



Desenvolvimento de um rastreador solar de dois eixos utilizando algoritmo de posicionamento cronológico

Anacreone da Silva Souza¹ – anacreone.souza@ifpr.edu.br

Juliano da Rocha Queiroz¹ – juliano.queiroz@ifpr.edu.br

Cid Marcos Gonçalves Andrade² – cmgandrade@uem.br

1 – Instituto Federal do Paraná – Campus Ivaiporã

2 – Universidade Estadual de Maringá

Resumo: O presente trabalho aborda o desenvolvimento parcial de um protótipo de rastreador solar de dois eixos. Este dispositivo manterá um painel fotovoltaico perpendicularmente aos raios solares ao longo do dia, garantindo assim o máximo aproveitamento da energia luminosa. Objetiva-se desenvolver um algoritmo de posicionamento baseado na resolução de equações astronômicas e implementar um controle PID nos motores DC responsáveis pela movimentação da estrutura. A validação dos resultados foi realizada através da comparação dos dados do algoritmo com os fornecidos por ferramentas online. Já para o controle PID dos motores foi avaliada a resposta ao degrau do ângulo. Como resultados, obteve-se um erro máximo de 2,02° no ângulo de rastreamento e 1° no ângulo de posicionamento dos motores. Visando melhorias, serão realizadas alterações na estrutura mecânica, com a introdução de uma caixa de redução que tornará o movimento mais suave e preciso.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Rastreador solar, algoritmo cronológico, 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.

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).

Objetivando maximizar a geração de energia elétrica, são estudados sistemas para orientar o arranjo de painéis de forma que estejam sempre voltados para o sol, de forma 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, baseado em um sistema microcontrolado de posicionamento, aplicado a geração de energia fotovoltaica. O algoritmo de rastreamento utilizará a posição teórica do Sol (determinada a partir de equações astronômicas) como referência para a orientação do módulo. Foi desenvolvida uma estrutura para sustentação e posicionamento do painel. Adicionalmente, implementou-se um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) na plataforma Arduino, o qual aciona os motores DC 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. 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. Já a estratégia híbrida mescla tanto a utilização de sensores quanto o posicionamento a partir da posição teórica do sol.

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, eles 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 dedicado a sustentar e posicionar um painel solar, com potência nominal de 275 *Wp* e massa de 18 *kg*. A estrutura é movimentada através de motores de corrente contínua com tensão nominal de 12 *V* e caixa de redução para aumentar o torque e diminuir a rotação (Figura 1). Adicionalmente, são empregados na estrutura potenciômetros lineares fixos nos eixos de rotação, destinados a realimentação do sistema.

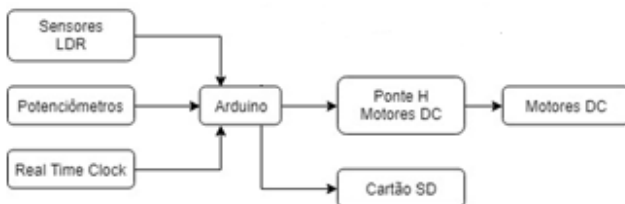
Figura 1: Estrutura do rastreador solar



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, uma placa *driver* ponte H para acionamento dos motores de corrente contínua, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Eletrônica do sistema

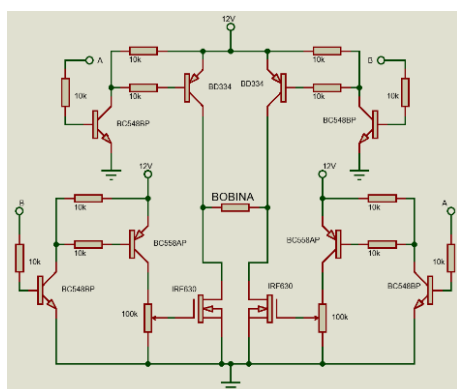


Fonte: Autoria própria.

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 [41]. O Arduino Mega 2560 é composto por um microcontrolador ATmega2560, disponibilizando 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) (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 (Figura 3).

Figura 3: Circuito de acionamento ponte H



Fonte: Autoria própria.

Os pinos A e B são ligados ao Arduino e são utilizados para determinar o sentido de passagem da corrente pela bobina. Estes pinos são ligados a saídas PWM, possibilitando o controle de velocidade do motor.

4. Estratégia de rastreamento cronológica

A estratégia de rastreamento baseada em algoritmo cronológico utiliza equações astronômicas desenvolvidas para determinar a posição do Sol na abóboda celeste. Para isto, estas equações utilizam como parâmetros de entrada as coordenadas geográficas do local, data e o horário em que se deseja determinar a posição do Sol. Jean Meeus (1998) descreve em seu livro um conjunto de equações que são implementadas por vários pesquisadores. Estas equações inicialmente convertem a data atual para o calendário Juliano [J_D] e, a partir desse resultado uma série de parâmetros é calculado (número de séculos julianos [T], longitude solar [L], anomalia média solar [A_s], excentricidade da órbita da terra [E], equação do centro do sol [E_s], longitude solar verdadeira [L_v], anomalia solar verdadeira [A_{sv}], ângulo horário de Greenwich [A_{OG}], obliquidade do equador [O_E], ascensão [A_{SC}], declinação [D] e ângulo horário [A_O]) para que então os ângulos de azimute [A_Z] (1) e elevação [E_L] (2) possam ser determinados:

$$AZ = tg^{-1} * \left(\frac{\sin(A_O)}{[\cos(A_O) * \sin(Latitude) - \tan(D) * \cos(Latitude)]} \right) \quad (1)$$

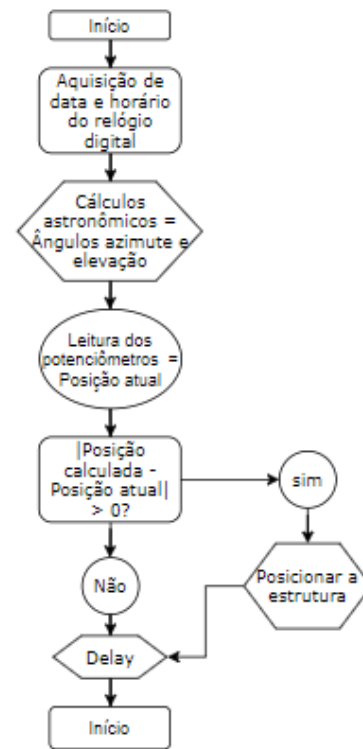
$$EL = \sin^{-1} * [\sin(Latitude) * \sin(D) + \cos(Latitude) * \cos(D) * \cos(A_O)] \quad (2)$$

Após a aquisição da data e horário atual a partir do relógio digital DS3231 e das coordenadas geográficas, o algoritmo de controle executa as operações matemáticas supracitadas e determina os ângulos de azimute e elevação em que o painel fotovoltaico deve ser posicionado. Em seguida é feita a leitura dos potenciômetros de realimentação para determinar-se a posição atual do módulo. Caso a posição atual seja diferente da calculada, os motores DC são acionados para movimentar a estrutura e direcioná-la para a posição correta. Como o movimento aparente do Sol é lento, este

ciclo é repetido em um intervalo de tempo determinado, de modo que a estrutura não seja movimentada constantemente, minimizando assim o gasto energético. Este algoritmo está representado em um fluxograma na Figura 4.

Até o presente momento, o algoritmo de controle foi parcialmente desenvolvido e testado. Foram realizadas a aquisição de dados do relógio digital DS3231 e implementadas as equações para determinação dos ângulos de azimute e elevação. Para validar os dados obtidos, os resultados foram comparados aos fornecidos por uma ferramenta online desenvolvida para designers e consumidores de energia solar (https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=pt). Foi feita uma simulação para a data de 06/11/18 e coordenadas do Instituto Federal do Paraná – Campus Ivaiporã. Os ângulos foram coletados de hora em hora, das 07 às 19 horas, e comparados aos dados gerados pela ferramenta online. A partir destes dados, foram determinados os erros percentuais e totais. Os resultados estão sintetizados na Tabela 1.

Figura 4: Fluxograma da estratégia de rastreamento



Fonte: Autoria própria

Tabela 1: Validação da estratégia de rastreamento

Hora	Elevação ° (Referência)	Azimute ° (Referência)	Elevação ° (Algoritmo)	Azimute ° (Algoritmo)	Erro Elevação (%)	Erro Azimute (%)	Erro Total Elevação °	Erro Total Azimute °
07:00	4,23	105,67	4,5	106,32	-6,38298	-0,61512	-0,27	-0,65
08:00	17,56	100,08	17,79	100,76	-1,30979	-0,67946	-0,23	-0,68
09:00	31,12	94,7	31,33	95,46	-0,67481	-0,80253	-0,21	-0,76
10:00	44,79	88,86	44,98	89,76	-0,4242	-1,01283	-0,19	-0,9
11:00	58,42	81,19	58,62	82,38	-0,34235	-1,4657	-0,2	-1,19
12:00	71,6	66,93	71,89	68,75	-0,40503	-2,71926	-0,29	-1,82
13:00	81,49	17,05	82,09	18,42	-0,73629	-8,03519	-0,6	-1,37
14:00	75,8	302,68	76,17	300,66	-0,48813	0,667371	-0,37	2,02
15:00	63,07	282,4	63,31	281,16	-0,38053	0,439093	-0,24	1,24
16:00	49,53	273,36	49,73	272,5	-0,4038	0,314603	-0,2	0,86
17:00	35,87	267,11	36,06	266,43	-0,52969	0,254577	-0,19	0,68
18:00	22,27	261,65	22,47	261,08	-0,89807	0,217848	-0,2	0,57
19:00	8,85	256,19	9,08	255,67	-2,59887	0,202974	-0,23	0,52

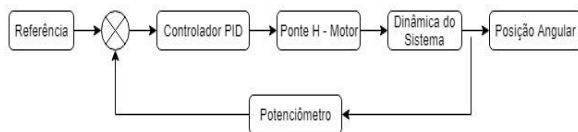
Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 1 observa-se que o algoritmo obteve resultados satisfatórios. O maior desvio percentual observado foi de -6,38% (7:00 h), sendo que a maioria não passou de 1%. Já em relação ao erro total, os maiores valores observados foram de -0,6° para o ângulo de elevação e 2,02° para o ângulo de azimute.

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 4: 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 (PID Controller). A ação de controle de um controlador PID é dada pela equação

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right], \quad (3)$$

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 (PID).

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* (PID Controller). Dessa forma, utilizou-se o algoritmo

de controle presente no Quadro 1.

Quadro 1: Algoritmo de controle simplificado

```

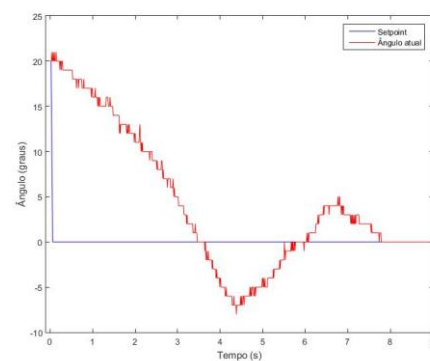
erro_atual = setpoint - angulo_atual;
integral = integral + erro_atual;
if(integral > wind_up) integral = wind_up;
derivada = erro_atual - erro_anterior;
erro_anterior = erro_atual;
u = kp*erro_atual+ki*integral+kd*derivada;
u = u + minimo;
  
```

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 a força gravitacional. 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°. A Figura 7 mostra a resposta ao degrau de 20° para 0° no ângulo de altitude.

Figura 5: Resposta ao degrau para o ângulo de altitude

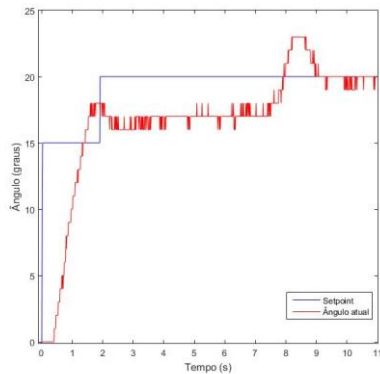


Fonte: Autoria própria.

O controle do movimento no ângulo de azimute foi dificultado devido à problemas mecânicos no encaixe entre a engrenagem do motor e da estrutura, acarretando diferentes respostas ao longo 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 6: 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

O presente trabalho demonstra o desenvolvimento parcial de um rastreador fotovoltaico de dois eixos, com algoritmo de controle baseado em equações astronômicas. O algoritmo mostrou-se eficiente, com um erro máximo observado de $0,6^\circ$ no ângulo de elevação e $2,02^\circ$ no ângulo de azimuth. O algoritmo de controle PID implementado conseguiu posicionar o módulo com precisão de 1° , apesar do alto sobressinal e dos problemas mecânicos encontrados. Serão realizadas mudanças na estrutura mecânica, com o acréscimo de uma caixa de redução de velocidade de 1:37 no acoplamento do motor DC com a estrutura. Desta maneira espera-se que a movimentação da estrutura ocorra de maneira mais suave, diminuindo o sobressinal e aumentando a precisão do sistema de controle. Na sequência do trabalho a geração de energia do sistema será comparada com a de um painel fixo com as mesmas especificações de potência. A energia consumida pelo sistema de rastreo também será mensurada, de forma que o ganho líquido na produção de energia possa ser determinado.

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**. IEE 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.
- MAKWANNA, A.; LAD, D. **Dual axis solar tracking system using 5-LDR sensor**. International Journal of Current Engineering and Technology. 2017, 7, 1750-1753.
- MEEUS, Jean; **Astronomical Algorithms**. 2ª ed. Richmond, Virgínia: Willmann – Bell Inc, 1998.
- 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 azimuthal**. 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 móvel**. 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.