

# PROJETO DE UM MODELO DIDÁTICO DE RASTREADOR SOLAR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

**Rafael da Cunha de Lima** – rafaellima699@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Campus Passo Fundo

**Sabrina Figueiredo Ferraz de Almeida**

União Brasileira de Faculdades, Programa de Formação Pedagógica

**Alexsander Furtado Carneiro**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Campus Passo Fundo

## 4.2. Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

**Resumo.** Dispositivos de rastreamento solar, também conhecidos como rastreadores ou seguidores solares, são empregados na indústria para orientar módulos fotovoltaicos de acordo com a posição do Sol, que varia ao decorrer do ano. A utilização de sistemas de rastreamento permite aumentar a incidência solar, aproximadamente, de forma normal à face dos módulos, maximizando a geração de energia fotovoltaica. Sob um contexto educacional, o entendimento das Ciências engloba conceitos de difícil compreensão, a visualização de uma estrutura 3D tende a facilitar esse processo de aprendizagem. Diante disso, o presente artigo busca desenvolver um modelo didático de seguidor solar de dois graus de liberdade, o qual foi utilizado para comparar a geração de energia de um módulo fotovoltaico de angulação fixa, com a geração de um módulo com rastreamento solar. Para atingir o objetivo pretendido, primeiramente selecionou-se tanto um módulo fotovoltaico, quanto um atuador elétrico para compor o sistema, no qual posteriormente, foi possível desenvolver um projeto mecânico e realizar simulações estáticas. Com a conclusão do projeto mecânico, foi desenvolvido um sistema elétrico para controle e coleta de dados do protótipo de rastreador solar. Por fim, foi possível realizar um ensaio experimental, uma coleta e análise de dados. O resultado obtido, de um aumento de 26% de eficiência com a aplicação do rastreador solar, mostrou-se positivo, comprovando um desempenho satisfatório de acordo com a literatura consultada. Devido as suas pequenas dimensões e baixo peso, o modelo didático satisfaz as necessidades dos educadores, assim como, possibilita interação com os estudantes.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica, Rastreadores solares, Modelo didático.

## 1. INTRODUÇÃO

Conforme Carneiro (2022), a energia fotovoltaica tornou-se tema atual e interessante devido ao seu crescimento acelerado. Dessa forma, é vista como uma ótima ferramenta de ensino de física, já que os conceitos físicos estão presentes desde a conversão da energia até sua utilização. Educadores encontram dificuldades no ensino de Ciências, em decorrência da complexidade de seus conceitos, fenômenos e teorias, que exigem um grande poder de abstração. Uma estratégia para tornar o estudo de Ciências mais palpável é utilizar modelos didáticos, ou seja, representações, já que a interação com estruturas de três dimensões auxilia no processo de ensino e aprendizagem (Dantas *et al.*, 2016). O emprego de materiais utilizados no cotidiano, torna as aulas mais atraentes e motivadoras, uma vez que os alunos são envolvidos no desenvolvimento de seu próprio conhecimento (Matos *et al.*, 2009).

Para a geração de energia solar fotovoltaica, a luz solar é convertida em eletricidade através do efeito fotovoltaico, no qual a célula fotovoltaica, composta por materiais semicondutores, se torna um dispositivo indispensável para o processo de conversão (Pinho e Galdino, 2014). Segundo Villalva (2016), a corrente elétrica provida com a utilização de módulos fotovoltaicos, depende diretamente da intensidade da radiação solar, presente de forma incidente sobre as células. Ao nível do decaimento da luz, ocorre uma redução drástica da capacidade de geração de energia.

Ao longo do dia, o Sol se movimenta de leste a oeste, ocorrendo de forma cíclica para todos os dias do ano. Além do movimento diário, de acordo com o decorrer do ano o Sol se move de norte a sul. Se forem realizadas medições da posição do sol, cada dia do ano apresentará uma angulação diferente, desta forma, engenheiros buscam soluções alternativas para aumentar a incidência de luz solar sobre módulos fotovoltaicos (Soulayman, 2018).

Rastreadores solares são mecanismos utilizados para posicionar o módulo fotovoltaico de forma a aumentar incidência de raios solares na sua superfície, o uso de seguidores solares pode proporcionar um aumento no rendimento do módulo, movimentando o mecanismo de acordo com a exposição da luz solar ao longo do dia (Souza *et al.*, 2021).

Os sistemas de rastreamento solar são mecanismos de um, ou dois graus de liberdade. Os rastreadores com um grau de liberdade permitem o ajuste de apenas um eixo, variando a inclinação do módulo em relação ao solo. Sistemas de rastreamento com dois graus de liberdade permitem o ajuste de dois eixos de forma simultânea, cujo o ângulo vertical acompanha o movimento do sol, enquanto o ângulo horizontal adapta-se à altura solar (Villalva, 2016). A principal vantagem dos sistemas com apenas um eixo é sua simplicidade diante da estruturação de seu movimento. Entretanto,

apesar de sistemas de dois eixos apresentarem complexidade de movimentação e necessitarem de constante modificação do ângulo, possuem maior eficiência em relação a geração de energia (Souza *et al.*, 2021).

A proposta do presente artigo é projetar um modelo didático de rastreador solar, com o objetivo de facilitar a aprendizagem de alunos. O intuito do modelo é comparar a geração de energia de um módulo fotovoltaico de angulação fixa em relação a geração de um módulo com rastreamento solar. Para isso, objetiva-se o desenvolvimento e construção de um protótipo de rastreador solar de dois graus de liberdade. O protótipo em questão é composto por um módulo fotovoltaico, um mecanismo mecânico para rotação dos eixos e um sistema elétrico, para controlar a movimentação e realizar a coleta dos dados de geração de energia.

O presente artigo é dividido em três partes. A primeira consiste na metodologia utilizada para alcançar os objetivos, a qual está diretamente relacionada a segunda parte, a qual refere-se ao desenvolvimento do projeto mecânico e elétrico, incluindo a seleção de seus componentes, um estudo de pré-desenvolvimento, projeto mecânico e simulações, sistema elétrico para controle e coleta de dados, lógica de funcionamento, construção do modelo didático de seguidor solar e apresentação dos custos envolvidos. A terceira parte discorre sobre a execução do ensaio experimental, coleta e análise dos dados obtidos, de modo a verificar o desempenho do protótipo desenvolvido.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada em local externo de uma área residencial, na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, próximo as coordenadas: latitude 28,26011° S e longitude 52,43105° O. A pesquisa foi desenvolvida com objetivo de projetar e construir um modelo didático de rastreador solar de dois graus de liberdade e comparar a geração de um módulo fotovoltaico fixo, instalado segundo as recomendações para o local de instalação, com a geração de um módulo fotovoltaico com rastreamento solar, utilizando o protótipo desenvolvido.

A primeira etapa do desenvolvimento foi definir o módulo fotovoltaico a ser utilizado, pois este definiria os requisitos do projeto. Além do projeto mecânico, foi necessário desenvolver um dispositivo eletrônico, objetivando o controle de rotação dos motores elétricos, leitura de sensores e coleta dos dados. Para o dispositivo eletrônico foi necessário desenvolver um software, de modo a executar as operações mencionadas quando necessário. A Fig. 1 disponível abaixo, apresenta um fluxograma das etapas de desenvolvimento do projeto.



Figura 1 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do projeto (Fonte: Autores, 2023).

## 3. PROJETO MECÂNICO E ELÉTRICO

Esse capítulo é dedicado a apresentação dos resultados da etapa de desenvolvimento e execução do projeto do modelo didático de rastreador solar de dois graus de liberdade.

### 3.1 Seleção do Módulo Fotovoltaico

Para o desenvolvimento do projeto, foram escolhidos dois módulos fotovoltaicos da marca Resun modelo RSM030P com 30 W de potência de pico, tensão de máxima potência 18,54 V, corrente máxima de potência 1,62 A, massa igual a 2,4 kg e dimensões 670 x 350 x 25 mm. O módulo fotovoltaico foi escolhido por ser indicado para sistemas *off-grid*, além de ser facilmente encontrado no mercado, possui massa e dimensões reduzidas, contribuindo para o desenvolvimento do projeto mecânico. Um dos módulos será utilizado no rastreador solar, enquanto o outro terá posicionamento fixo.

### 3.2 Seleção do Atuador Elétrico

Para compor o mecanismo de rotação, foram escolhidos dois motores, para a rotação do módulo fotovoltaico em um mecanismo de dois graus de liberdade, variando a angulação horizontal e vertical. O motor utilizado é da fabricante Alemã Bühler Motor GmbH modelo 1.61.070.002.00. Os dois motores foram reaproveitados de um equipamento de carregamento de bobina de papel utilizado para impressão, possuem redução interna de 54:1, tensão de funcionamento entre 9 e 42 V, rotação de 53 rpm e torque contínuo máximo de 1,3 Nm.

### 3.3 Estudo de Pré-desenvolvimento

Antes de dar início ao desenvolvimento do projeto mecânico, foi necessário verificar as limitações do motor elétrico escolhido, de modo a garantir o correto funcionamento do protótipo. No mecanismo desenvolvido, o motor é acionado pelo microcontrolador, rotacionando o módulo até atingir a posição desejada, ao atingir essa posição o motor é desligado. Enquanto o motor está desligado, o torque gerado pela massa e posição angular do módulo atua diretamente sobre a redução interna do motor, que em algum momento, vencerá o atrito estático e irá causar a rotação forçada do eixo. Para garantir que isso não ocorra, foi executado um ensaio experimental com a utilização de um dinamômetro analógico e uma peça impressa em 3D, utilizada como braço de alavanca. O ensaio realizado está disponível na Fig. 2 abaixo.



Figura 2 - Ensaio com dinamômetro (Fonte: Autores, 2023).

O ensaio foi realizado com o motor desligado e fixo à uma superfície plana. A peça impressa em 3D foi posicionada ao eixo do motor de forma paralela a horizontal. Na extremidade livre foi posicionado o dinamômetro, tracionando o motor na direção vertical sentido para baixo. Ao atingir aproximadamente 1,5 kg no dinamômetro houve o giro forçado do eixo do motor. A distância entre centros do braço de alavanca projetado é de 45 mm, logo pode-se calcular que o torque máximo gerado pelo mecanismo mecânico no eixo do motor deve ser menor que 0,66 Nm.

### 3.4 Projeto Mecânico

O projeto mecânico foi desenvolvido através do software SolidWorks 2021, permitindo a criação de modelos CAD e simulações estáticas. Inicialmente, foi criado um modelo do módulo fotovoltaico e do motor. O modelamento do módulo Resun RSM030-P foi feito com as dimensões especificadas na folha de dados da fabricante. Já para o motor elétrico, não foram encontradas dimensões na folha de dados, por isso, foram feitas medições com um paquímetro e modelamento no software, então, foi iniciado o processo de concepção de ideias para o mecanismo de rotação principal.

Outro ponto importante a ser ressaltado é a angulação máxima do modelo didático, que foi definida de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , para o eixo vertical e horizontal, permitindo uma variação total de  $180^\circ$  em cada eixo. A angulação será limitada dentro do intervalo estabelecido, através de interruptores fim de curso, utilizados em conjunto com o dispositivo eletrônico.

Para dar início ao projeto mecânico, foi necessário desenvolver um mecanismo de dois graus de liberdade, permitindo rotacionar o módulo em dois eixos, dentro do intervalo estipulado anteriormente. O projeto foi executado buscando adequar a estrutura às características físicas do módulo e também, limitações do motor elétrico. Desse modo, deu-se início ao modelamento do dispositivo, buscando cumprir com os requisitos mencionados. A Fig. 3 apresenta a montagem completa do protótipo de rastreador solar. O dispositivo desenvolvido é composto por quatro subconjuntos.



Figura 3 - Vista isométrica do protótipo de rastreador solar desenvolvido (Fonte: Autores, 2023).

**Subconjunto Suporte do Módulo Fotovoltaico.** Esse subconjunto é fixado ao módulo, permitindo a rotação no eixo horizontal. É composto por um suporte do módulo, um sensor, haste do sensor, parafusos, arruelas, porcas e uma engrenagem.

**Submontagem Conjunto de Rotação do Eixo Horizontal.** Conjunto responsável pela movimentação do suporte do módulo fotovoltaico, assim como limitar a rotação através de interruptores fim de curso. É constituído por um suporte horizontal, motor elétrico com redução, parafusos, porcas, rolamento, engrenagem, mancais e interruptores fim de curso.

**Submontagem Conjunto de Rotação do Eixo Vertical.** Essa submontagem é responsável por rotacionar o eixo vertical do mecanismo, alojar interruptores fim de curso e fixar a submontagem do conjunto tripé. É formada por um suporte vertical, motor, rolamento, mancal, engrenagens, carenagem inferior, interruptores fim de curso, pinos distanciadores, placa superior, arruelas, parafusos e porcas.

**Submontagem do Conjunto Tripé.** A submontagem do conjunto tripé é responsável por suportar os esforços do mecanismo, facilitando o posicionamento do protótipo em uma superfície plana. Composta por um tubo principal, suporte tripé, pernas, parafusos, arruelas, porcas e ponteiros.

**Definição do torque necessário para a rotação dos eixos.** Anteriormente, pode-se verificar que o torque máximo gerado no eixo do motor elétrico, deve ser inferior a 0,66 Nm. Para o eixo horizontal do mecanismo, deve-se analisar o suporte do módulo fotovoltaico, apresentado na Fig. 4 abaixo.



Figura 4 - Vista isométrica da montagem do suporte do módulo fotovoltaico (Fonte: Autores, 2023).

Para reduzir os esforços mecânicos presentes no mecanismo, buscou-se reduzir ao máximo a distância entre o centro do eixo do motor e o centro de massa do módulo. Considerou-se o centro de massa do módulo na face externa, garantindo que o torque gerado seja menor ou igual ao valor calculado.

A distância entre o centro do eixo de rotação horizontal e a face externa do módulo fotovoltaico, ficou definida como 62 mm. Com isso, foi possível calcular um torque máximo de 1,46 Nm presente no sistema, que ocorre quando o módulo está a 90° com a horizontal. Portanto, o motor escolhido não atende às condições necessárias, uma vez que o torque máximo a ser suportado pelo motor é de 0,66 Nm. A fim de garantir o correto funcionamento do protótipo, mantendo os motores selecionados inicialmente, optou-se por projetar uma caixa de redução para o eixo horizontal. Para o eixo vertical não será necessário calcular o torque, pois este será proveniente da força gerada pelo atrito, presente nos rolamentos.

**Projeto de engrenagens e caixa de redução.** A transmissão de torque e velocidade angular em um mecanismo requer engrenagens. O acoplamento de duas ou mais engrenagens, é chamado de trem de engrenagens, podendo ser simples, composto ou planetário (Norton, 2013). Trens de engrenagens planetários se destacam pelo seu tamanho reduzido e menor massa (Arnaudov e Karaivanov, 2019). A Fig. 5 apresenta um trem de engrenagens planetário, com três engrenagens planetas, uma engrenagem sol (1), uma engrenagem anelar (3) e um braço (H).

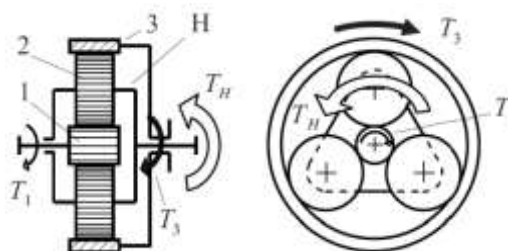


Figura 5 - Trem de engrenagens planetário (Fonte: Arnaudov e Karaivanov, 2019).

Em um trem de engrenagens planetárias, usualmente utiliza-se três engrenagens planetas (Arnaudov e Karaivanov, 2019). Para o correto dimensionamento do número de dentes e garantia da condição de montagem, deve-se satisfazer a Eq. (1).

$$\frac{z_1+z_3}{k} = \text{valor inteiro} \quad (1)$$

Onde  $Z_1$  é o número de dentes da engrenagem solar,  $Z_3$  é o número de dentes da engrenagem anelar e  $K$  é o número de engrenagens planetas. Considerando a engrenagem fixa como anelar e a transmissão de rotação feita da engrenagem sol para o braço, a relação de transmissão pode ser calculada através da Eq. (2) (Arnaudov e Karaivanov, 2019).

$$i_{1H(3)} = 1 + \frac{z_3}{z_1} \quad (2)$$

Por fim, pode-se obter o número de dentes para as engrenagens planetas  $Z_2$ , através da Eq. (3).

$$z_2 = \frac{z_3-z_1}{2} \quad (3)$$

A caixa de redução projetada fornece uma relação de transmissão suficiente para que o torque presente no suporte do módulo fotovoltaico não vença o regime estático do motor. Optou-se por uma caixa de transmissão com um conjunto de engrenamento planetário, pois permite obter maior relação de transmissão comparado ao acoplamento comum de engrenagens de dentes retos. Conforme verificado, o torque máximo suportado pelo motor foi de 0,66 Nm, enquanto para o eixo do suporte do módulo fotovoltaico, esse valor é de 1,46 Nm. Com isso, a relação de transmissão mínima necessária para suportar o torque do mecanismo deve ser superior a 2.2:1. À vista disso, a redução foi projetada buscando obter a maior relação de transmissão possível.

As engrenagens anel (fixa) e sol, foram projetadas, respectivamente, com 51 e 15 dentes, após definir o número de dentes das engrenagens, deve-se garantir a condição de montagem. Dessa forma, com a Eq. (1) foi verificado o valor 22 como número inteiro. Em sequência, o cálculo da relação de transmissão da engrenagem sol para o braço, onde as engrenagens sóis são fixas, é feito através da Eq. (2) e obteve-se um valor de 4,4. Portanto, a relação de transmissão obtida com a redução é superior ao valor mínimo de 2.2:1 calculado anteriormente. Por fim, pode-se calcular o número de dentes das engrenagens planetas, através da Eq. (3), e o valor obtido foi de 18 dentes.

Com a finalização do dimensionamento mecânico, deu-se continuidade ao modelamento 3D do conjunto de redução planetário. Este conjunto de redução será utilizado apenas para a rotação do eixo horizontal, apresentando relação de transmissão 4.4:1. O modelamento do conjunto de redução, assim como os componentes internos do conjunto de engrenamento planetário podem ser visualizados na Fig. 6.

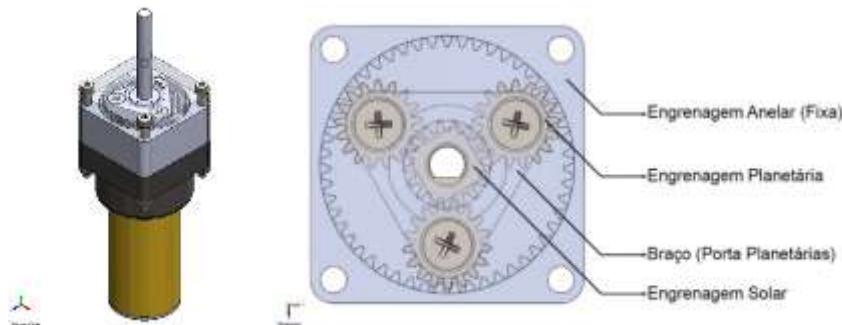


Figura 6 - Montagem do conjunto de engrenamento planetário (Fonte: Autores, 2023).

Além das engrenagens, foi feito o modelamento de um braço para fixar as engrenagens sóis e um eixo para acoplamento no mecanismo. Para a conexão do motor ao eixo de rotação onde será fixo o suporte do módulo, projetou-se um conjunto de duas engrenagens de dentes retos, uma com 20 dentes e a outra com 40. A Tab. 1 abaixo, apresenta a relação de transmissão final obtida, através da implementação da redução planetária e da redução através de engrenagens de dentes retos. Com a utilização dos dois conjuntos, pode-se manter o motor selecionado inicialmente.

Tabela 1 - Parâmetros conjunto de redução final (Fonte: Autores, 2023).

| Relação de Transmissão Final        |       |
|-------------------------------------|-------|
| Relação de transmissão Planetário   | 4.4:1 |
| Relação de transmissão Dentes Retos | 2:1   |
| Relação de transmissão Final        | 8.8:1 |

### 3.5 Forças de Reação e Simulações Estáticas

Com o projeto das engrenagens concluído, foi feito o cálculo das forças de reação presentes no conjunto de engrenamento de engrenagens de dentes retos. As forças tangencial e radial, são respectivamente 146 N e 53,14 N.

Para dar andamento ao projeto, foi necessário verificar se os componentes projetados ofereciam resistência necessária para suportar os esforços calculados, para isso utilizou-se a simulação estática do software SolidWorks Simulation. Componentes fabricados por impressão 3D variam de acordo com os parâmetros de impressão, portanto foram desconsiderados. Logo, optou-se por priorizar os componentes que presenciam maiores forças de reação, para o estudo por simulações estáticas. As simulações apresentam resultados referentes a tensão, fator de segurança e deslocamento, e foram separadas em três partes, sendo elas: Suporte horizontal, suporte do painel e eixo horizontal.

### 3.6 Sistema Elétrico para Controle do Protótipo de Rastreador Solar

O sistema eletrônico é responsável por controlar a rotação dos motores elétricos, de modo a posicionar o módulo para a região de maior luminosidade. Também é responsável por fazer a leitura e registrar os dados de geração de cada módulo fotovoltaico, incluindo tensão, corrente e potência.

**Placa de desenvolvimento Teensy 3.2.** Segundo PJRC (2023), Teensy é um sistema completo de desenvolvimento com microcontrolador, através de comunicação por USB. As placas de desenvolvimento Teensy são capazes de implementar uma ampla variedade de projetos, mesmo possuindo tamanho reduzido. A programação pode ser feita através de uma extensão adaptada do Arduino IDE, chamada Teensyduino, ou diretamente em linguagem C (Adafruit, 2023a). A placa de desenvolvimento escolhida para o projeto foi a Teensy 3.2 fabricada pela empresa PJRC e possui um microcontrolador ARM Cortex-M4 de 72 MHz.

**Sensor Fotoresistor LDR.** Sensores são dispositivos sensíveis a diferentes formas de energia presentes no ambiente, o que possibilita mensurar determinada grandeza (Roggia e Fuentes, 2016). De acordo com McRoberts (2011), o resistor dependente de luz (LDR), é um sensor que varia sua resistência de acordo com a luminosidade presente no ambiente. Com o aumento da luminosidade, a resistência do LDR diminui, permitindo identificar variações de luminosidade através da leitura do sensor.

Para o rastreador solar, foram utilizados quatro sensores de luminosidade (LDR) de 5 mm. Os sensores LDR foram instalados em um suporte fabricado por impressão 3D, sendo uma circunferência dividida em quatro quadrantes, dessa forma, para verificar a região de maior intensidade de luz, o microcontrolador compara os valores dos sensores de luz, se a diferença entre os sensores for superior a faixa de tolerância, ocorre o acionamento do motor do eixo correspondente. A Fig. 7 apresenta a disposição dos sensores de luminosidade, fixados no suporte fabricado por impressão 3D.

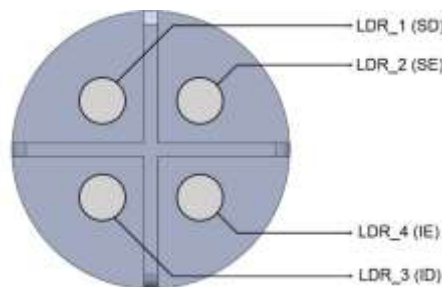


Figura 7 - Disposição dos sensores LDR no suporte (Fonte: O Autor, 2023).

**Driver Ponte H.** Módulos são dispositivos compostos por componentes e sensores, de modo a facilitar a implementação em plataformas Arduino, Raspberry Pi, entre outros (Adafruit, 2023b). Drivers de motores de ponte H são dispositivos utilizados para o controle de motores elétricos. Os módulos ponte H permitem controlar a velocidade de motores de corrente contínua, assim como o sentido de rotação (Adafruit, 2022). Para essa função foram utilizados dois módulos ponte h modelo BTS7960 IBT\_2, pois estão de acordo com a corrente máxima do motor.

**Sensor de Corrente e Tensão.** A geração dos módulos fotovoltaicos foi mensurada por dois sensores INA219, que enviam informações para o microcontrolador. O sensor permite medir tensão de até 26 V e corrente de até 3,2 A. O INA219 permite medir tensão e consumo de corrente com precisão de 1% para mais e para menos (Adafruit, 2023c).

**Módulo de Cartão Micro SD.** Uma forma simples de armazenar dados, mantendo o baixo custo, é utilizando Cartões SD (McRoberts, 2011). Em projetos que envolvem registro de dados, áudio, vídeo, entre outros, o armazenamento interno dos microcontroladores, na maioria das vezes é insuficiente. Cartões SD são módulos compactos capazes de armazenar uma ampla variedade de informações (Adafruit, 2013). Para armazenar os dados dos sensores, utilizou-se o módulo de cartão micro SD da fabricante RobotDyn. Com a utilização do módulo, é possível armazenar informações em cartões micro SD.



**Resistor de Carga.** Para consumir a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, foram utilizados dois resistores de alumínio, um para cada módulo. A resistência necessária de  $11,44 \Omega$  foi calculada através da lei de ohm. O resistor escolhido, é fabricado pela empresa Chanzon, possui 12 ohms e potência máxima de 50 W.

### 3.7 Construção do Protótipo de Rastreador Solar

**Construção do Dispositivo Mecânico.** Para a fabricação das peças do dispositivo mecânico empregou-se processos de usinagem, soldagem e conformação, além de impressão 3D para a fabricação de peças em material polimérico. Os processos de usinagem utilizados na fabricação das peças foram: corte a laser, torneamento e fresamento.

**Construção do Sistema Eletrônico.** A montagem do sistema eletrônico foi realizada para efetuar o controle de rotação e sentido dos motores, com base na leitura dos sensores de luz. Esse sistema também é responsável pela leitura dos sensores de tensão e corrente. O circuito foi montado em uma placa padrão tipo ilha. Utilizou-se conectores para a comunicação do microcontrolador com os interruptores fim de curso, sensores de luz e pontes H.

## 4. ENSAIO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a finalização da construção do modelo didático de rastreador solar, foi possível realizar o ensaio experimental, apresentado na Fig. 8, e a coleta de dados. Para o teste, um dos módulos foi fixado ao protótipo de seguidor solar, enquanto o outro módulo foi posicionado de forma fixa, com angulação de  $28^\circ$  norte, conforme recomendado, de acordo com a irradiação solar média, para a região de Passo Fundo (CRESESB, 2023). O ensaio experimental foi realizado dia 10 de outubro de 2023. De acordo com as informações meteorológicas fornecidas pela Embrapa Trigo (2023), foi possível registrar 11,2 horas de insolação e temperatura média de  $19,7^\circ\text{C}$ . O experimento teve início às 07h25 e foi concluído às 18h15. Durante o experimento, os dados foram coletados com intervalo de um minuto, registrando informações de data, hora, nível de luminosidade, tensão, corrente e potência de cada módulo fotovoltaico.



Figura 8 - Configuração do ensaio experimental realizado (Fonte: Autores, 2023).

Com base nos dados coletados durante o ensaio dos dois sistemas, foi elaborado um gráfico da potência em mW em função do tempo. A Fig. 9 apresenta os resultados, respectivamente, do módulo fixo e do módulo com rastreador.

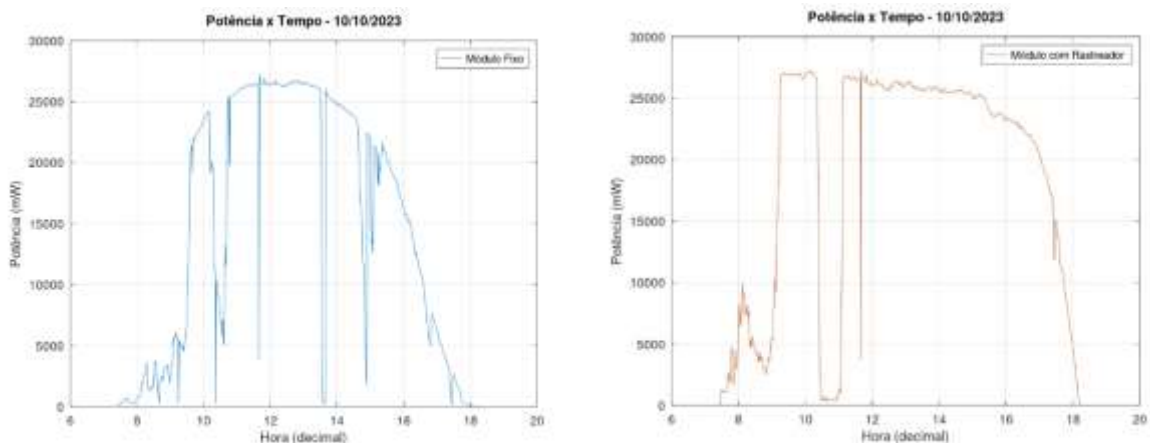


Figura 9 - Potência em função do tempo (Fonte: O Autor, 2023).

Analisando os gráficos, pode-se verificar que o sistema de angulação fixa apresentou uma curva de potência crescente até atingir o pico de geração, entre 12h00 e 13h00, após esse intervalo, começou a reduzir até atingir valor mínimo na conclusão do ensaio experimental, às 18h15. Enquanto que com a utilização do protótipo de rastreador solar, a curva de potência atingiu o pico de geração após as 9h00, que se manteve de forma constante até aproximadamente 15h00, quando começou a reduzir de forma lenta, até a conclusão do ensaio experimental.

Após analisar as duas curvas obtidas, pode-se verificar a presença de momentos de queda de potência, que ocorreu em ambos os sistemas no mesmo intervalo de tempo. Essas variações podem ser decorrentes da presença de nuvens, ou sombra gerada por construções. A Fig. 10 abaixo, permite visualizar a variação da luminosidade incidente sobre os sensores de luz utilizados no modelo didático de seguidor solar.

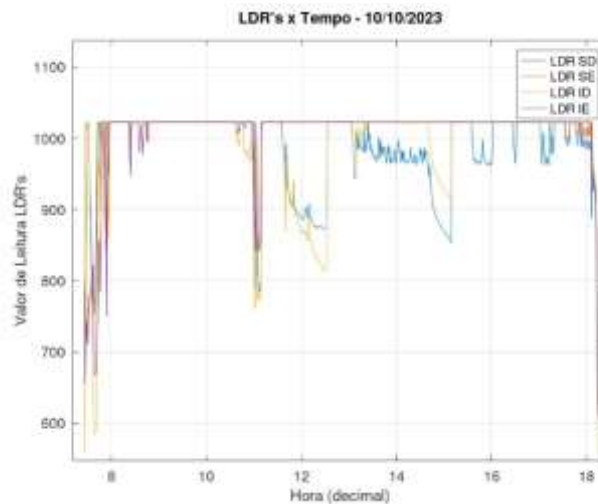


Figura 10 - Valores dos LDR's em função do tempo (Fonte: Autores, 2023).

Através do gráfico, é possível afirmar que os momentos de menor luminosidade, coincidem com os horários de queda de potência verificados anteriormente. Logo, pode-se verificar que o protótipo de rastreador solar cumpriu com seu objetivo de forma satisfatória.

Com os experimentos realizados, também foi possível elaborar uma tabela comparativa para os dois sistemas, fixo e com rastreador solar. A Tab. 2 abaixo apresenta a média para os valores de corrente, tensão, potência e horas de sol pleno de cada módulo fotovoltaico utilizado no ensaio experimental.

Tabela 2 - Comparativo da tensão do módulo fixo com o módulo com rastreador (Fonte: Autores, 2023).

|                        | Módulo Fixo | Módulo Rastreador | Ganho |
|------------------------|-------------|-------------------|-------|
| Tensão média (V)       | 12,19       | 14,28             | 17,2% |
| Corrente média (mA)    | 994,51      | 1166,73           | 17,3% |
| Potência média (mW)    | 14906,54    | 18781,49          | 26,0% |
| Horas de Sol Pleno (h) | 5,38        | 6,78              | 26,0% |

Sistemas de rastreamento solar com um ou dois eixos, apresentam vantagem na geração de energia quando comparados a sistemas fixos, apresentando um aumento de eficiência entre 10% e 55%, dependendo da localização geográfica. Todavia, um aumento de 20% já é considerado um ganho relevante para sistemas com dois eixos (Soulayman, 2018). O protótipo desenvolvido apresentou um ganho de 26%, portanto enquadra-se dentro da faixa esperada de aumento de eficiência.

## 5. CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento do protótipo de estudo, foi possível comparar a geração de um módulo fixo, seguindo as recomendações para o local de instalação, com a geração de um módulo fotovoltaico com rastreamento solar. O ensaio experimental realizado proporcionou a coleta de dados, os quais foram analisados de modo a verificar um ganho de 26% com a utilização do rastreador solar de dois graus de liberdade, ficando dentro da faixa esperada pela literatura, entre 10% e 55%. Portanto, o ganho obtido é considerado satisfatório, pois foi superior a 20%.

Em relação à perspectiva educacional, o modelo didático projetado atende as necessidades de docentes. Por possuir pequenas dimensões, e, relativamente, baixo custo, o protótipo pode ser facilmente replicado e transportado. Uma vez que o modelo não é um simulacro, e sim trata-se de um seguidor solar em escala reduzida, com testes comprovando sua eficiência, os alunos podem realizar seus próprios ensaios e comparações.



## Agradecimentos

O trabalho teve apoio do Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSul) e da empresa GECE Corte a Laser e Dobra.

## REFERÊNCIAS

- Adafruit, 2022. A Deep Dive into the Many Favors of H-Bridge Motor Drivers. Nova Iorque. Disponível em: <https://blog.adafruit.com/2022/10/21/a-deep-dive-into-the-many-favors-of-h-bridge-motor-drivers/>. Acesso em: 9 out. 2023.
- Adafruit, 2013. Micro SD Card Breakout Board Tutorial. Nova Iorque. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-micro-sd-breakout-board-cardtutorial>. Acesso em: 12 out. 2023.
- Adafruit, 2023b. Breakout Boards. Disponível em: <https://www.adafruit.com/category/42>. Acesso em: 12 out. 2023.
- Adafruit, 2023c. INA219 High Side DC Current Sensor Breakout - 26V  $\pm$ 3.2A Max - STEMMA QT. Nova Iorque. Disponível em: <https://www.adafruit.com/product/904>. Acesso em: 8 out. 2023.
- Adafruit, 2023a. Teensy 3.2 + header. Nova Iorque. Disponível em: <https://www.adafruit.com/product/2756>. Acesso em: 10 out. 2023.
- Arnaudov, K., Karaivanov, D. P., 2019. Planetary Gear Trains. 1.ed. CRC Press.
- Carneiro, P. H. G., 2022. O Uso da Energia Fotovoltaica para o Ensino de Física no Ensino Médio. Dissertação de Mestrado, MNPEF, UNIR, Jí-Paraná.
- CRESESB, 2023. Potencial Solar - SunData v 3.0. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 5 set. 2023.
- Dantas, A. P. J., Dantas, T. A. V., De Farias, M. I. R., Da Silva, R. P., Da Costa, N. P., 2016. Importância do Uso de Modelos Didáticos no Ensino de Citologia. III CONEDU – Congresso Nacional de Educação, Natal.
- Embrapa Trigo, 2023. Laboratório de Agrometeorologia. Passo Fundo. Disponível em: <https://www.embrapa.br/trigo/infraestrutura/agrometeorologia/laboratorio-agrometeorologia>. Acesso em: 5 set. 2023.
- Matos, C. H. C, De Oliveira, C. R. F., Santos, M. P. F, Ferraz. C. S., 2009. Utilização de Modelos Didáticos no Ensino de Entomologia. Revista de Biologia e Ciências da Terra, vol. 9, n. 1, Pernambuco.
- McRoberts, M., 2011. Arduino Básico. 1. Ed. Novatec, São Paulo.
- Norton, R. L., 2013. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4.ed. Bookman, Porto Alegre.
- Pinho, J., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Cresesb, Rio de Janeiro.
- PJRC, 2023. Teensy® USB Development Board. PJRC Electronic Projects. Disponível em: <https://www.pjrc.com/teensy/#:~:text=The%20Teensy%20is%20a%20complete,done%20via%20the%20USB20p>. Acesso em: 13 out. 2023.
- Roggia, L., Fuentes, R. C., 2016. Automação Industrial. 1. ed. Rede e-Tec Brasil, Santa Maria.
- Soulayman, S, 2018. Economical and Technical Considerations for Solar Tracking: Methodologies and Opportunities for Energy Management. 1. ed. IGI Global.
- Souza, R. S., Jesus, N. M. R., Souza, T. M., Castro, T. S., 2021. Rastreadores solares: uma revisão bibliográfica. Sodebras, vol.18, n. 214, São Paulo.
- Villalva, M. G., 2016. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 2. ed. Érica, São Paulo.

## DESIGN AND DEVELOPMENT OF A TWO DEGREE OF FREEDOM SOLAR TRACKER PROTOTYPE

**Abstract.** *Solar tracking devices, also known as solar trackers, are used in industry to orient photovoltaic modules according to the position of the Sun, which varies throughout the year. The use of tracking systems allows the solar incidence to be increased, approximately, normally to the face of the modules, maximizing photovoltaic energy generation. In an educational context, the understanding of sciences encompasses concepts that are difficult to understand, the visualization of a 3D structure tends to facilitate this learning process. Therefore, this article seeks to develop a didactic model of a two-degree-of-freedom solar tracker, which was used to compare the energy generation of a fixed-angle photovoltaic module with the generation of a module with solar tracking. To achieve the intended goal, firstly, both a photovoltaic module and an electrical actuator were selected to compose the system, in which it was later possible to develop a mechanical project and static simulations. With the completion of the mechanical project, an electrical system was developed to control and collect data from the solar tracker prototype. Finally, it was possible to make an experimental test, data collection and analysis. The result obtained, a 26% increase in efficiency with the use of the solar tracker, was positive, proving a satisfactory performance in accordance with the literature consulted. Due to its small dimensions and low weight, the didactic model satisfies the needs of educators, as well as enabling interaction with students.*

**Keywords:** *Solar Energy, Solar Trackers, Didactic Model.*