

Seguidor solar de dois eixos com sensor tronco piramidal aplicado a um sistema Off-Grid

Gabriel R. Francisco * Marcio A. F. Montezuma *
Alessandro N. Vargas *

* *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR,
Av. Alberto Carazzai 1640, 86300-000 Cornélio Procópio-PR, Brasil.
(e-mail: avargas@utfpr.edu.br)*

Abstract: This paper presents contributions for photovoltaic systems, especially for solar trackers. An innovative sensor with pyramidal trunk shape is introduced, for reading the direction of the direct component of the solar irradiance. Its function is to allow the integration of two control methods to generate energy savings in the rotation of the structure and reduce its mechanical wear. The objective is to develop and implement a complete biaxial solar tracker: mechatronic structure, embedded electronics, controller design, etc. A Buck converter is used, together with MPPT algorithms. A comparison of the energy production of the solar tracker in relation to a fixed system is presented. Experiments indicate that the follower provided an increase close to 32% in energy production, when compared to the corresponding fixed system.

Resumo: Este artigo apresenta contribuições para os sistemas fotovoltaicos, especialmente para os seguidores solares. É mostrado um sensor inovador com formato tronco piramidal, para a leitura da direção da componente direta da irradiância solar. Sua função é permitir a integração de dois métodos de controle para gerar uma economia de energia na rotação da estrutura e reduzir seu desgaste mecânico. O objetivo é desenvolver e implementar um seguidor solar biaxial completo: estrutura mecatrônica, eletrônica embarcada, projeto de controladores, etc. Emprega-se um conversor Buck, junto a algoritmos de MPPT. Apresenta-se uma comparação da produção energética do seguidor solar em relação a um sistema fixo. Experimentos indicam que o seguidor proporcionou um incremento próximo a 32% na produção energética, quando comparado ao sistema fixo correspondente.

Keywords: Solar tracker; Photovoltaic energy; Energy efficiency; Systems control; Hysteresis.

Palavras-chaves: Seguidor solar; Energia fotovoltaica; Eficiência energética; Controle de sistemas; Histerese.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisadores tem buscado maneiras de aprimorar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, relatando na literatura as duas principais formas para atingir tal objetivo. A primeira é aperfeiçoando os módulos fotovoltaicos, por meio da utilização de novas tecnologias, ou aprimorando os conversores estáticos empregados na conversão da potência produzida. A segunda consiste em melhorar a eficiência da captação da luz solar incidindo sob os painéis com uso dos sistemas denominados *seguidores solar* (e.g., AL-Rousan et al. (2018)). Seguindo este caminho, este trabalho apresenta uma contribuição para o aprimoramento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Um seguidor solar é um dispositivo mecatrônico que modifica continuamente a posição dos painéis fotovoltaicos, de modo a mantê-los perpendicular em relação a componente direta da irradiância solar, similar ao efeito girassol (e.g., Prinsloo and Dobson (2015)). A posição perpendicular possibilita a máxima produção de energia possível, con-

siderando um mesmo arranjo de painéis sob as mesmas condições climáticas Lee and Rahim (2013).

Para programar o movimento dos painéis, pesquisadores têm utilizado duas classes de algoritmos. A primeira classe é do tipo astronômico, ou seja, o algoritmo utiliza dados da localização geográfica para determinar o ângulo de azimute e altitude do sol, informações que serão utilizadas no algoritmo para o cálculo do movimento dos painéis (e.g., Zhan et al. (2013)). A segunda classe, representa os algoritmos que operam rastreando a angulação de máxima incidência de irradiação solar em tempo real, com auxílio de sensores de luminosidade acoplados a estrutura dos painéis (e.g., Mustafa et al. (2018)).

Ambos os algoritmos costumam apresentar ganhos semelhantes na produção energética, quando corretamente implementados. Porém o segundo tipo de algoritmo promove uma maior eficiência energética, em situações nas quais o mecanismo astronômico é incorretamente alinhado com os polos magnéticos. O mecanismo astronômico opera em malha aberta. O mecanismo seguidor solar em tempo real opera em malha fechada, proporcionando menores erros

* Agradecemos à CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

de regime permanente na orientação dos painéis Kabalci (2020).

Os seguidores solares mais simples são construídos sob um único eixo de rotação. Tais seguidores são úteis em países localizados sob baixa latitude, como é o caso do Brasil. Usualmente, este único eixo é alinhado ao longo do Meridiano Norte verdadeiro (e.g., Bahrami et al. (2016); Ísis Portolan dos Santos and Rüther (2014)).

Ao dotar o sistema seguidor solar com dois eixos de rotação (biaxial), nota-se as seguintes vantagens: (1) mobilidade e (2) ganho em eficiência. O sistema seguidor solar mostrado neste trabalho é biaxial, e opera em tempo real rastreamento a angulação da irradiação solar. O sistema seguidor solar foi construído sob uma estrutura móvel. Esta característica facilita o transporte da estrutura para locais remotos. Além disso, o equipamento realiza em tempo real o correto alinhamento do painel, de modo a extrair a máxima incidência solar.

Em relação ao ganho de eficiência proporcionado pelos seguidores solares com dois eixos de rotação, logo após o ano de 2006, tais sistemas começam a ganhar uma maior atenção, amparado pelos artigos Yazidi et al. (2006); Beltran A. et al. (2007) onde os autores obtêm incrementos significativos na produção energética da ordem de 26%. Por exemplo, em Sawant et al. (2018), o autor realiza uma comparação de um sistema de dois eixos com outro de um único eixo, e obtêm com o sistema biaxial um incremento de eficiência próximo a 25%, quando comparado ao sistema de apenas um eixo. Nota-se, portanto, o interesse crescente no estudo de sistemas seguidor solar biaxial e seus benefícios.

O objetivo deste trabalho é propor o desenvolvimento e implementação de um sistema seguidor solar biaxial. Este trabalho mostra o projeto completo e os detalhes da confecção da estrutura mecânica. O seguidor solar exige instrumentação, projeto dos controladores e processamento embarcado em microcontrolador. Serão apresentados dados experimentais da produção energética do seguidor solar, em relação a um sistema fixo (sem seguidor solar). Para extrair a potência dos módulos fotovoltaicos será empregado um conversor estático de potência, juntamente com um método para seu controle e técnicas de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). A técnica de MPPT, para extração eficiente da máxima potência dos painéis fotovoltaicos, é motivada pelos resultados promissores de Oliveira et al. (2015); de Brito et al. (2013). Por fim, será conectado ao sistema uma bateria para armazenar a energia produzida pelos painéis, constituindo-se um sistema do tipo *Off-Grid* (e.g., Aldosary et al. (2021)).

Este trabalho também apresenta uma contribuição para sensores. Os autores Mustafa et al. (2018) sugerem o uso de sensor em formato de pirâmide de base quadrada com quatro faces. Apresenta-se uma melhoria, para originar um novo sensor com formato de tronco de pirâmide de base quadrada, que contém 5 faces. Este sensor contendo cinco faces permite a integração de dois métodos de controle distintos, gerando benefícios ao sistema, conforme descritos adiante neste artigo.

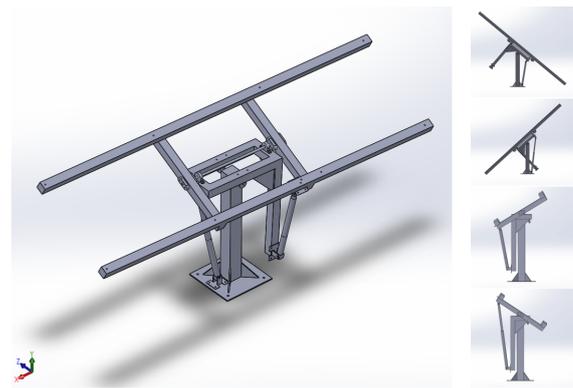


Figura 1. Estrutura biaxial projetada para o seguidor solar



Figura 2. Estrutura com os painéis fotovoltaicos montados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os materiais utilizados na construção da plataforma e os métodos de controle empregados.

2.1 Construção da estrutura biaxial

Foi utilizado o *software SolidWorks* para desenvolver o projeto mecânico da estrutura biaxial. A estrutura projetada é capaz de rotacionar dois painéis fotovoltaicos em até 45° para ambos os lados e sob ambos os eixos, ângulo medido em relação ao solo. Uma visão geral do projeto e as vistas laterais dos dois eixos rotacionados até seus ângulos limites são mostrados na Figura 1. A estrutura foi confeccionada com tubos de alumínio.

Para rotacionar seus dois eixos, foi empregado dois atuadores elétricos lineares pivotantes, compostos por motores de corrente contínua (CC), que trabalham com uma tensão nominal de 12 V. Ambos os atuadores possuem um curso de 200 mm, uma velocidade sem carga de 10 mm/s e aplicam forças de até 500 N. Na rotação dos painéis, ambos motores consumiram uma potência máxima de 2 W. Uma fonte externa foi utilizada para alimentar esses atuadores.

Foram utilizados dois painéis da empresa *KomaesSolar* de 50 watts cada, fixados lado-a-lado no topo da estrutura, conforme mostrado na imagem à esquerda da Figura 2. Na imagem à direita da Figura 2, é apresentada a fixação dos atuadores na estrutura.

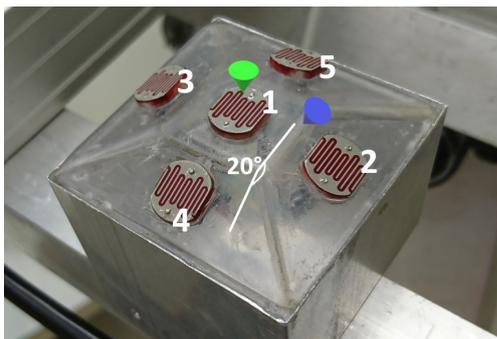


Figura 3. Sensor para leitura da angulação de máxima incidência de irradiação solar.

2.2 Sensor projetado para leitura da angulação de máxima incidência de irradiação solar

Os autores do artigo Mustafa et al. (2018) utilizam um sensor com formato de pirâmide de base quadrada, contendo quatro faces, no qual cada face contém um *Light Dependent Resistor* (LDR). Os autores aplicaram um controle clássico proporcional em cada eixo, implementado por meio de circuitos analógicos, que tem como entrada a diferença de luminosidade entre os LDRs dispostos em cada eixo.

O formato do sensor sugerido por Mustafa et al. (2018) motivou o sensor desenvolvido nesse trabalho. Ou seja, aqui acrescentou-se uma nova face: introduziu-se um LDR adicional na nova face localizada no topo do sensor. Portanto, o novo sensor conta com cinco faces, e cada face contém um LDR. O sensor já confeccionado é apresentado na Figura 3.

Nota-se que o formato do novo sensor é de um tronco de pirâmide de base quadrada, sendo o ângulo entre o topo e face lateral igual a 20° (o motivo para a escolha dessa angulação será detalhado na subseção 2.4). O projeto desse novo sensor possibilita um aprimoramento do controle empregado por Mustafa et al. (2018), da seguinte forma. Os autores do artigo Mustafa et al. (2018) utilizaram o controlador clássico proporcional. Aqui neste artigo, porém, foram aplicados dois métodos de controle distintos: controlador proporcional associado a uma lógica de histerese (os detalhes serão discutidos na subseção 2.4).

Não é de interesse que o erro angular lido pelo sensor seja afetado por variações na intensidade da irradiação solar. O objetivo aqui é somente realizar a leitura da direção do vetor de máxima incidência solar. Por exemplo, se no eixo X temos 800 W/m^2 incidindo a 8° , a saída do sensor deve apresentar a mesma leitura sob a situação em que temos 100 W/m^2 incidindo sob os mesmos 8° . A informação relevante aqui é a direção. Definiu-se, portanto, a diferença de intensidade luminosa entre os LDRs 3 e 2 dividida pela média dos LDRs de 1 a 5 representa o erro angular no eixo X. Já a diferença entre os LDRs 4 e 5, também normalizada pela média de todos os LDRs, representa o erro no eixo Y. Sob esta estratégia, o sistema de controle interpreta em qual direção o mecanismo deve se mover, ou seja, na direção do eixo X ou Y.

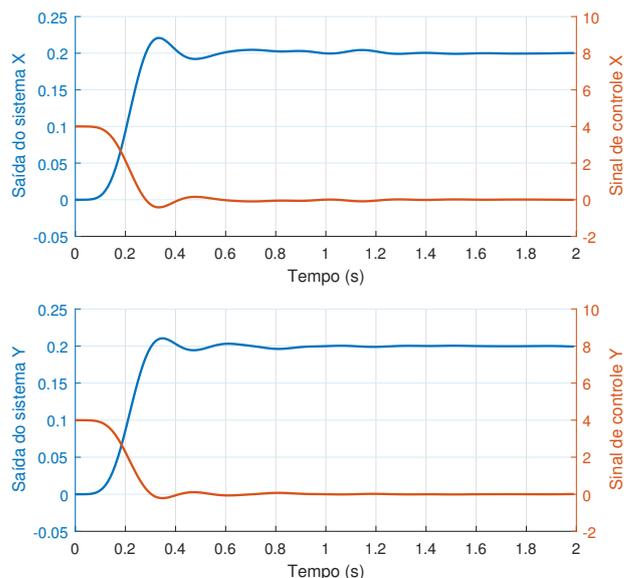


Figura 4. Saídas e sinais de controle dos eixos X e Y.

2.3 Identificação da função de transferência de cada eixo do seguidor solar

O sensor de incidência solar mostrado na Figura 3 foi fixado junto aos painéis solares, no topo da estrutura, em sua parte central. Assumiu-se que o sistema mecatrônico que movimenta os painéis obedece a um comportamento linear, e que ambos os eixos são independentes. É possível representar a dinâmica de um motor CC, com dimensões pequenas, por uma equação de primeira ordem somente, sendo a sua entrada a tensão e a saída a velocidade. Deseja-se que a saída da Função de Transferência (FT) seja a posição do atuador, por isso é necessário integrar a velocidade para se obter posição. A FT que descreve cada um dos dois eixos é dada por

$$G(s) = \frac{B}{s(s+A)}. \quad (1)$$

É possível identificar os parâmetros em (1) realizando o seguinte procedimento: multiplicando o sistema $G(s)$ por um ganho proporcional K_p e fechando sua malha, de tal modo que o ganho deve forçar uma reposta subamortecida no sistema. Aplicando um degrau com amplitude Deg , pode-se obter o pico máximo $MaxPico$ e o tempo de acomodação t_a . O fator de amortecimento ξ é facilmente obtido pelo percentual de overshoot $\%Over = \frac{MaxPico - 100}{Deg} - 100$ e a frequência natural do sistema é obtida via $\omega_n = 4(\xi t_a)^{-1}$. A função de transferência em malha fechada correspondente a $G(s)$ em (1) é

$$G(s)_{MF} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (2)$$

no qual $A = 2\xi\omega_n$ e $B = \omega_n^2/K_p$.

Utilizando como ponto de partida o sistema alinhado com a angulação de máxima irradiação solar, aplicou-se individualmente nos eixos X e Y um degrau de amplitude Deg igual a 0,2, considerando $K_p = 20$. As saídas e sinais de controle dos eixos X e Y são mostradas na Figura 4. Para o eixo X obteve-se um $MaxPico = 0,221$ e $t_a = 1,2 \text{ s}$,

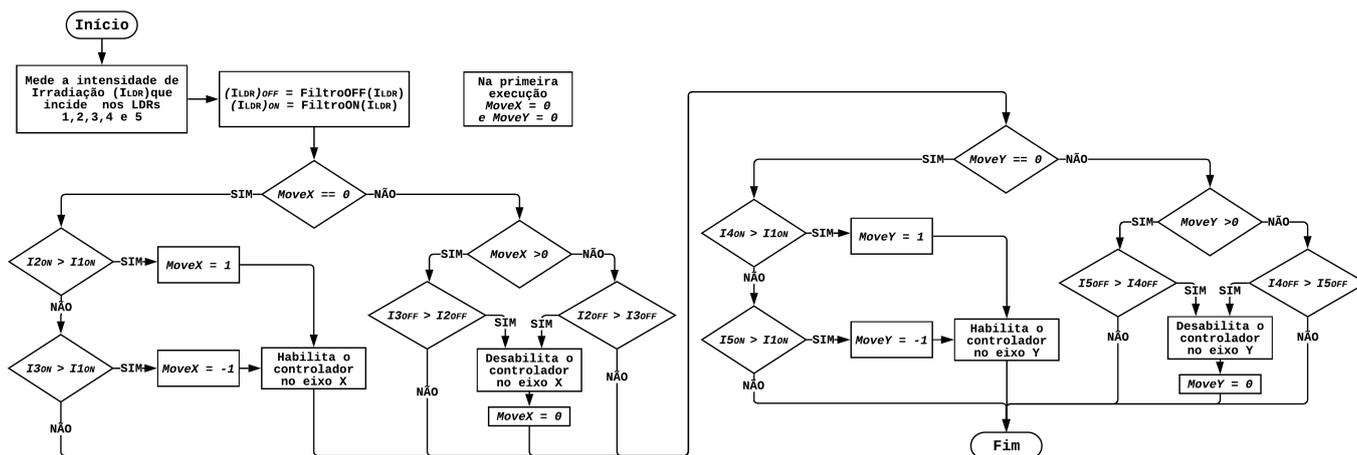


Figura 5. Fluxograma da operação da lógica por histerese.

já para o eixo Y obteve-se um $MaxPico = 0,21$ e $t_a = 0,9$ s, resultando nas equações:

$$G_X(s) = \frac{1,635}{s(s + 6,667)}, \quad G_Y(s) = \frac{2,074}{s(s + 8,889)}. \quad (3)$$

2.4 Lógica por histerese

Empregou-se uma lógica por histerese, com intuito de se reduzir o consumo de energia na movimentação dos painéis solares no decorrer do dia, e também diminuir o desgaste mecânico da estrutura a longo prazo. A ideia é associar a lógica por histerese ao controlador proporcional clássico. A lógica por histerese tem a tarefa de habilitar e desabilitar o controlador clássico, conforme discutido a seguir. A literatura demonstra que folgas nos atuadores, nas engrenagens e nos mancais podem gerar sinais de pequena amplitude e alta frequência, quando o mecanismo correspondente é operado por controle linear (e.g., Ghaffari and Mohammadiasl (2013); Kumar et al. (2009)). A lógica de histerese associada ao controle linear tem como objetivo suprimir tais oscilações.

Adotou-se nesse trabalho uma histerese de 10° , que foi definido como a metade do ângulo entre o topo e a face lateral do sensor mostrado na Figura 3. Isso significa que, ao ligar o equipamento, o mecanismo pode realizar no máximo 9 acionamentos liga-desliga ao longo do dia, porque a estrutura tem leque de rotação igual a 90° (45° para cada lado). A perda de potência teórica para essa angulação é de no máximo 1,5%; este valor foi calculado por meio da decomposição vetorial da irradiação solar quando incide a 10° nos painéis, sendo sua resultante igual a $\cos(10^\circ) = 0,985$.

Para exemplificar o funcionamento da lógica por histerese, vamos considerar a seguinte situação: o sistema é iniciado e apresenta um erro de 6° no eixo X no sentido horário. No decorrer do dia esse erro vai crescendo até atingir 10° , situação na qual a luminosidade lida pelo LDR 2 é maior que a do LDR 1 (ilustrada pela seta azul na Figura 3). Habilita-se então o controlador do eixo X, que movimenta a estrutura no sentido horário, até que o erro do eixo X atinja um valor próximo a zero.

Quando o erro atinge um valor ligeiramente negativo, a luminosidade lida pelo LDR 3 será maior que a do LDR

2 (situação ilustrada pela seta verde na Figura 3). Neste caso, desabilita-se imediatamente o controlador do eixo X, cessando toda a movimentação desse eixo. Note que esse eixo será habilitado novamente somente quando existir um erro superior a 10° . Este exemplo ilustra a atuação da lógica por histerese no eixo X e em um único sentido. Situação análoga ocorre no sentido anti-horário e também no eixo Y, em ambos os sentidos de rotação, operando de acordo com o diagrama mostrado na Figura 5.

Cabe ressaltar que o controle por lógica de histerese funciona primeiro para o eixo X. Somente após concluído o controle para o eixo X, o equipamento habilita a lógica para o eixo Y. Ou seja, quando o equipamento entra em operação, somente o movimento do eixo X é habilitado até atingir-se erro próximo a zero. E quando tal erro é atingido, o equipamento cessa o movimento do eixo X e inicia movimento do eixo Y. Na prática, o equipamento leva alguns segundos atuando sobre o eixo X, e logo na sequência leva alguns atuando sobre o eixo Y.

Implementou-se filtros digitais Chebyshev de segunda ordem nas medições da irradiação feita nos LDRs para reduzir ruído do sinal proveniente da leitura dos sensores. Nos comparadores que habilitam o controlador, utilizou-se uma frequência de corte de 0,1 Hz (denominado de Filtro ON). Já nos comparadores que desabilitam o controlador, utilizou-se uma frequência de corte de 10 Hz (denominado de Filtro OFF). Ambos foram projetados e implementados seguindo a metodologia mostrada em Oppenheim (2013).

2.5 Modelagem do conversor Buck acoplado ao painel fotovoltaico

Neste trabalho optou-se por utilizar um conversor Buck do tipo síncrono, pois o mesmo possui uma corrente de saída sempre contínua Erickson and Maksimovic (2001). O conversor Buck é ideal para realizar o carregamento de uma bateria chumbo-ácido, por exemplo, comumente utilizada em sistemas do tipo *Off-Grid*.

Considere o conversor Buck síncrono, mostrado na Figura 6. Na sua entrada está conectado os painéis fotovoltaicos, representados pela resistência R_{pv} , conforme sugerido por Femia et al. (2009). O arranjo de painéis pode ser interpretado como uma fonte de potência, fornecendo uma tensão

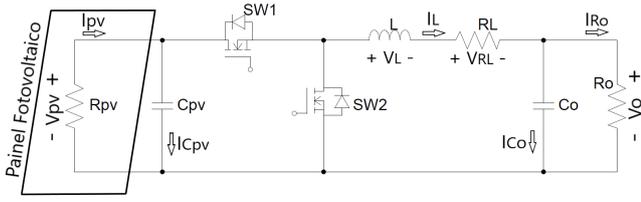


Figura 6. Conversor Buck síncrono com painel fotovoltaico acoplado em sua entrada.

\widehat{V}_{pv} e uma corrente I_{pv} para o conversor. Na saída do conversor foi conectada uma resistência R_o . A razão cíclica d representa a parcela do período de chaveamento T_S em que $SW1$ está em condução. Realizou-se o equacionamento da tensão do indutor, das correntes dos dois capacitores e aplicou-se a modelagem CA para pequenos sinais, onde as variáveis são substituídas por seu valor médio (\bar{x}) somado a uma parcela CA (\hat{x}). Os termos resultantes CC (Ex: \bar{xy}) que representam a resposta em regime permanente se anulam e assumiu-se que os termos CA de 2ª ordem (Ex: $\hat{x}\hat{y}$) são pequenos, quando comparados aos de 1ª ordem (Ex: $\bar{x}\hat{y}$), a ponto de poderem ser desprezados Erickson and Maksimovic (2001). Esta estratégia resulta nas equações abaixo:

$$L \frac{d(\widehat{I}_L)}{dt} = \widehat{V}_{pv} \widehat{d} + \widehat{V}_{pv} \bar{d} - R_L \widehat{I}_L - \widehat{V}_o \quad (4)$$

$$C_{pv} \frac{d(\widehat{V}_{pv})}{dt} = -\frac{\widehat{V}_{pv}}{R_{pv}} - \widehat{I}_L \widehat{d} - \widehat{I}_L \bar{d} \quad (5)$$

$$C_o \frac{d(\widehat{V}_o)}{dt} = \widehat{I}_L - \frac{\widehat{V}_o}{R_o} \quad (6)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (4)–(6), e manipulando o termo \widehat{V}_{pv} em relação a \widehat{d} , obtemos a função de transferência

$$G_{vd}(s) = \frac{\widehat{V}_{pv}}{\widehat{d}} = -\frac{\frac{\bar{I}_L}{C_{pv}} s^2 + N_1 s + N_0}{s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0}, \quad (7)$$

no qual as constantes N_0, N_1, D_0, D_1, D_2 são dadas por

$$N_1 = \frac{R_L \bar{I}_L + d \bar{V}_{pv}}{LC_{pv}} + \frac{\bar{I}_L}{R_o C_o C_{pv}},$$

$$D_2 = \frac{R_L}{L} + \frac{1}{R_{pv} C_{pv}} + \frac{1}{R_o C_o},$$

$$N_0 = \frac{\bar{I}_L}{C_o LC_{pv}} + \frac{R_L \bar{I}_L + d \bar{V}_{pv}}{R_o C_o LC_{pv}},$$

$$D_0 = \frac{R_{pv} \bar{d}^2 + R_L + R_o}{R_o C_o L R_{pv} C_{pv}},$$

$$D_1 = \frac{\bar{d}^2}{C_{pv} L} + \frac{R_L}{R_{pv} C_{pv} L} + \frac{R_L}{R_o C_o L} + \frac{1}{C_o L} + \frac{1}{R_o C_o R_{pv} C_{pv}}.$$

2.6 Algoritmo para rastreamento do ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos alimentando uma bateria

O algoritmo utilizado para realizar o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) foi o Perturbe e Observe (P&O). O P&O convencional é funcional em situações onde não

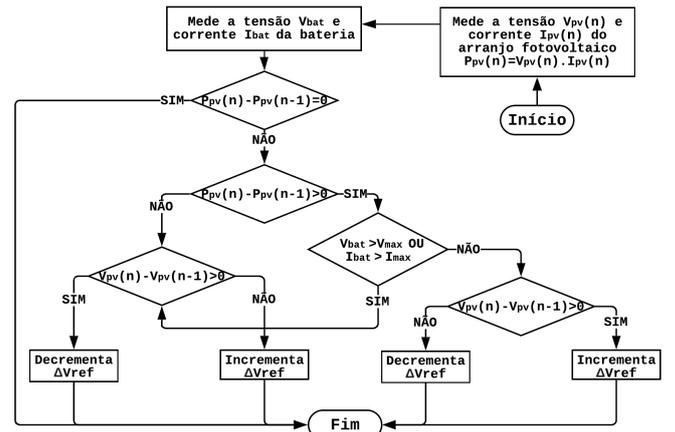


Figura 7. Fluxograma do algoritmo P&O com limitador para carregamento de bateria.

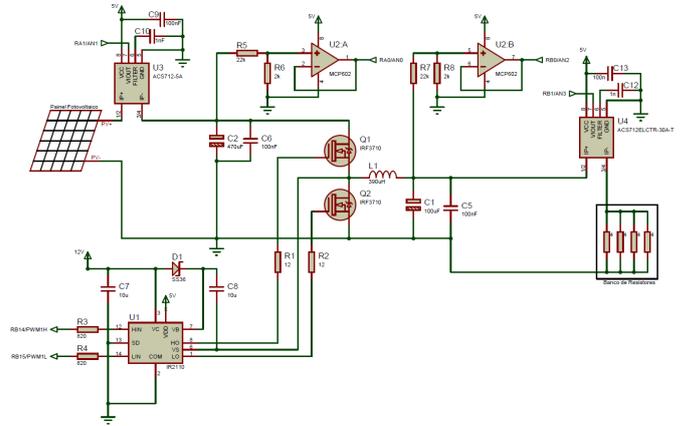


Figura 8. Esquemático Buck síncrono com PV na entrada.

ocorre sombreamento parcial dos painéis. Quando ocorre sombreamento, há outras técnicas de MPPT conforme discutido em Oliveira et al. (2015). Portanto, durante a realização dos experimentos é fundamental garantir que os painéis sejam posicionados sempre em uma área aberta, de modo a não ocorrer sombreamento por qualquer estrutura urbana (Ex: paredes, muros etc) Fernández-Ahumada et al. (2020).

Em sistemas do tipo *Off-Grid* a bateria é um fator limitante da potência produzida pelos painéis fotovoltaicos, pois para se preservar a vida útil da mesma deve-se respeitar sua corrente máxima de carga I_{max} (na etapa de corrente constante) e sua tensão máxima V_{max} de carga (na etapa tensão constante) Serhan and Ahmed (2018). Em nossa aplicação, modificou-se o algoritmo padrão do P&O, acrescentando a ele uma etapa adicional, que limita a sua potência, com o intuito de realizar o carregamento da bateria, conforme o fluxograma da Figura 7.

2.7 Instrumentação eletrônica, microcontrolador e circuitos de potência: placa de circuito impresso.

Para embarcar todos os controles e algoritmos optou-se por um microcontrolador da Microchip modelo dsPIC33EV256GM104. O seu ADC foi configurado para uma frequência amostral de 514,7 kpsps e precisão de 12 bits. Para acionamento do conversor Buck síncrono configurou-

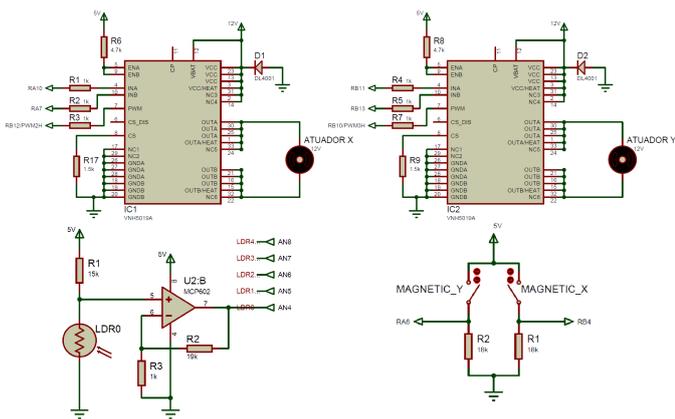


Figura 9. Esquemático das pontes H, aquisição dos LDRs.

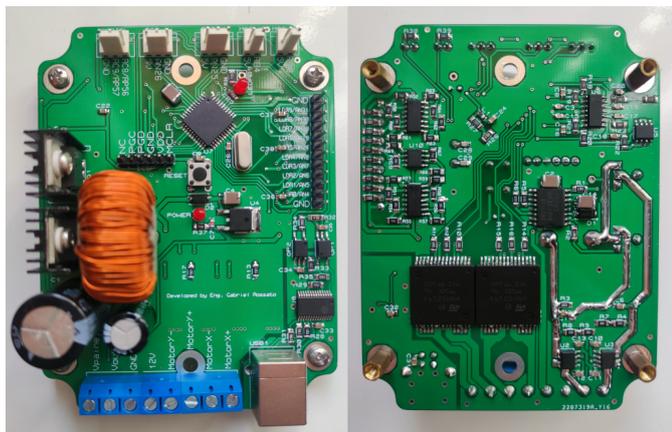


Figura 10. Placa de circuito impresso final.

se o PWM1 a uma frequência de 100 kHz, já para acionamento dos drivers dos atuadores dos eixos X e Y, foram utilizados os PWM2 e PWM3 operando a 2,14 kHz. O TIMER1 gera uma interrupção periódica de 10 kHz, nela executa-se o controlador proporcional da tensão dos painéis fotovoltaicos e os filtros IIR, já o TIMER2 opera a 500 Hz e executa o controlador responsável por rastrear a angulação de máxima incidência solar e o método de MPPT. Para comunicar o dsPIC com o MATLAB, utilizou-se a comunicação UART com um *BaudRate* 921,6 Kbps.

No conversor Buck síncrono optou-se por MOSFETs canal N modelo IRF3710, para seu acionamento utilizou-se um driver modelo IR2110. Para leitura das tensões utiliza-se um atenuador resistivo, seguido de um *Buffer* e para leitura das correntes aplicou-se um sensores do tipo *Hall*. O circuito completo pode ser visto na Figura 8. Para realizar a leitura dos cinco LDRs, montou-se um divisor resistivo com cada um deles, e a tensão do divisor foi amplificada com ganho $G = 20$. O intervalo de leitura dos LDRs pode variar de 0Ω a 780Ω . Para acionamento dos atuadores, utilizou-se duas pontes H automotiva modelo VNH5019. Todos os diagramas esquemáticos estão ilustrados na Figura 9. A Figura 10 mostra a placa de circuito já fabricada e com todos seus componentes montados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos, juntamente com uma discussão e análise dos mesmos.

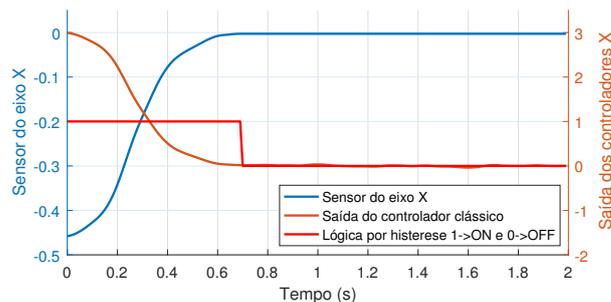


Figura 11. Resposta no eixo X para perturbação.

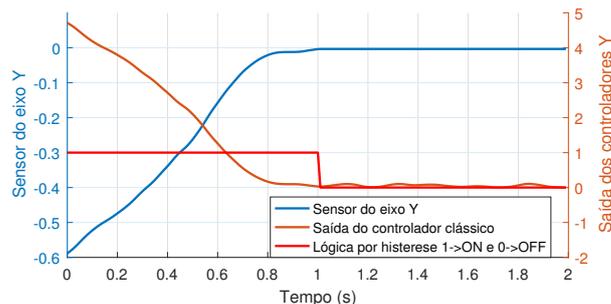


Figura 12. Resposta no eixo Y para perturbação.

3.1 Projeto do controlador proporcional para o seguidor solar

Relembre as funções de transferência de cada um dos dois eixos apresentadas em (3). Note que o sistema é do tipo 1, ou seja, um simples controle proporcional gera erro nulo no regime permanente para uma entrada do tipo degrau. Tem-se como objetivo uma resposta superamortecida em malha fechada (sem a presença de *overshoot*). O tempo de acomodação t_a do sistema é ditado pela posição ρ do polo mais próximo da origem, conforme a relação $t_a = \frac{4}{\rho}$. Assim é possível ajustar o ganho proporcional Kp pela posição do polo dominante, via método do lugar das raízes.

Deseja-se que o sistema tenha um $t_a = 1,5$ s, para isso o polo dominante deve estar posicionado no eixo real em $\rho = -2,67$. Por meio do Root Locus das funções de transferência obtém-se o ganho proporcional: para o eixo X, $Kp_X = 6,53$, e para o eixo Y, $Kp_Y = 8$.

3.2 Experimento: controladores atuando no seguidor solar

A seguir é mostrado os resultados dos experimentos para o controlador proporcional projetado na Seção 3.1, que opera associada com a lógica de histerese, mostrada na Seção 2.4. O controlador proporcional com histerese foi implementado no hardware projetado. Perturbou-se o equipamento, e para cada um dos eixos, os dados experimentais foram adquiridos (coletou-se a leitura dos sensores de angulação, a saída do controlador clássico proporcional e da lógica de histerese), veja as Figuras 11 e 12.

Observa-se que o controle obteve êxito em alcançar a referência nula em ambos os eixos, mostrando que o arranjo de painéis fotovoltaicos foi alinhado com a direção da máxima incidência de irradiação solar. É possível observar também a lógica de histerese em ação: quando a posição do eixo

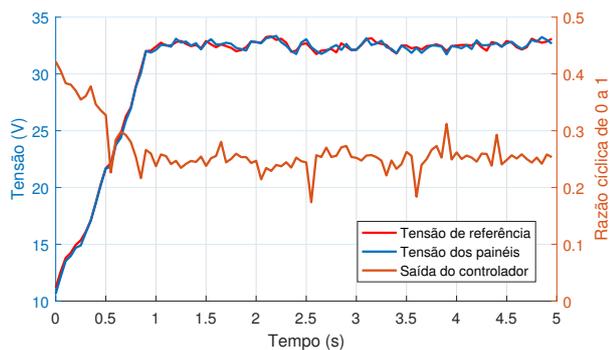


Figura 13. Controle PI operando na da tensão do painéis V_{pv} .

alcançou erro próximo a zero (valor ligeiramente negativo), então a lógica desabilitou o controlador clássico, conforme projetado.

A plataforma seguidora solar em funcionamento é mostrada em detalhes no vídeo, por meio do link: <https://youtu.be/ezxvYEWxvUM>

3.3 Buck síncrono: teste com método de MPPT

Os dois painéis da KomaesSolar de 50 W foram associados em série, resultando em $\bar{V}_{pv} = 2V_{mpp} = 35,48$ V e $\bar{I}_{pv} = I_{mpp} = 2,84$ A. Foram adotadas as seguintes capacitâncias e a indutância do Buck operando a $f_s = 100$ kHz: $L = 390\mu H$, $C_o = 100\mu F$, $C_{pv} = 470\mu F$, a resistência do indutor $R_L = 0,1 \Omega$ e utilizou-se uma carga de saída $R_o = 1 \Omega$. Considerando um conversor Buck Ideal aplicou-se as correlações dos valores médios associados a $G_{vd}(s)$: $\bar{V}_o = \sqrt{R_o \bar{V}_{pv} \bar{I}_{pv}} = 10,04V$, $\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_{pv} \bar{I}_{pv}}{\bar{V}_o} = 10,04A$, $\bar{d} = \frac{\bar{V}_o}{\bar{V}_{pv}} = 0,283$ e $R_{pv} = \frac{\bar{V}_{pv}}{\bar{I}_{pv}} = 12,49\Omega$.

Para o projeto do controlador PI do conversor Buck, utilizou-se a função de transferência mostrada em (7), desconsiderando seu sinal negativo. Deseja-se que o sistema em malha aberta tenha uma margem de fase igual 75° , e uma frequência de cruzamento com o ganho 0db igual a 500 Hz. Baseado no método de projeto desenvolvido por Angélico et al. (2014), calculou-se os ganhos para o controlador, $K_i = 9,8012$ e $K_p = 0,0893$. Na Figura 13 é mostrado em funcionamento no sistema real o controle PI, com o método de MPPT P&O comandando a tensão de referência, foi adotado um $\Delta V_{ref} = 0,05$ V e a uma frequência de atualização igual a 500 Hz.

3.4 Experimentos: sistema OffGrid carregando uma bateria

Aplicou-se o equipamento para carregar uma bateria de chumbo-ácido de 6 células e com capacidade de 6 Ah. Foi utilizado o algoritmo P&O modificado, com a etapa que limita a potência dos painéis fotovoltaicos, conforme o fluxograma da Figura 7. Inicialmente a bateria estava semicarregada, contendo uma tensão de 12,0V. Adotou-se um saturador para a corrente de carregamento $I_{max} = 3A$ e para tensão $V_{max} = 14,5V$. A Figura 14 apresenta os dados experimentais da tensão e corrente da bateria durante o experimento. Pode-se observar que foi possível

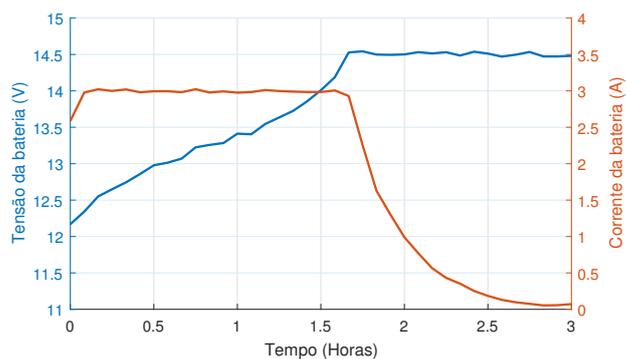


Figura 14. Teste de carga bateria de chumbo-ácido.

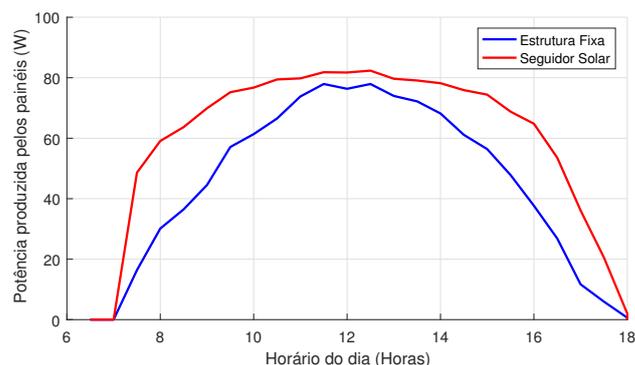


Figura 15. Potência produzida pelos painéis da estrutura fixa comparada com a seguidora.

carregar a bateria corretamente, fato que corrobora a eficácia do algoritmo apresentado.

3.5 Experimento para a potência produzida: comparação entre o seguidor solar e estrutura fixa

Realizou-se um ensaio na cidade de Cornélio Procópio/PR ($23^\circ 10' 50''S$ $50^\circ 39' 20''W$) no dia 22 de agosto de 2021, com início às 6:30 AM e término às 6:00 PM. Os dados experimentais foram coletados a cada 30 minutos. Utilizou-se uma carga resistiva constante $R_o = 1 \Omega$ (100 watts) na saída do conversor, com intuito de não limitar a potência produzida pelos painéis no decorrer desse teste. O algoritmo de MPPT utilizado foi o P&O convencional.

A metodologia aplicada foi a seguinte: primeiramente realizou-se o teste com estrutura fixa e imediatamente após habilitou-se o seguidor solar. Para a estrutura fixa, os painéis foram orientados na angulação ótima. Esta angulação ótima está relacionada aos dados geodésicos do local, onde o experimento foi realizado: painel fixado em ângulo de 20° e alinhado ao Norte magnético do planeta (aferido através de bússola manual). Já para o sistema seguidor solar, comandou-se o rastreamento da angulação de máxima incidência de irradiação solar, utilizando o controlador proporcional associado a lógica por histerese. O resultado comparativo da potência produzida pelos painéis para ambos os testes é mostrado na Figura 15. Após computar a área sob as curvas mostradas na Figura 15, constatou-se que estrutura fixa produziu **540,50 Wh** ao longo do dia, enquanto o seguidor solar produziu **715,73 Wh**. Em outras palavras, o sistema seguidor solar obteve um incremento

de **32,42 %** na energia produzida, quando comparado a estrutura fixa. Esta evidência experimental encontra suporte na literatura, pois os sistemas seguidores solar biaxiais utilizados por outros autores, foram capazes de prover incrementos de 25% em Lee and Rahim (2013)(Malásia) e 35% em Mustafa et al. (2018)(Bagdá/Iraque).

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o projeto e a construção de um sistema seguidor solar de dois eixos, que tem como função rotacionar dois painéis fotovoltaicos, de modo a mantê-los perpendicular com relação a incidência de luz solar. Tal estratégia visa promover um incremento na produção de energia elétrica. O projeto envolve conceitos de instrumentação, controladores, sistemas microcontrolados e conversor estático de potência, associado a métodos de MPPT.

A estrutura mecatrônica se comportou conforme o esperado. Os atuadores projetados foram suficientes para realizar a rotação dos painéis. O sensor proposto com formato de tronco de pirâmide de base quadrada se mostrou eficaz para esse tipo de aplicação. Todos os circuitos eletrônicos projetados e implementados apresentaram um correto funcionamento. De maneira geral, podemos afirmar que o sistema atendeu todos os objetivos propostos.

Dados experimentais corroboram que a estrutura seguidora solar obteve um incremento significativo na energia produzida, de aproximadamente 32%, quando comparado com uma estrutura fixa. Para trabalhos futuros, sugere-se realizar mais testes com o seguidor solar para melhor análise estatística. O sistema poderia se beneficiar também da utilização de outros tipos de sensores para leitura da luminosidade.

REFERÊNCIAS

- AL-Rousan, N., Isa, N.A.M., and Desa, M.K.M. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2548–2569.
- Aldosary, A., Ali, Z.M., and M., M. (2021). A modified shuffled frog algorithm to improve MPPT controller in PV system with storage batteries under variable atmospheric conditions. *Control Engineering Practice*.
- Angélico, B.A., Campanhol, L.B.G., and Oliveira da Silva, S.A. (2014). Proportional-integral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using bode diagram. *IET Power Electronics*, 2647–2659.
- Bahrami, A., Okoye, C.O., and Atikol, U. (2016). The effect of latitude on the performance of different solar trackers in europe and africa. *Applied Energy*, 896–906.
- Beltran A., J., Gonzalez Rubio S., J.L., and Garcia-Beltran, C.D. (2007). Design, manufacturing and performance test of a solar tracker made by a embedded control. In *CERMA 2007*, 129–134.
- de Brito, M.A.G., Galotto, L., Sampaio, L.P., d. A. e Melo, G., and Canesin, C.A. (2013). Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE Trans. Ind. Electr.*, 1156–1167.
- Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Springer, The Salmon Tower Building, Nova Iorque, Nova York, EUA, 2ed edition.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., and Vitelli, M. (2009). A technique for improving PO MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Trans. Ind. Electr.*, 56(11), 4473–4482.
- Fernández-Ahumada, L., Ramírez-Faz, J., López-Luque, R., Varo-Martínez, M., Moreno-García, I., and Casares de la Torre, F. (2020). A novel backtracking approach for two-axis solar pv tracking plants. *Renewable Energy*, 1214–1221.
- Ghaffari, A. and Mohammadiasl, E. (2013). Calculating the frequency of oscillation for servo axes distressed by clearance or preloading. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 922–931.
- Kabalci, E. (2020). Design and implementation of control algorithms for single-axis sun tracking systems. *Journal of Power Technologies*, 32–42.
- Kumar, G., Tiwari, P.Y., Marcopoli, V., and Kothare, M.V. (2009). A study of a gun-turret assembly in an armored tank using model predictive control. In *2009 American Control Conference*, 4848–4853.
- Lee, J.F. and Rahim, N.A. (2013). Performance comparison of dual-axis solar tracker vs static solar system in malaysia. In *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, 102–107.
- Mustafa, F.I., Shakir, S., Mustafa, F.F., and Naiyf, A.T. (2018). Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for baghdad city. In *2018 9th IREC*, 1–5.
- Oliveira, F.M., da Silva, S.A.O., Durand, F.R., and Sampaio, L.P. (2015). Application of pso method for maximum power point extraction in photovoltaic systems under partial shading conditions. In *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference*.
- Oppenheim, A.V. (2013). *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. Pearson Universidades, Campinas, São Paulo, BR, 3ed edition.
- Prinsloo, G. and Dobson, R. (2015). *Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position*. doi:10.13140/2.1.2748.3201.
- Sawant, A., Bondre, D., Joshi, A., and P. (2018). Design and analysis of automated dual axis solar tracker based on light sensors. In *2018 2nd International Conference on I-SMAC*, 454–459.
- Serhan, H.A. and Ahmed, E.M. (2018). Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review. In *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, 421–426. doi: 10.1109/ITCE.2018.8316661.
- Ísis Portolan dos Santos and Rütther, R. (2014). Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in brazil. *Renewable Energy*, 116–124.
- Yazidi, A., Betin, F., Notton, G., and Capolino, G.A. (2006). Low cost two-axis solar tracker with high precision positioning. In *2006 First International Symposium on Environment Identities*, 211–216.
- Zhan, T., Lin, W., Tsai, M., and Wang, G. (2013). Design and implementation of the dual-axis solar tracking system. In *2013 IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference*, 276–277.