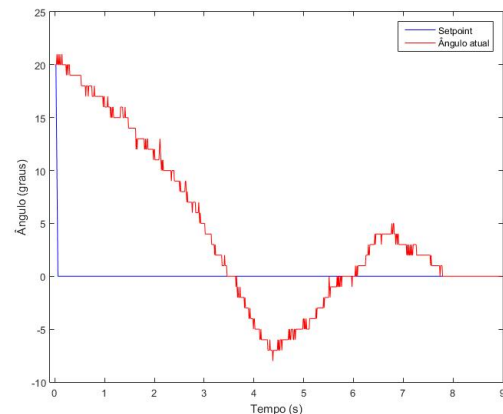
erro_atual = setpoint - angulo_atual;
integral = integral + erro_atual;
if(integral > wind_up) integral = wind_up;
derivada = erro_atual - erro_anterior;
erro_anterior = erro_atual;
u = kp*erro_atual+ki*integral+kd*derivada;
u = u + minimo;
  
```

Fonte: Autoria própria.

As constantes ki e kd possuem em sua composição os parâmetros expostos na Equação 1, facilitando o processamento ao diminuir o número de multiplicações e divisões a serem realizadas pelo Arduino. Como o motor pode rotacionar em dois sentidos, a ação de controle assume valores positivos e negativos, cujo sinal determina o sentido de rotação.

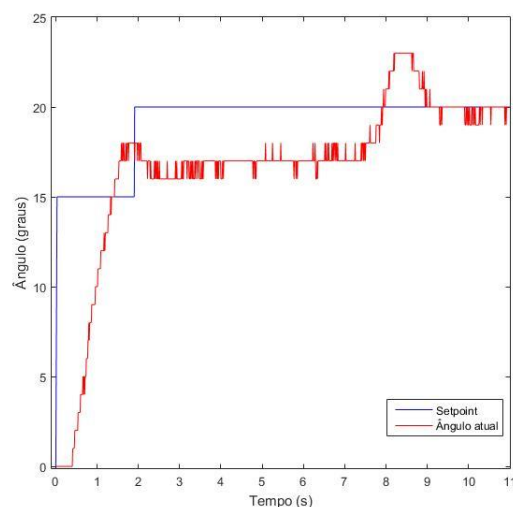
O movimento no ângulo de altitude possui dinâmicas diferentes para rebaixar e elevar o painel solar, devido ao peso do mesmo. Dessa

forma, foram utilizados ganhos diferentes para cada tipo de movimento, alcançado estabilidade tanto para ângulos de entrada grandes quanto pequenos, com precisão de 1 grau. A Figura 7 mostra a resposta ao degrau de 20° para 0° no ângulo de altitude.

Figura 7: Resposta ao degrau para o ângulo de altitude

Fonte: Autoria própria.

O controle do movimento no ângulo de azimuth foi dificultado devido à problemas mecânicos no encaixe entre a engrenagem do motor e da estrutura, acarretando em diferentes respostas ao longo do escopo do movimento. Este problema está sendo resolvido com o emprego de uma caixa de redução com relação 1 para 37 e a construção de um novo sistema de encaixe. A resposta ao degrau de 0 para 20 graus no ângulo de azimuth está representada na Figura 8.

Figura 8: Resposta ao degrau para o ângulo azimuth

Fonte: Autoria própria.

As respostas obtidas com o controlador PID para ambos os ângulos são satisfatórias,

porém, acredita-se que o uso das caixas de redução irá melhorar a estabilidade e a resolução, além de diminuir o sobressinal.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento parcial de um rastreador solar de dois eixos. Este sistema consiste em duas estruturas mecânicas com dois graus de liberdade, sendo uma equipada com sensores LDR e responsável pelo rastreamento da posição relativa do sol, e outra para sustentar e posicionar o painel solar fotovoltaico. A estratégia de rastreamento utilizada mostrou-se eficiente, com erro médio de 1,5 graus, correspondente ao tamanho da sombra gerada devido a distância entre a estrutura e o sensor. O algoritmo de controle PID implementado no Arduino atingiu o objetivo de posicionar o painel com precisão de 1 grau, apesar do alto sobressinal e dos problemas mecânicos encontrados. Na sequência do projeto, será substituído o sistema de engrenagens por uma rosca sem fim no rastreador, assim como serão adicionadas caixas de redução para os motores de corrente contínua. Ao final do projeto, espera-se realizar uma análise do ganho de energia líquida do sistema, ou seja, avaliar o aumento na geração de energia elétrica com o uso do rastreador levando em consideração a energia gasta em seu funcionamento.

REFERÊNCIAS

ASTROM, K. J.; HAGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2ª ed. Research Triangle Park, 1995.

BASILIO, J. C.; MATOS, S. R. Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, no. 4, novembro, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 31 de março de 2016.

MAKWANNA, A.; LAD, D. Dual axis solar tracking system using 5-LDR sensor. *International*

Journal of Current Engineering and Technology. 2017, 7, 1750-1753.

NSENGIYUMVA, W.; CHEN, S. G.; HU, L.; CHEN, X. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 81, 250-279.

OLIVEIRA, Carlos A. A. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

OLIVEIRA, Maurício M. **Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimutal**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SIDEK, M. H. M.; AZIS, N.; HASAN, W. Z. W.; AB KADIR, M. Z. A.; SHAFIE, S.; RADZI, M. A. M. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2017, 124, 160-170.

SILVA, J. F. M. C.; GOMES, R. C.; NASCIMENTO, A. O. F.; SANTOS, D. M. S.; OLIVEIRA, K. D.; MENEZES, J. W. M. Construindo veículo teleoperado com Arduino para auxílio no ensino de sistemas embarcados e robótica movel. *XL CONTREGOSSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA*, Belém, set. 2012.

THARAMUTTAM, J. K.; NG, A. K. Design and development of an automatic solar tracker. *Energy Procedia*. 2017, 143, 629-634.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.