

Protótipo de Rastreador Solar de Eixo Duplo

Rodrigues da Silva M.B. Lorena* Jeronimo dos Santos Marcos P.*
De Sousa S. Thalyta* Beltrán A. Reinel*

* *Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, PE, (e-mail: lore.mbr28@gmail.com, marcos.bwr@gmail.com, thalyta.souusa@gmail.com, reinel.beltran@ufrpe.br).*

Abstract: This article presents the design and practical implementation of a dual-axis solar tracker using low-cost components and recyclable materials. The prototype has an open and circular structure, offering a natural cooling. The tilting of the photovoltaic panel is performed using two servomotors to obtain highest intensity of sunlight captured by 4 LDR sensors, placed to the left of the panel and separated by two opaque barriers, generating the shadow caused by the sun movement. For the system supervision and control, a Scada was developed using the ScadaBR. The prototype was tested and results compared, considering a system with fixed panel, one and dual-axis tracker. Results showed that the dual-axis tracker system proved to be more efficient, considering a generated voltage, around a 12,45% compared to the single-axis tracker.

Resumo: Este artigo apresenta o projeto e a implementação prática de um rastreador solar de eixo duplo ativo para rastrear o movimento do sol usando componentes de baixo custo e recicláveis. O protótipo possui uma estrutura circular e aberta, possibilitando um arrefecimento natural. A inclinação do painel fotovoltaico é realizada usando dois servomotores para obter a maior intensidade de luz solar captada por quatro sensores LDRs, colocados à esquerda do painel fotovoltaico e separados por duas barreiras opacas responsáveis por gerar a sombra decorrente do movimento do sol. Para a supervisão e o controle do sistema, foi desenvolvido um Scada usando o ScadaBR. O protótipo foi testado e resultados comparados entre um sistema de painel fixo, rastreador de eixo único e de eixo duplo, ao considerar a tensão gerada pelo painel. Resultados mostraram que o sistema rastreador de eixo duplo mostrou ser mais eficiente, considerando a tensão gerada, ao redor de um 12,45% se comparado ao de eixo único.

Keywords: Control; Photovoltaic generation; LDR sensor; Solar tracker; Renewable Energy; Arduino.

Palavras-chaves: Controle; Geração fotovoltaica; Sensor LDR; Rastreador solar; Energia renovável; Arduino.

1. INTRODUÇÃO

O abastecimento gradativo da energia elétrica a nível mundial é uma realidade atual, visto que, a sociedade contemporânea possui a energia elétrica como uma demanda indispensável para o seu progresso. Por outro lado, distúrbios ambientais têm sido acentuados pelo uso de fontes não renováveis na geração de energia elétrica. Portanto, é relevante atentar-se ao uso de tais fontes, as quais são bastante danosas ao meio ambiente, e optar pelo uso de fontes de energia limpa.

Neste sentido, a energia solar fotovoltaica é considerada uma possibilidade dentre os variados tipos de energia limpa, sendo uma das mais utilizadas a nível mundial. No Brasil, e especificamente no Nordeste, devido a sua tropicalidade e luz solar em afluência durante quase todo o ano, faz uma região de elevada disponibilidade e regularidade de irradiação solar e, conseqüentemente, de conversão em energia fotovoltaica (Almeida and Almeida, 2022). Dentre as vantagens dos sistemas fotovoltaicos estão

sua fácil instalação e manutenção, não são poluentes, além de ser livres de ruído e sustentáveis. No entanto, sua baixa eficiência e alto custo podem ser citadas como suas principais desvantagens, as quais tem sido foco dos principais fabricantes e pesquisadores na busca de soluções para sua mitigação.

Uma das soluções é aumentar a captação de radiação solar pelos painéis fotovoltaicos. Um painel colocado em um ângulo fixo ou mesmo numa posição errada, pode chegar a ter uma grande perda de energia (10%-100%) devido à mudança do ângulo do sol em relação ao painel fotovoltaico, pois a energia coletada depende da posição do painel fotovoltaico em relação ao sol (Campos et al., 2021). Assim, para um maior proveito da energia solar no processo de conversão, é fundamental que os raios solares incidam de forma perpendicularmente à superfície do painel, o que não é possível empregando uma instalação fixa.

Neste contexto, para manter o painel fotovoltaico perpendicular à radiação solar incidente, os sistemas de rastre-

amento solar são os melhores dispositivos, maximizando a energia coletada pelo painel fotovoltaico. Desta forma, a potência máxima pode ser extraída do painel quando seu ângulo de inclinação é sincronizado com as mudanças diárias e sazonais dos movimentos do sol. Contudo, os rastreadores solares ainda são pouco usados, mesmo aumentando a eficiência na geração de energia, geralmente entre 10% a 50%. Isto se deve ao seu custo elevado de implantação e à necessidade de manutenção se comparados aos de instalação fixa, o que faz necessário um compromisso entre eficiência e custo para que os sistemas de rastreamento solar se tornem competitivos.

Na atualidade existe uma ampla diversidade de trabalhos comparando a eficiência e uso de rastreadores solares. Por exemplo em Frosi et al. (2018) se realiza uma análise comparativa de produção de energia de dois módulos de 250 Wp idênticos em um sistema fixo e um seguidor solar de eixo duplo instalados na cidade de Farroupilha, Rio grande do Sul, Brasil, onde foi observado um ganho da geração do seguidor da ordem de 36%. Já em Silva et al. (2019) se realiza um estudo considerando diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos em sistemas com e sem o uso de seguidores solares. O estudo modelou cada tipo de sistema fotovoltaico no *software* PVsyst, simulando a geração no período de um ano em uma instalação para Sergipe, situado na Região Nordeste. Considerando o equilíbrio dos custos para implementação do sistema e da economia gerada ao longo dos meses, um melhor retorno financeiro foi obtido usando um sistema de eixo único e utilizando módulos policristalinos. Por outro lado, em Melo et al. (2020) se descreve o protótipo de um sistema de supervisão e controle para orientar um painel solar de bancada. Resultados de simulações demonstraram um aumento de eficiência máxima de até 37% para declinação da cidade do Rio de Janeiro.

Torna-se evidente que o problema da escolha de um tipo específico de módulo e de rastreador solar vai depender de vários fatores. Assim, neste artigo, é proposto um protótipo de rastreador solar de eixo duplo ativo e de baixo custo. O sistema tem como princípio seguir uma fonte de luz orientando o painel fotovoltaico, através de dois servomotores, de forma a que o painel seja perpendicular na direção dos raios de luz. Os motores são controlados com base na incidência solar medida por quatro sensores LDRs (*Light Dependent Resistor*). Para minimizar o custo do sistema, o controlador é implementado em uma placa de baixo custo, Arduino Uno. A aquisição de dados de energia dos painéis fotovoltaicos é feita em tempo real usando um SCADA tomando como base o *software* ScadaBR e o Arduino, de forma a garantir a precisão das medições. Finalmente, a eficiência do protótipo será comparada considerando o sistema com painel fixo.

2. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Os sistema de rastreamento solar poder ser classificados por seus graus de rotação em duas categorias principais (Verma et al., 2020):

- Rastreador solar de eixo único
- Rastreador solar de eixo duplo

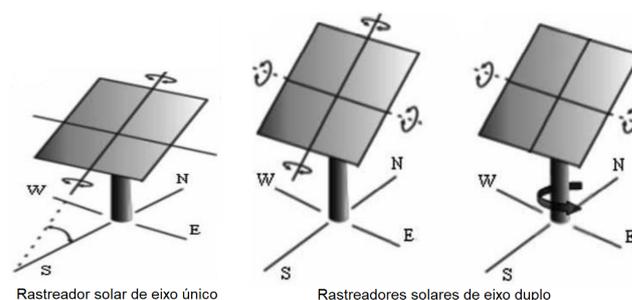


Figura 1. Classificação dos rastreadores solares.

Rastreador solar de eixo único: Um rastreador solar de eixo único continua a seguir o movimento do sol na horizontal ou na vertical, tendo apenas um eixo para movimento rotativo. A variedade horizontal de rastreador solar é utilizada em regiões tropicais onde o sol receberá muito subindo ao meio-dia, exceto que os dias serão curtos. Em por outro lado, o tipo vertical de rastreador solar é empregado em regiões com elevações onde o sol não precisa chegar alta, mas os dias de verão costumam ser longos (ver Figura 1).

Rastreador solar de eixo duplo: Um rastreador solar de eixo duplo tem dois graus de rotação, podendo rastrear o sol horizontalmente e verticalmente. Este tipo de rastreador pode ser empregado em qualquer lugar do mundo, além de garantir a máxima eficiência em exercendo energia solar. O desenho do sistema de rastreamento de eixo duplo é complexo em comparação com rastreamento e operação de eixo único ou mesmo fixo. No entanto, para a produção de energia solar em grande escala, o rastreamento de eixo duplo é mais factível (ver Figura 1).

Mais ainda, os métodos de rastreamento solar podem ser classificados como (Verma et al., 2020):

- Rastreamento passivo
- Rastreamento ativo
- Rastreamento cronológico

Rastreamento passivo: Este método não usa sensores, o movimento é conseguido em resposta ao desequilíbrio de pressão entre dois pontos na extremidades do rastreador. Este desequilíbrio de pressão é causado pelo calor do sol que cria pressão de gás a partir de pressão comprimida move a estrutura.

Rastreamento ativo: Este método sim usa sensores e a posição do sol é continuamente seguida durante o dia de forma que o painel fotovoltaico sempre enfrentar os raios do sol de forma perpendicular. Este tipo de rastreamento possui uma maior precisão, mas o principal problema ocorre principalmente durante os dias nublados, quando os sensores não conseguem discriminar as medições e podem dar uma medição falsa ou mesmo se perderem.

Rastreamento cronológico: O sistema de rastreamento é baseado na temporização. O painel é movido a uma taxa fixa ao longo do dia, uma vez que o sol se move no céu a uma taxa fixa de cerca de $15^\circ/h$. Neste tipo de sistema, o armazenamento/transmissão de dados e cálculos consome energia e a a movimentação pode ser desnecessária quando a luz do sol é muito baixa.

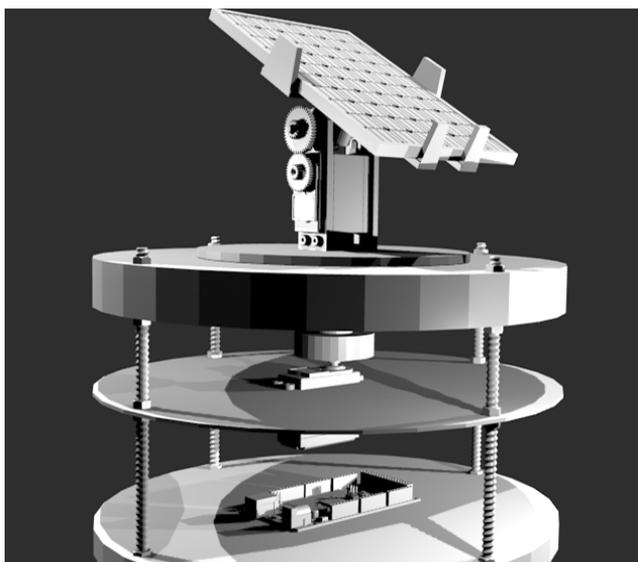


Figura 2. Desenho do protótipo em 3D.



Figura 3. Principais componentes.

Assim, o método mais adequado dependerá do local de instalação, finalidade de geração. Na atualidade existem rastreadores que combinam os três métodos para aumentar a eficiência.

Considerando as vantagens deste último, para o trabalho foi escolhido a categoria de rastreador solar ativo de eixo duplo. Na Figura 2 é representada a ideia principal do protótipo em 3D usando o *software* Blender 3D. Os componentes principais (ver Figura 3) são:

- Chassis;
- Arduino UNO R3;
- Fonte de Alimentação 5V;
- Servomotor TowerPro MG946R 180°;
- Painel Fotovoltaico 110x83mm, 180 mA,6V, 1W;
- Sensor Shield V5.0;
- LDR GL5528;
- Sensor de Corrente DC INA219 I2C.

O protótipo foi projetado para ter dois graus de liberdade, de leste a oeste pelo servomotor horizontal e de norte a sul pelo vertical. O chassis foi concebido para ter arrefecimento natural, por isso sua estrutura arredondada e aberta, usando materiais recicláveis como a madeira e

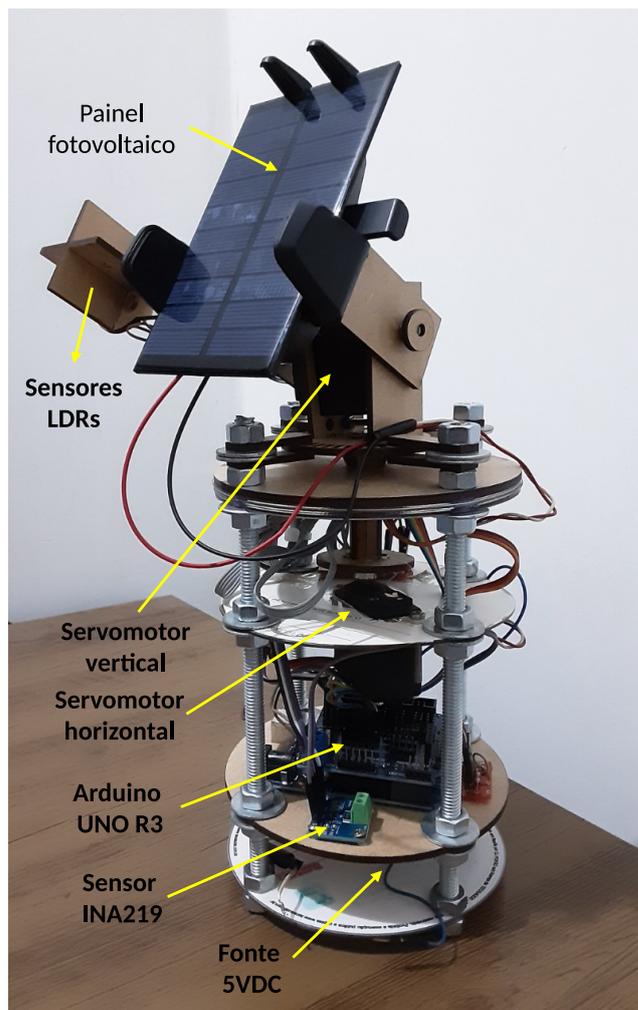


Figura 4. Protótipo de rastreador solar de eixo duplo.

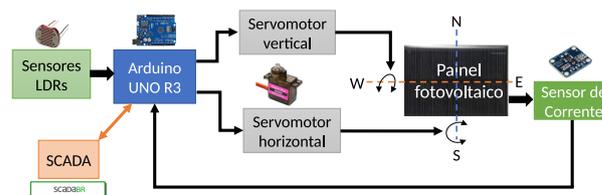


Figura 5. Diagrama em blocos do sistema.

poli carbonatos. Na Figura 4 é mostrado o protótipo do rastreador solar de eixo duplo.

2.1 Descrição do sistema

O objetivo do sistema é obter perpendicularidade entre a superfície do painel fotovoltaico e os raios solares, para maximizar a potência obtida do painel. Na Figura 5 é apresentado um esquema em blocos simplificado do sistema.

A função do sistema de rastreamento é baseada no *software* embarcado na placa Arduino, o qual é o cérebro do sistema e converte os valores analógicos dos sensores LDRs em digitais, fornecendo dois canais de saída para controlar a rotação do painel fotovoltaico através dos dois

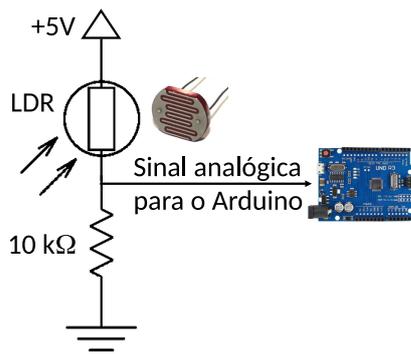


Figura 6. Circuito do sensor LDR.

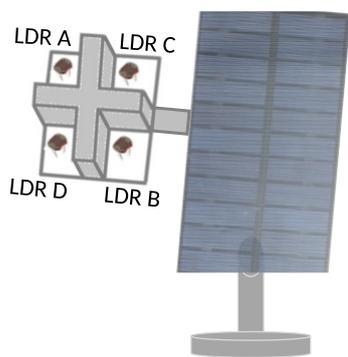


Figura 7. Sensor LDR.

servomotores. Assim, os movimentos de rotação ocorrem em dois eixos: vertical e horizontal, do leste para oeste (rastreamento azimutal) durante o dia e de norte para sul (rastreamento de elevação) durante as estações do ano. As grandezas de tensão, corrente e potência, são medidas em tempo real e mostradas no Scada.

Como visto o rastreador solar é do tipo ativo, ou seja, o seu movimento de seguimento solar é determinado instantaneamente de acordo à posição do sol. Para isto, quatro sensores do tipo LDRs são usados para detectar a posição do sol, os quais possuem baixo custo. O circuito do sensor LDR é desenhado como um divisor de tensão como mostrado na Figura 6.

Existem diferentes posições usando quatro LDRs para o seguimento solar. No protótipo foi usado um sensor LDR, situado à esquerda do painel fotovoltaico de quatro quadrantes, separados por duas barreiras opacas responsáveis por gerar a sombra decorrente do movimento do sol, como mostrado na Figura 7. Desta forma, o sensor LDR detecta a variação de luminosidade a medida que algum LDR for sombreado devido à movimentação dos raios solares. Assim, quando a intensidade dos LDRs A e B forem iguais às dos LDRs C e D, ocorrerá a melhor orientação do painel com relação à incidência dos raios solares.

2.2 Sistema de supervisão e controle

O fluxograma do algoritmo de rastreamento, carregado no Arduino, é mostrado na Figura 8.

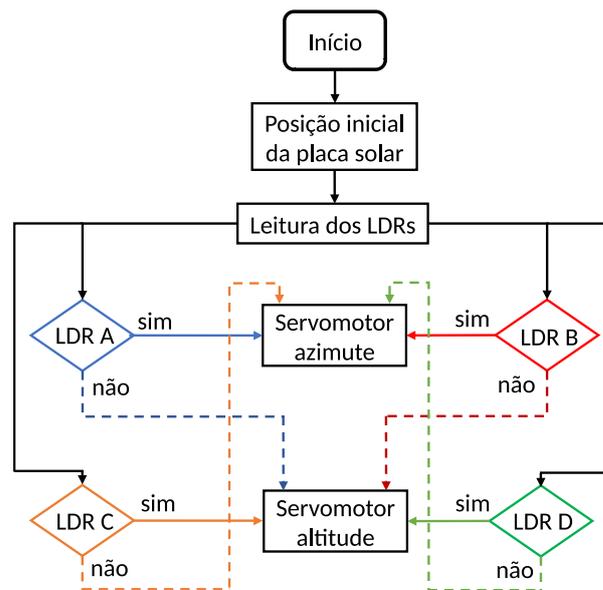


Figura 8. Fluxograma da operação do algoritmo rastreador.

O algoritmo de rastreamento é baseado nos valores dados pelos quatro LDRs, assim, se a incidência de luz estiver mais para os LDRs A ou B, se movimentará o servomotor azimutal para a direita e se tiver mais incidência de luz para os LDRs C ou D, o servomotor horizontal ou azimutal girará para a esquerda. Já no servomotor vertical ou de altitude, se a incidência estiver nos LDRs A ou B, girará para baixo e se tiver mais incidência nos LDRs C ou D, girará para cima. Dessa forma, a maior captação dos raios solares perpendicular ao painel fotovoltaico ocorrerá naquela localização.

Para o desenvolvimento do sistema de supervisão e controle foi escolhido o ScadaBR, por ser um *software* livre, gratuito e de código-fonte aberto, indicado para desenvolver aplicações de Automação, Aquisição de Dados e Controle Supervisório (ScadaBR, 2006). Para isso o primeiro passo é fazer com que o ScadaBR identifique o elemento com o qual irá interagir, chamado dentro do programa de *Data Source*, onde se estabelece tipo de comunicação com o Arduino, que no caso, é empregado o protocolo de comunicação serial Modbus. Seguidamente, algumas informações devem ser fornecidas para o ScadaBR, como a nomeação do dispositivo escravo, bem como o tempo em que os dados serão atualizados, que não caso foi escolhido 500 ms. Além destas informações, também devem ser estabelecidos mais alguns parâmetros relativo ao protocolo de comunicação como a taxa de comunicação e a porta serial dedicada a transferência de dados, que no caso foi de 9600 bps e a porta COM2.

O próximo passo é inserir no ScadaBR os registradores *holding* que foram declarados no código do Arduino. Para realizar este procedimento deve-se criar os chamados *Data points*, os quais primeiramente devem ser nomeados e em seguida definir 3 campos fundamentais: Faixa do registro onde a opção a ser selecionada deve ser registrador *holding*, em seguida o Tipo de dados Modbus determinado como Inteiro de 2 bytes sem sinal e, por último, o *Offset*. Por último, para visualizar as variáveis com que se está

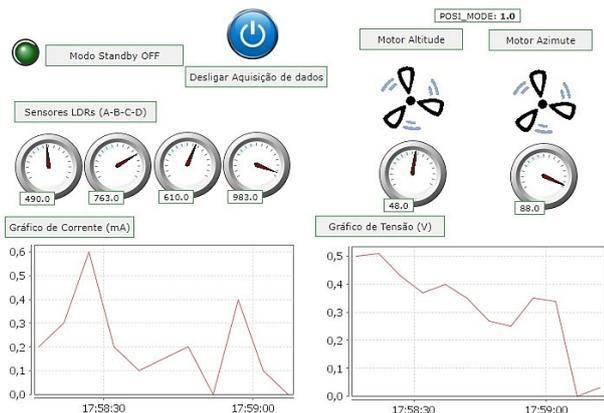


Figura 9. Sistema de supervisão e controle.

trabalhando por meio há que retomar o *Watch list*, que apenas exibe os dados na forma de lista de maneira simples e direta dos *Data points* criados.

Uma vez realizadas todas as configurações no ScadaBR, foi criada uma interface gráfica com a finalidade de apresentar diferentes grandezas como, por exemplo, tensão e corrente fornecidas pelo painel, como apresentado na Figura 9.

A Figura 9 mostra a interface homem-máquina (IHM) do sistema Scada. A tela apresenta um monitoramento em tempo real dos gráficos de corrente (dado em mA) e tensão (dado em V) gerador pelo painel solar fotovoltaico, em um determinado período de tempo. A interface possui *gifs* dinâmicos do tipo *Dial*, que no caso dos motores indicam a angulação dos servomotores, altitude e azimute. No caso dos LDRs indicam o valor de leitura dos sensores, em uma faixa que varia de 0 a 1024. Adicionalmente, a tela possui um botão de início/reinício, de maneira que permita ligar e desligar a aquisição dos dados de forma prática. Por fim, é configurado o Modo *Standby*, que é ativado ao encontrar uma posição estável do sistema rastreador, esse modo foi configurado de maneira que a cada 1 min o mesmo seja desativado, para que seja feito um novo reposicionamento, além disso, caso a diferença dos LDRs seja pequena, o modo *standby* é reativado, garantindo assim um racionamento da energia consumida pelo sistema rastreador.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais do sistema com painel fixo e com rastreamento ativo de eixo único e duplo foram comparados para determinar a elegibilidade do protótipo proposto. Para isso, uma lâmpada LED de 9 W foi usada simulando o sol, a qual foi colocada para percorrer 180° no intervalo de 30 mins foi colocada sucessivamente em 30 pontos diferentes respeitando um eixo circular para testar o funcionamento horizontal e vertical do rastreador solar em 3 modos diferentes: eixo único, eixo duplo e com o painel fixo. Assim, as grandezas são registradas em tempo real no Scada.

O mesmo experimento foi repetido três vezes para uma mesma altura da lâmpada, considerando o sistema fixo e com os dois tipos de rastreadores. A inclinação do sistema fixo foi de 15°, já que a instalação de painéis solares

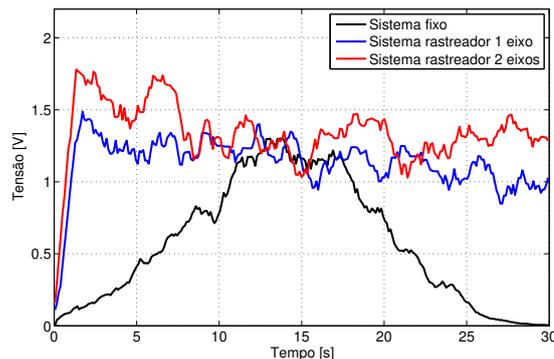


Figura 10. Comparação das tensão geradas.

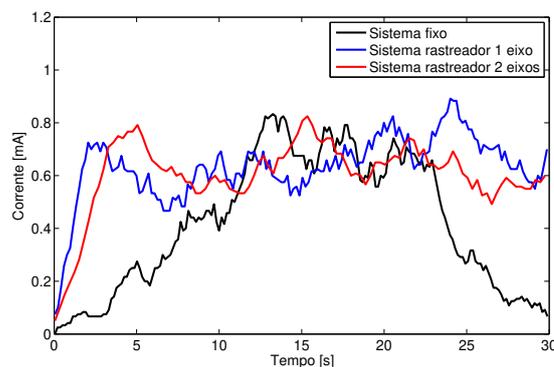


Figura 11. Comparação das correntes.

depende das características geométricas de incidência da radiação solar no local. Geralmente, no Brasil, esses painéis devem estar orientados para o norte com ângulos de inclinação que variam com a latitude do local a ser instalado (Krause and Pimenta, 2021).

Os resultados experimentais são apresentados na Figura 10 para a tensão gerada e na Figura 11 para a corrente, onde é possível observar que os sistemas com rastreamento seguem o movimento da luz, não obstante, se comparados os dois sistemas com rastreamento, o de eixo duplo consegue uma melhor captação dos raios de luz.

De forma geral, pode-se calcular o ganho entre os sistemas, usando a seguinte equação:

$$\eta\% = \frac{\sum(V2 - V1)}{V1} \times 100\%, \quad (1)$$

onde $V2$ e $V1$ são as tensões geradas pelo sistemas 2 e 1, respectivamente.

Assim, dos resultados experimentais da tensão gerada, por exemplo, é possível determinar que o sistema com rastreamento de eixo duplo teve uma geração de tensão de um 12,45% mais do que o sistema rastreador de eixo único. Com isso é possível perceber que os rastreadores solares, sejam de único ou duplo eixo conseguem mais captação de luz que os fixos, sendo que o de eixo duplo conseguem uma captação maior.

Finalmente, a lista dos principais materiais se mostra na Tabela 1 para ter uma estimativa do custo do protótipo,

enfatizando o baixo custo, considerando que o resto dos materiais foram reciclados.

Tabela 1. Custo dos principais componentes.

Componentes	Quantidade	Preço (R\$)
Arduino UNO R3 + cabo USFB	1	93,00
Fonte de alimentação 5VDC	1	11,21
Servomotores TowerPro MG946R	2	100,00
Célula Fotovoltaica	1	59,90
Sensor Shield V5.0	1	11,53
LDRs	4	1,96
Sensor INA219	1	29,45
Total		307,05

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi desenhado, implementado e testado um rastreador solar de eixo duplo. O mesmo foi concebido usando componentes de baixo custo e materiais recicláveis para minimizar o custo total do sistema. Para isso, uma placa Arduino UNO R3, quatro sensores LDRs, dois servomotores e um sensor de corrente DC foram os componentes principalmente usados como parte do hardware. Para detectar a perpendicularidade dos raios do sol com relação à placa fotovoltaica, foi usado um método simples baseado em quatro sensores LDRs. Por outro lado, foi projetado um algoritmo simples e baseado em instruções simples que, a sua vez, não requerem de cálculos extensos e torna o rastreador solar robusto e com boa precisão. Além disso, resultados experimentais, considerando um sistema fixo e rastreador com eixo único e duplo, mostram que o sistema proposto capta melhor a luz, porém o de maior eficiência, de um 12,45%. Pode-se apreciar que mesmo usando servomotores minúsculos, os resultados mostram que o protótipo foi altamente eficiente em comparação com o sistema fixo. Isso prova que o uso de rastreadores, mesmo pequenos, será interessante e lucrativo.

Por outro lado, se vislumbra que pequenos sistemas rastreadores podem ser mais eficientes para alimentar dispositivos que demandem baixa potência, como mini-bombas, lâmpadas, sistemas de sinalização rodoviária. Por outro lado, o protótipo desenvolvido também pode ser usado como uma bancada de testes para que pesquisadores e estudantes, em geral, implementem sistemas rastreadores a escala industrial.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos, há alguns desafios como desenvolver, projetar e realizar um sistema para um grande painel fotovoltaico ou uma matriz fotovoltaica. Tornar o sistema um objeto conectado utilizando a tecnologia internet das coisas (IoT), que pode oferecer diversos benefícios como a possibilidade do seu controle remoto e monitoramento da energia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

Almeida, H.A.d. and Almeida, E.d.C.V.d. (2022). Potencial da energia solar fotovoltaica no semiárido nordestino. *Concilium*, 22(2), 197–210. doi:10.53660/CLM-111-130. URL <http://clium.org/index.php/edicoes/article/view/111>.

Campos, G.R.M., Soares, F.C., de Souza Medeiros, K., et al. (2021). Análise da eficiência energética de usinas fotovoltaicas ao longo de um dia. *Brazilian Journal of Development*, 7(4), 38157–38169.

Frosi, F., Chesini, D., Gabe, I.J., and De Bona, J.C. (2018). Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de farroupilha-rs. In *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018*.

Krause, M.O. and Pimenta, M.A. (2021). Um estudo sobre a incidência solar e o posicionamento geográfico da cidade de Ilhéus, Bahia, como fator relevante para a instalação de sistemas fotovoltaicos. *Brazilian Journal of Development*, 7(8), 82779–82795.

Melo, C.L., Moura, M.G., Pinto, M.F., Zachi, A.R., Melo, A.G., and Moraes, C.A. (2020). Controle de um painel solar para rastreamento de orientações de máxima geração de potência. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.

ScadaBR (2006). *Download ScadaBR*. FUNDAÇÃO CERTI, Rio de Janeiro. URL <http://www.scadabr.com.br/?q=downloads>.

Silva, M.S.S., Silva, V.S., Fortes, D.R.d.O., and Maia, F.C.T. (2019). Comparação técnico-econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos com diferentes tecnologias no nordeste. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 1.

Verma, B.D., Gour, A., and Pandey, M. (2020). A review paper on solar tracking system for photovoltaic power plant. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(17).