

Controle de Um painel Solar Para Rastreamento de Orientações de Máxima Geração de Potência

Cleberon L. A. Melo* Marcos G. L. Moura*
 Milena F. Pinto* Alessandro R. L. Zachi* Aurélio G. Melo**
 Camile A. Moraes***

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, RJ, Brasil (e-mail: cleberonlael.nave@gmail.com, marcos.moura@aluno.cefet-rj.br, milena.pinto@cefet-rj.br, alessandro.zachi@cefet-rj.br).*

** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, Brasil (e-mail: amelo@ieee.org)*

*** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil (e-mail: camile.aredes@engenharia.ufjf.br)*

Abstract: This work describes the prototype of an electronic supervision and control system for the orientation of a bench solar panel. Solar tracking control is a strategy that allows a photovoltaic panel to be more efficient in capturing energy during the day. The control function is to provide orientation and/or positioning of the panel in the directions of greater light intensity throughout the day. The developed tracker prototype has as its core an electronic circuit based on a commercial microcontroller model *Tennsy* 3.0, within which the control algorithm is embedded. In addition to the controller, a supervisory software was developed to monitor solar cells' status in real-time. The software was developed using *Processing*, which is an open-source Java-based platform. The supervisory shows the angle of the solar plate and values of luminosity and acquired power. Simulations results are presented to show that the amount of energy generated can reach 37 %.

Resumo: Este trabalho descreve o protótipo de um sistema de supervisão e de controle eletrônico para orientação de um painel solar de bancada. O controle de rastreamento solar é uma estratégia que permite que um painel fotovoltaico tenha maior eficiência na captação de energia durante o dia. A função do controle é orientar e/ou posicionar o painel nas direções de maior intensidade luminosa ao longo do dia. O protótipo do rastreador desenvolvido tem como cerne um circuito eletrônico baseado em um microcontrolador comercial modelo *Tennsy* 3.0, dentro do qual se encontra embarcado o algoritmo de controle. Além do controlador, desenvolveu-se um *software* supervisor para monitorar em tempo real do estado das células solares. O *software* foi desenvolvido na plataforma *open source* *Processing* que é baseado em Java. Este supervisor mostra a angulação da placa solar e valores de luminosidade e potência adquirida. Resultados de simulações são apresentados para mostrar que a quantidade de energia gerada pode chegar a 37%.

Keywords: Solar tracker; Microcontroller electronics; Solar energy; PID controller

Palavras-chaves: Rastreador solar; Eletrônica de microcontroladores; Energia solar; Controle PID

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma crescente demanda em relação ao consumo de energia elétrica Cui et al. (2019a). Consequentemente, muitos trabalhos foram desenvolvidos para a criação de métodos eficientes e viáveis para adicionar às opções de fornecimento de energia existentes, e em especial, à energia renovável, tal como apresentado em Debbichi et al. (2018). Esse foco decorre de vários fatores, incluindo à preocupação com o aquecimento global. Em relação ao Brasil, somente de energia solar, o país gera

cerca de 2,3 GW de potência. Fato que coloca o Brasil na lista dos 30 países do mundo que mais geram energia proveniente do Sol. De acordo com Dana (2018), a associação brasileira de energia solar fotovoltaica estabeleceu como meta que até o ano de 2030, o Brasil deve gerar cerca de 30 GW.

Os sistemas fotovoltaicos são muito importantes para a conversão da energia solar limpa e sustentável em eletricidade. A eficiência de conversão do sistema fotovoltaico está na faixa de 20%, dependendo do seu tipo Liu et al. (2016). Além disso, essa faixa de eficiência pode ser reduzida ainda

mais através da diminuição da irradiância, aumentando a temperatura do painel e variando as condições de carga Bendib et al. (2015). Recentemente, muitos trabalhos foram publicados em relação à composição das placas e na geração de novos materiais, tal como mencionados em Yao et al. (2019); Cui et al. (2019b); Anderson et al. (2019); Genene et al. (2019). Devido à baixa eficiência do sistema fotovoltaico e suas características não lineares sob diferentes condições de operação, é necessário a aplicação de um controle para rastreamento de pontos de maior radiação solar ao longo do dia.

O controle da posição do painel garante que o mesmo possa produzir a máxima potência para a radiação solar disponível. Trabalhos como Fathabadi (2016) e Jamroen et al. (2020) apresentaram metodologias viáveis básicas para o rastreamento solar. Apesar dos resultados apresentados, ambos os artigos podem ser otimizados avaliando-se o momento apropriado para realização do rastreamento, ou seja, avaliando-se as condições de geração local. Outros trabalhos como Kim and Cho (2019) propõem métodos eficientes baseados na medição total da condição celeste. Apesar de eficiente, possui alto custo financeiro, não sendo viável em pequena escala.

O uso de um controlador do tipo PID para este fim torna o processo mais simples de implementar por ser aplicável à praticamente qualquer microcontrolador, e consequentemente, diminuindo custo para o sistema, tornando-o mais atrativo que outros que utilizam controladores digitais de sinais (do inglês, *digital signal controller* - DSC) Safari and Mekhilef (2010); Aguilar et al. (2019) ou circuitos complexos apenas para converter os sinais oriundos dos sensores Seyedmahmoudian et al. (2019); Rodriguez et al. (2019).

Este trabalho considera o problema de controle automático da orientação de um rastreador solar. Trata-se de um mecanismo composto por uma célula fotovoltaica montada em um suporte giratório cujo ponto de articulação encontra-se fixado ao eixo de um motor DC com caixa de redução, conforme ilustrado na Figura 1. Nas laterais da célula fotovoltaica que interceptam o plano de giro do mecanismo, encontram-se fixados dois Resistores Dependentes de Luz (*Light Dependent Resistors* - LDRs).

Os LDRs, que são responsáveis por detectar a posição do sol ao longo do dia, são montados nas laterais do suporte giratório do mecanismo, de forma a ficarem com seus campos de visão voltados para o céu, mas com ângulos de visada fixos de 65° em relação ao plano da célula.

1.1 Motivação e Principais Contribuições

O principal objetivo para rastreamento da posição solar é o aumento de eficiência dos painéis devido ao posicionamento em relação à radiação solar incidente. Apesar de incrementar a eficiência do sistema, a movimentação dos painéis implica em custos energéticos devido ao acionamento dos motores para movimentação. Desta forma, a frequência de acionamento dos motores deve ser otimizada de maneira a maximizar o ganho de energia e minimizar o seu consumo.

Esta maximização significa que em determinados dias, tal como em dias nublados, pode não haver ganho na mo-

vimentação do painel. Assim, o *setpoint* de posição seria mantido fixo independente de existirem regiões levemente mais luminosas sendo detectadas pelo sensor. Para determinar quais as condições em que existe a viabilidade para movimentação do painel, este trabalho propõe a utilização de um modelo matemático e de uma heurística de decisão.

Sendo assim, este trabalho apresenta um sistema de controle e otimização aplicado ao rastreamento da posição usando um microcontrolador. Além disso, desenvolveu-se um *software* supervisor para monitorar em tempo real do estado das células solares. Esta plataforma mostra a angulação da placa solar e valores de luminosidade e potência adquirida. As principais contribuições deste trabalho podem ser resumidas como seguem:

- Desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar simples e de baixo-custo utilizando um microcontrolador Teensy 3.0;
- Proposição de um modelo matemático e de uma heurística de decisão para determinar quais as condições em que existe a viabilidade para movimentação do painel.

1.2 Organização do Trabalho

A Seção 2 apresenta a modelagem e as fundamentações matemáticas do rastreador. A seção 3 detalha o projeto do controlador utilizado no rastreador. Os resultados obtidos juntamente com uma discussão apropriada são apresentados na Seção 4. As observações finais e trabalhos futuros são apresentados na Seção 5.

2. MODELAGEM DO RASTREADOR

Para obter o modelo matemático que descreve o movimento do rastreador solar, são utilizadas a equação dinâmica do motor DC e as relações geométricas do mecanismo.

2.1 Motor DC

A dinâmica simplificada que descreve o comportamento de um motor DC é bastante conhecida na literatura

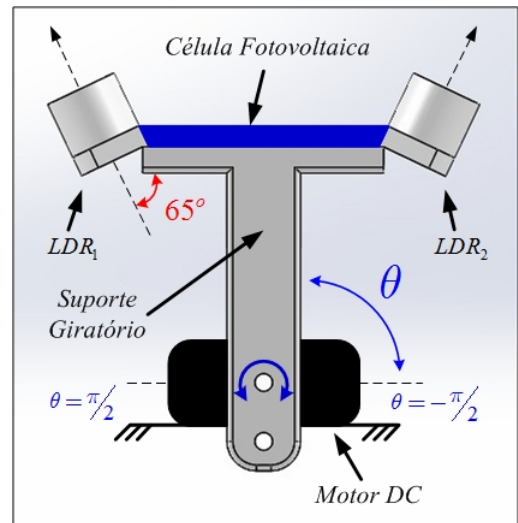


Figura 1. Esquemático do acionamento/sensor para o protótipo desenvolvido.

Kathushiko (2011). Esta equação pode ser dada em função da posição angular θ [rad] do eixo do motor:

$$\ddot{\theta} = -\alpha\dot{\theta} + \beta V_m \quad (1)$$

ou em função de sua velocidade angular w [rad/s]:

$$\dot{w} = -\alpha w + \beta V_m \quad w = \dot{\theta} \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), as constantes reais $\alpha > 0$ e $\beta > 0$ são os parâmetros eletromecânicos do motor e V_m [Volts] é a tensão elétrica aplicada em seus terminais.

2.2 Geometria do Mecanismo

A imagem da Figura 2 é uma ilustração simplificada do protótipo do rastreador. Por causa da geometria do mecanismo, observa-se na Figura 2 que os LDRs sempre se deslocam sobre uma circunferência imaginária de raio R definida pela montagem estrutural.

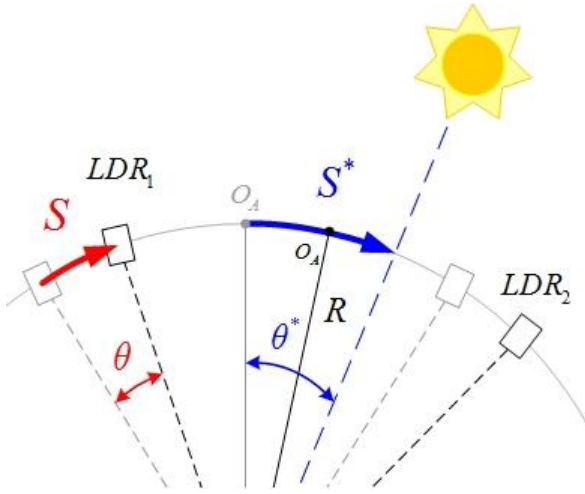


Figura 2. Geometria e deslocamento do painel.

Sobre esta circunferência imaginária, destaca-se o ponto de referência O_A que corresponde ao ponto médio do segmento de arco que une os dois LDRs. Quando o suporte giratório se inclina de um ângulo θ , o ponto médio O_A se desloca sobre a circunferência percorrendo um comprimento de arco S . Como θ é medido em radianos, então a relação entre estes dois deslocamentos pode ser escrita como:

$$S = R \theta \quad (3)$$

Quando o mecanismo rastreia o sol, o ponto médio O_A fica alinhado com o sol e o ponto de articulação do mecanismo. Nesta situação, o ângulo θ atinge seu valor desejado θ^* . De acordo com a equação (3), este ângulo desejado corresponde a um comprimento de arco desejado S^* . Logo, quando o objetivo de rastreamento solar é alcançado, as variáveis θ e S convergem simultaneamente para seus valores desejados θ^* e S^* , respectivamente. Este dado será útil nos desenvolvimentos a seguir.

2.3 Erro de Rastreamento

Para calcular o erro de rastreamento do painel em relação ao sol, são realizadas medidas das tensões elétricas V_1 e V_2

fornecidas pelos circuitos dos LDRs 1 e 2, respectivamente. Neste trabalho, o erro de rastreamento solar e é definido por:

$$e := V_1 - V_2 \quad (4)$$

Assume-se, por simplicidade, que a eletrônica dos LDRs obedece a lógica positiva. Por exemplo, quanto maior a intensidade de luz incidente sobre o LDR_1 , maior sua tensão de saída V_1 e vice-versa.

Considere novamente o esquemático da Figura 2. Apenas para efeito de análise, assumamos que o rastreador inicialmente está fora do ponto de convergência $S \neq S^*$ e $\theta \neq \theta^*$, com o LDR_2 focalizando o sol diretamente. Baseado na lógica positiva, a tensão V_2 será maior do que a tensão V_1 . De acordo com a equação (4), isto resultará em um valor de erro negativo. Observe que, nesta mesma situação inicial, os valores de θ^* e S^* também serão maiores do que os valores de θ e S , respectivamente. Desta forma, é possível definir uma variável de erro de deslocamento e_S , tal como mostrado na equação (5).

$$e_S := S - S^* \quad (5)$$

Essa variável terá o mesmo sinal do erro e da equação (4). Além disso, uma vez que o rastreamento é alcançado, como já foi discutido na seção anterior, tem-se $S = S^*$ ($e_S = 0$) e, idealmente, os dois LDRs passam a receber a mesma intensidade de luz, implicando em $V_1 = V_2$ e, consequentemente, em $e = 0$. Isto significa que os erros e e e_S podem ser relacionados instantaneamente por uma função K_0 :

$$e_S := K_0 e \quad (6)$$

A natureza da função K_0 depende de como as tensões V_1 e V_2 variam durante o movimento do rastreador. Contudo, é possível afirmar que trata-se de uma função positiva definida, já que e_S e e possuem sempre o mesmo sinal. Por simplicidade e sem perder a generalidade, assume-se que K_0 é uma constante positiva.

2.4 Modelo Completo

Observe que o erro e_S não está disponível, porque tanto S como S^* dependem dos ângulos θ e θ^* , que não são mensuráveis neste projeto. No entanto, e_S pode ser medido indiretamente pelo erro e . Indiretamente, porque K_0 não é uma constante conhecida. Assim, derivando a equação (6) duas vezes em relação ao tempo, após isolar e no primeiro membro, tem-se que:

$$\begin{aligned} \ddot{e} &= \left(\frac{1}{K_0} \right) \ddot{e}_S \\ \ddot{e} &= \left(\frac{1}{K_0} \right) (\ddot{S} - \ddot{S}^*) \end{aligned} \quad (7)$$

Como o movimento do sol no céu é lento quando comparado à velocidade do motor, S^* pode ser considerado constante. Logo,

$$\ddot{e} = \left(\frac{1}{K_0}\right) \ddot{S} = \left(\frac{1}{K_0}\right) R\ddot{\theta}$$

$$\ddot{e} = \left(\frac{R}{K_0}\right) (-\alpha w + \beta V_m) \quad (8)$$

$$w = \dot{\theta} = \frac{1}{R} \dot{S} = \frac{K_0}{R} \dot{e} \quad (9)$$

Unindo as equações (8) e (9), tem-se finalmente o modelo completo do erro de rastreamento do mecanismo:

$$\ddot{e} = -\alpha \dot{e} + \bar{\beta} V_m \quad (10)$$

$$\bar{\beta} = \frac{\beta R}{K_0} \quad (11)$$

3. PROJETO DO CONTROLADOR

Para forçar o erro de rastreamento e a tender para zero, este trabalho adota a técnica de controle por realimentação de saída, conforme ilustrado no diagrama em blocos da Figura 3.

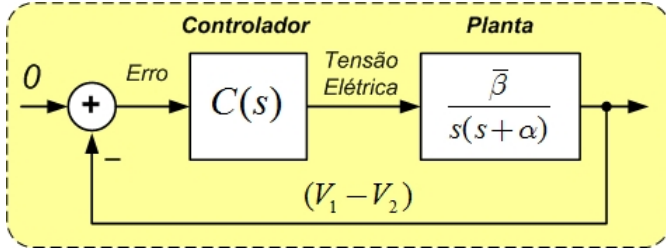


Figura 3. Fluxograma da malha com controle.

Na Figura 3, $C(s)$ é a equação do controlador que será desenvolvido para gerar a tensão V_m para o mecanismo. Este último aparece representado por sua função de transferência, calculada a partir da equação (10). Como pode ser observado no diagrama, a planta é um sistema de segunda ordem que possui um polo estável e um na origem. Sabendo que $\bar{\beta}$ e α são constantes positivas, então três tipos de controladores clássicos poderiam ser utilizados para resolver o problema de convergência:

$$\text{P: } C(s) = K_p \quad (12)$$

$$\text{PI: } C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (13)$$

$$\text{PID: } C(s) = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \quad (14)$$

Neste trabalho, optou-se pelo controlador PI da equação (13). Utilizou-se este tipo controlador devido à sua vasta utilização e simplicidade de implementação. A sintonia do mesmo foi realizada através do método de Ziegler-Nichols. Os parâmetros do método Ziegler-Nichols, tempo de resposta T , atraso L e ganho K , foram adquiridos a partir da curva de resposta ao degrau unitário do sistema. Com o intuito de obter esta curva experimentalmente, foram realizados testes com uma fonte luminosa fixa sobre o sistema. Desta forma, foi obtido a curva ilustrada na Figura 4.

A partir da curva experimental, foi traçada uma curva média para facilitar a medição dos parâmetros $T = 166 \text{ ms}$, $L = 164 \text{ ms}$ e $K = 66$. Os ganhos K_p e K_i do controlador

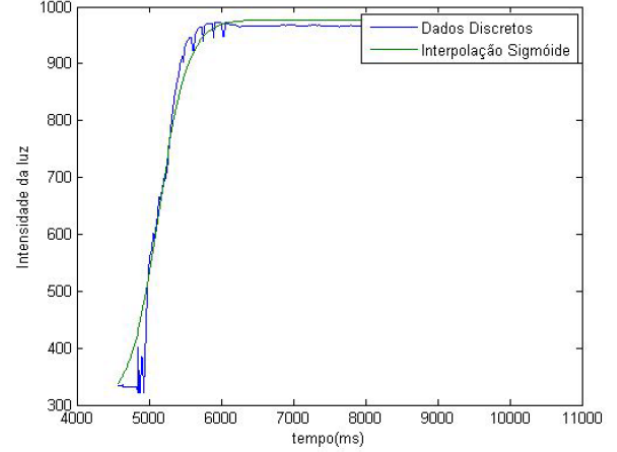


Figura 4. Ensaio Experimental: Resposta ao degrau unitário.

foram calculados de acordo com a tabela de Ziegler-Nichols apresentada na Tabela 3, resultando na seguinte estrutura de controle da equação (15).

Tabela 1. Ziegler-Nichols.

	K_p	K_i	K_d
P	T/L	0	0
PI	0.9 T/L	0.3/L	0
PD	1.2 T/L	0.5/L	0.5L

$$C(s) = 0,9659 + \frac{5,4667}{s} \quad (15)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Montagem do Protótipo

Figura 5 apresenta uma imagem do protótipo de rastreador montado em laboratório. O cerne da eletrônica embarcada é a placa microcontroladora modelo *Teensy 3.0*, que é baseado no *chip* ARM Cortex-M4 de 32 bits. Na Figura 6, tem-se uma imagem da placa *Teensy 3.0* mostrando as ligações com os sensores LDRs e com o motor DC. Esta configuração foi montada para testar o conceito do rastreador e ajustar o sinal da direção de controle. A equação do controlador PI (15) foi codificada em linguagem C e o *firmware* correspondente foi embarcado na placa *Teensy 3.0*. O sinal de tensão V_m para o motor também é gerado pela placa usando a modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). Para economizar a energia da fonte de alimentação quando a convergência é atingida, foi programada uma função no *firmware* para desligar o motor por um determinado intervalo de tempo.

4.2 Sistema Supervisório

Este trabalho apresenta um sistema supervisório desenvolvido para que o usuário possa acessar os dados do sistema. Figura 7 ilustra a interface HMI desenvolvida. Note que somente dois gráficos são mostrados, onde o primeiro apresenta a posição do servomecanismo, ou seja, para o mesmo está apontando, e o segundo gráfico mostra os parâmetros PID, *input*, *output* e *setpoint*. O gráfico com

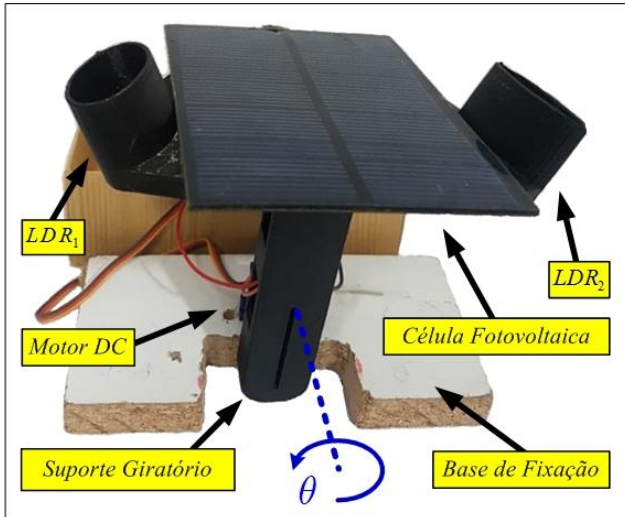


Figura 5. Esquemático com as partes do Protótipo desenvolvido.

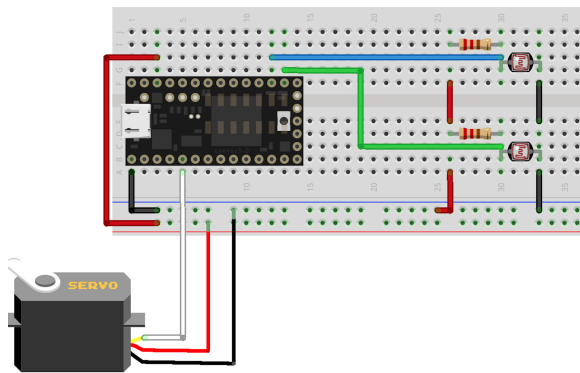


Figura 6. Circuito esquemático simplificado de conexão do sensor e servomecanismo do protótipo.

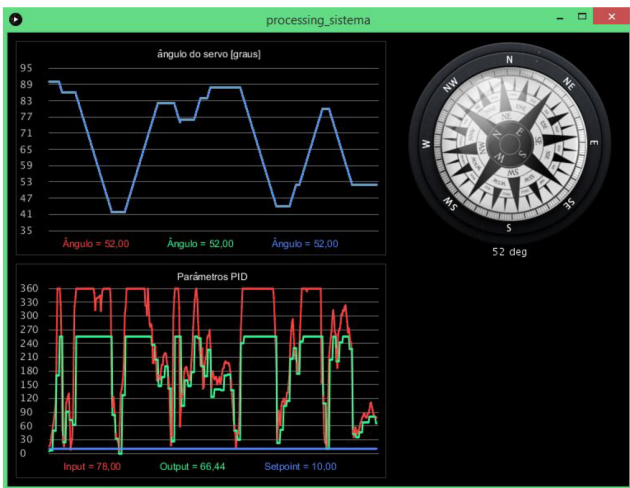


Figura 7. Interface HMI desenvolvida.

os parâmetros do controlador ajuda o usuário a visualizar o que realmente ocorre no sistema. A comunicação com o microcontrolador é feita através do protocolo Modbus. Este protocolo é uma estrutura de mensagem aberta, utilizada para comunicação entre dispositivos mestre-escravo e

cliente-servidor. A escolha deste protocolo deve-se por sua simplicidade e fácil implementação.

4.3 Monitoração do movimento do rastreador

É possível determinar a quantidade de energia incidente sobre um plano qualquer na superfície da terra conhecendo-se sua declinação δ dada pela equação (16), onde N é o dia do ano, latitude ϕ , altitude α e azimute β . A partir de informações oriundas de tabelas de irradiação, é possível determinar a quantidade de energia incidente sobre um plano, e portanto, estimar o aumento ou redução da quantidade de energia incidente sem considerar condições atmosféricas e ambientais locais, conforme mostrado nas equações (16) a (18) e representado na Figura 8.

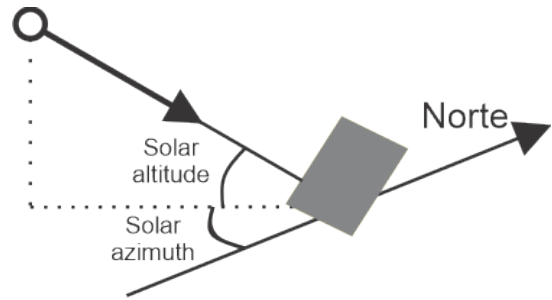


Figura 8. Movimento solar em relação ao painel fotovoltaico.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360/365 \cdot (284 + N)) \quad (16)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\Sigma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\Sigma) \quad (17)$$

$$I_{ang} = \cos(\phi) \cdot \sin(d) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(Z) + \cos(\phi) \cdot \cos(d) \cdot \cos(h) \cdot \cos(\beta) + \sin(\phi) \cdot \cos(d) \cdot \cos(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(Z) + \cos(d) \cdot \sin(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(Z) \cdot 180/\pi \quad (18)$$

A Figura 9 mostra a geração de uma placa solar em uma posição fixa com inclinação de -22 graus ao longo do ano. Foi considerado para geração da figura a latitude da cidade do Rio de Janeiro - RJ/Brasil. Nesta figura, é perceptível que, ao longo do ano, com a variação da declinação solar, ocorre uma variação da eficiência da placa.

Realizando a média dos valores diários da Figura 9, é possível determinar a quantidade de energia média gerada por ano para a placa em uma inclinação fixa. Isso pode ser visualizado pela curva de cor azul na Figura 10. O mesmo conjunto de equações permite a simulação do movimento da placa, tanto azimutal quanto de altitude. Realizando a simulação do rastreamento da altitude solar, tem-se o resultado mostrado na Figura 10 pela curva laranja. A curva mostra um ganho de aproximadamente 37% para o rastreamento da altitude solar. Observe que este é um valor teórico máximo, caso o rastreamento seja realizado de forma online. Note que os valores reais podem variar com a frequência de rastreamento.

É possível observar que o modelo permite a estimativa da geração no ângulo atual e no novo ângulo para uma placa solar. A partir desta quantidade de energia incidente e do modelo I-V do painel solar, é possível determinar o ganho ou perda real de potência devido a variação da

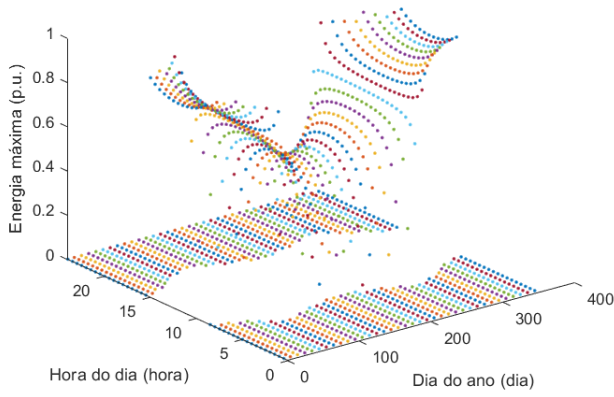


Figura 9. Geração para uma placa fixa ao longo do ano.

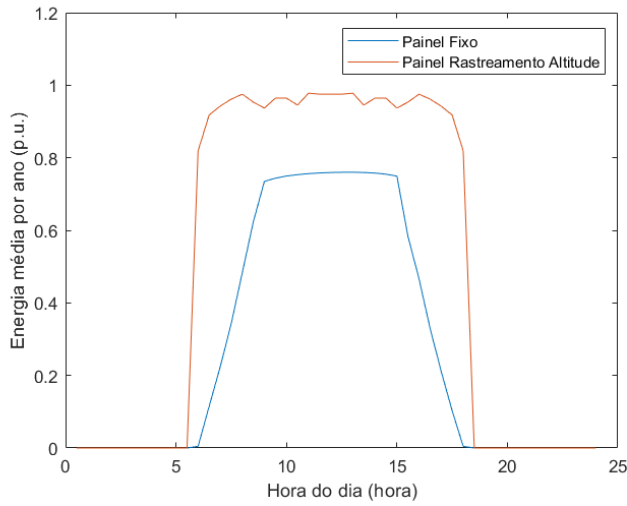


Figura 10. Geração de potencia (p.u.): Rastreamento vs placa fixa.

posição do painel solar, conforme apresentado na equação (19). Ainda assim, é preciso considerar que outros fatores podem influenciar a curva típica I-V de um painel. Como exemplo, citam-se a temperatura, quantidade de sujeira, entre outros. Entretanto, este trabalho considera que boas práticas de manutenção e um bom projeto podem mitigar estes efeitos, e desta forma, os mesmos podem ser negligenciados.

$$ganho = \frac{E_{observada}}{E_{esperada}} \cdot (\cos(I_{ang}^{P1}) - \cos(I_{ang}^{P2})) \quad (19)$$

Na equação (19), a variável I_{ang}^{P1} representa o ângulo de incidência na posição 1 e a variável I_{ang}^{P2} o ângulo de incidência na posição 2. Esta equação determina o ganho em p.u. de movimentar o painel para uma nova posição. Apesar deste ganho, é preciso considerar o custo energético da movimentação do mesmo.

O custo de energia para a movimentação de um painel p_{mov} é extremamente dependente da tecnologia empregada para movimentação, do peso do painel, entre outros fatores. Portanto, o estudo de caso aplicado neste trabalho

considera como um valor fixo em $W/graus$, equivalente à 2% da geração do painel, representando um determinado custo em função do ângulo de movimentação necessário. A quantidade de energia resultante é então dada pela equação (20) e permite determinar se a movimentação é viável caso a variável seja positiva. Desta forma, o *setpoint* de posição apenas é alterado neste caso, melhorando a eficiência geral do sistema.

$$E_t = E_{observada} \cdot ganho - p_{mov} \cdot \sigma \quad (20)$$

onde E_t é a energia resultante, $E_{observada}$ é a energia absorvida pelo painel, p_{mov} representa o custo de energia para a movimentação de um painel, $ganho$ é o ganho em p.u. de movimentar o painel para uma nova posição e σ é o ângulo necessário para o painel chegar na nova posição.

Utilizando os dados obtidos, pode-se definir um recurso interessante para o rastreador, ou seja, para que o mesmo esteja preparado para o rastreamento após o pôr do sol, este deve retornar para a posição inicial. Figura 11 mostra, para o ano de 2020, os horários do nascer e do pôr do sol utilizando como referência a altitude, latitude e longitude do CEFET-RJ unidade Maracanã.

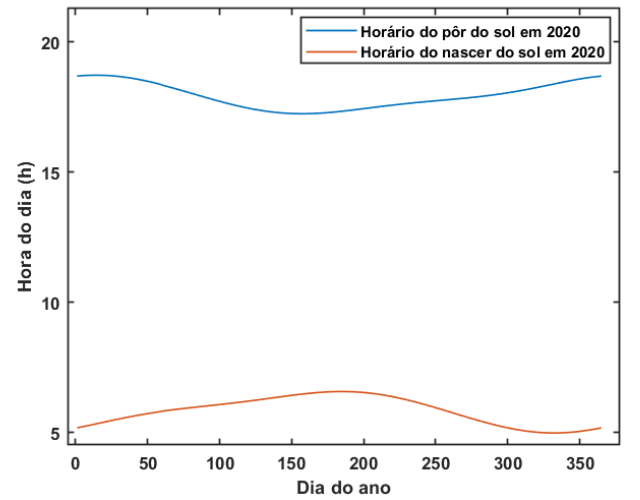


Figura 11. Nascer e pôr do sol para todo o ano de 2020 para altitude de 30m na latitude e longitude do CEFET-RJ unidade Maracanã.

O rastreamento solar é muito eficiente durante os horários onde existe pleno sol. Devido a isso, os ângulos máximo e mínimo de rastreamento azimutal devem ser ajustados para maior eficiência. Figura 12 mostram os valores de azimute e zênite solar para todos os dias de 2020. Observa-se na curva que o máximo valor é de ± 120 graus. Outra observação importante é que tanto no início quanto no fim do gráfico existe uma linha quase reta, isto indica que o ângulo varia mais do que no restante do dia.

Podemos analisar ainda o erro de rastreamento quando comparado a uma placa fixa, tal como mostrado na Figura 13. Para isto, estimou-se um ângulo de incidência do sol para cada dia e horário do ano de 2020 usando a mesma localização das figuras anteriores. As linhas verticais em cada horário representam as variações do ângulo de incidência para um determinado horário durante ano.

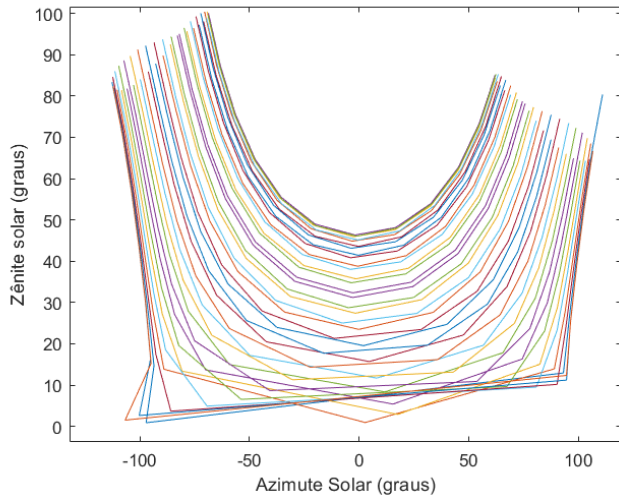


Figura 12. Ângulos zenitais e azimutais ao longo do ano de 2020.

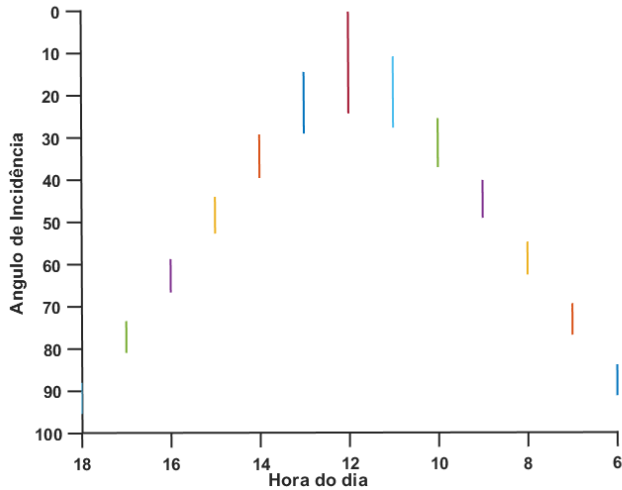


Figura 13. Erro de rastreamento comparado a uma placa com orientação norte e inclinação equivalente a latitude local.

Usando os dados das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no Rio de Janeiro - Vila Militar, de Código OMM: 86879 inmet (2020), é possível estabelecer uma estimativa da radiação solar diária na Cidade do Rio de Janeiro no ano de 2020. Este resultado é mostrado na Figura 14. É possível notar que a média móvel de 24 horas apresentada indica que a maior parte dos dias é de alta insolação, o que é corroborado pelo atlas solarimétrico local Costa et al. (2018) e Farias et al. (2020).

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Sistemas fotovoltaicos possuem baixa eficiência e apresentam características não lineares sob diferentes condições de operação. Assim, um rastreador solar é necessário para o rastreamento de pontos de maior intensidade de energia ao longo do dia. Portanto, este trabalho de pesquisa apresentou um sistema de controle e otimização aplicados a

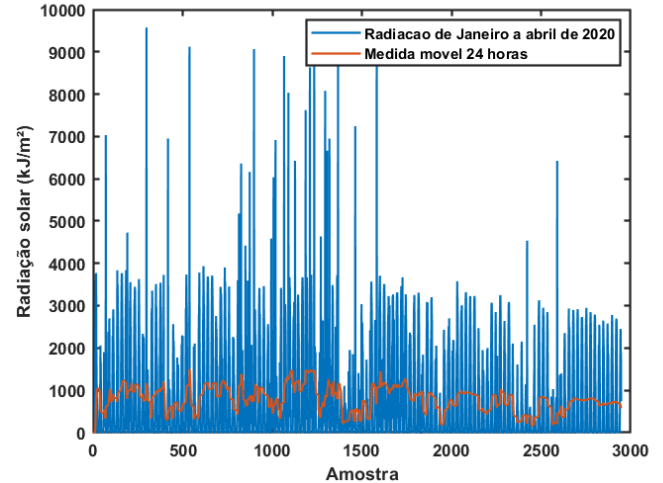


Figura 14. Dados reais da estação meteorológica Rio de Janeiro - Vila Militar retirados do banco de dados do INMET.

um sistema de rastreamento solar simples e de baixo-custo usando um microcontrolador. Além disso, este trabalho propôs um modelo matemático e de uma heurística de decisão para determinar quais as condições em que existe a viabilidade para movimentação do painel.

Simulações demonstraram um aumento de eficiência máxima de até 37% para declinação da cidade do Rio de Janeiro. Dados solarimétricos da cidade indicam ainda que os altos índices de radiação solar locais demonstram a viabilidade da aplicação da metodologia apresentada.

Para trabalhos futuros, os autores pretendem aplicar técnicas diferentes de controle para determinar quais são mais eficientes ao sistema proposto. Além disso, pretende-se adicionar um segundo eixo ao sistema a fim de que o mesmo possa captar mais pontos de intensidade de energia solar ao longo do dia, necessitando de outro processo de otimização ao novo sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às seguintes agências federais brasileiras CEFET-RJ, CAPES, CNPq e FAPERJ pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aguilar, P.V., Espinoza-Trejo, D.R., Saavedra, J.L., De Angelo, C.H., and Taheri, S. (2019). Nonlinear control of a boost dc/dc converter for photovoltaic mppt systems using a tms320f28379d microcontroller. In *2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 156–161. IEEE.
- Anderson, N., Pillai, S., Wang, C., Bjuggren, J.M., Jevric, M., Andersson, M.R., Kopidakis, N., and McNeillb, C.R. (2019). Characterization of the photochemical stability of all-polymer solar cells.
- Bendib, B., Belmili, H., and Krim, F. (2015). A survey of the most used mppt methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637–648.

- Costa, A.M.G., Lopes, B.M., and Uturbey, W. (2018). Mapeamento do potencial de geração solar fotovoltaica no brasil—uma abordagem preliminar. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 9(1), 30–40.
- Cui, Y., Yao, H., Hong, L., Zhang, T., Xu, Y., Xian, K., Gao, B., Qin, J., Zhang, J., Wei, Z., et al. (2019a). Achieving over 15% efficiency in organic photovoltaic cells via copolymer design. *Advanced Materials*, 31(14), 1808356.
- Cui, Y., Yao, H., Zhang, J., Zhang, T., Wang, Y., Hong, L., Xian, K., Xu, B., Zhang, S., Peng, J., et al. (2019b). Over 16% efficiency organic photovoltaic cells enabled by a chlorinated acceptor with increased open-circuit voltages. *Nature communications*, 10(1), 2515.
- Dana, R.M. (2018). *Planejando Cidades rumo à Economia de Zero Carbono*. Ph.D. thesis, PUC-Rio.
- Debbichi, L., Lee, S., Cho, H., Rappe, A.M., Hong, K.H., Jang, M.S., and Kim, H. (2018). Mixed valence perovskite $\text{Cs}_2\text{Au}_2\text{I}_6$: A potential material for thin-film pb-free photovoltaic cells with ultrahigh efficiency. *Advanced Materials*, 30(12), 1707001.
- Farias, W.C.M., Silva, N.P.S., and de Sá, R. V., M.L.F.P.G. (2020). Atlas do índice ultravioleta para o estado do rio de janeiro.
- Fathabadi, H. (2016). Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators. *Renewable Energy*, 95, 485–494.
- Genene, Z., Mammo, W., Wang, E., and Andersson, M.R. (2019). Recent advances in n-type polymers for all-polymer solar cells. *Advanced Materials*, 31(22), 1807275.
- inmet (2020). Bdmet - banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa.
- Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W., Panupintu, S., and Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100618.
- Kathushiko, O. (2011). Engenharia de controle moderno. 5ª edição. Editora LTC.
- Kim, K.H. and Cho, S.B. (2019). An efficient concentrative photovoltaic solar system with bayesian selection of optimal solar tracking algorithms. *Applied Soft Computing*, 83, 105618.
- Liu, L., Meng, X., and Liu, C. (2016). A review of maximum power point tracking methods of pv power system at uniform and partial shading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1500–1507.
- Rodriguez, D., Bernal, C., and Serrano, G. (2019). On-chip solar energy harvesting system using substrate diode pv cell and fractional open circuit voltage mppt implementation. In *2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, 181–184. IEEE.
- Safari, A. and Mekhilef, S. (2010). Simulation and hardware implementation of incremental conductance mppt with direct control method using cuk converter. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(4), 1154–1161.
- Seyedmahmoudian, M., Soon, T.K., Horan, B., Ghandhari, A., Mekhilef, S., and Stojcevski, A. (2019). New arm-based mppt technique to minimize tracking time and fluctuation at output of pv systems under rapidly changing shading conditions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Yao, H., Cui, Y., Qian, D., Ponseca, C.S., Honarfar, A., Xu, Y., Xin, J., Chen, Z., Hong, L., Gao, B., et al. (2019). 14.7% efficiency organic photovoltaic cells enabled by active materials with a large electrostatic potential difference. *Journal of the American Chemical Society*.