

Originais recebidos em 08/12/2022. Aceito para publicação em 01/09/2023.  
Avaliado pelo sistema *double blind peer review*. Publicado conforme normas da ABNT.  
*Open access free available online.*  
DOI: <https://doi.org/10.35700/2316-8382.2023.v1n13.3511>

# DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Gabriel Andreatta – <https://orcid.org/0000-0002-7060-6695><sup>1</sup>

Rafaela Moreno da Silva – <https://orcid.org/0009-0003-0702-1365><sup>2</sup>

Jacson Rodrigo Dreher – <https://orcid.org/0009-0004-6599-2140><sup>3</sup>

Leandro Chies – <https://orcid.org/0000-0001-7463-4688><sup>4</sup>

## RESUMO

Devido ao custo dos sistemas fotovoltaicos, a eficiência na geração de energia é um fator muito importante, que vem impulsionando estudos e pesquisas. A conversão da energia radiante do sol em energia elétrica é dependente da irradiância. Para determinada irradiância, existe uma potência elétrica máxima que o módulo pode fornecer, denominada ponto de máxima potência. Para que essa potência seja transferida, é necessário implementar técnicas de rastreamento da máxima potência. E, para validação dessas técnicas é desejável um ambiente controlado que não dependa das condições climáticas. Diante disso, este trabalho desenvolveu um sistema que controla a emissão de radiação por meio de LEDs (do inglês – light-emitting diode), para induzir a geração de energia elétrica num módulo fotovoltaico de 30 W. Nesse sistema, é possível escolher uma faixa de irradiância entre 100 e 500 W/m<sup>2</sup>, facilitando a realização de testes, com condições de irradiância controladas. O resultado do projeto é uma bancada para fins didáticos e de pesquisa, que possibilita a obtenção das curvas de corrente em função da tensão (I-V) do módulo para diferentes irradiâncias. Dessa forma, é possível testar técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência e também conversores eletrônicos dedicados à geração fotovoltaica.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica. Testes de conversores. Rastreamento máxima potência. Bancada didática.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Chapecó, e-mail: [gabriel.a12@aluno.ifsc.edu.br](mailto:gabriel.a12@aluno.ifsc.edu.br)

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Chapecó, e-mail: [rafaela.m26@aluno.ifsc.edu.br](mailto:rafaela.m26@aluno.ifsc.edu.br)

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: [jacson@ifsc.edu.br](mailto:jacson@ifsc.edu.br)

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: [leandro.chies@ifsc.edu.br](mailto:leandro.chies@ifsc.edu.br)

# DEVELOPMENT OF A PHOTOVOLTAIC ENERGY TEACHING BENCH

## ABSTRACT

Due to the cost of photovoltaic systems, efficiency in energy generation is a very important factor, which is driving studies and research. The conversion of the sun's radiant energy into electrical energy is dependent on irradiance. The module can provide a maximum electrical power for a given irradiance, known as the maximum power point. In order for this power to be transferred, it is necessary to implement maximum power tracking techniques. To validate these techniques, a controlled environment that does not depend on weather conditions is desirable. In view of this, this work has developed a system that controls the emission of radiation by means of LEDs (light-emitting diodes) to induce the generation of electricity in a 30 W photovoltaic module. In this system, choosing an irradiance range between 100 and 500 W/m<sup>2</sup> is possible, making it easier to carry out tests under controlled irradiance conditions. The result of the project is a bench for teaching and research purposes, which makes it possible to obtain the module's current voltage (I-V) curves for different irradiances. In this way, it is possible to test techniques for tracking the maximum power point and electronic converters dedicated to photovoltaic generation.

**Palavras-chave:** Photovoltaic Energy. Converter tests. Maximum power tracking. Didactic bench.

## INTRODUÇÃO

A utilização de fontes renováveis de energia vem crescendo em todo o mundo e a participação das fontes renováveis na geração global de energia passou de 27% em 2019 para 29% em 2020, com aumento de 7% na geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. O relatório da *International Energy Agency* (IEA) prevê ainda uma continuidade nessa ampliação da presença de energia solar fotovoltaica, com crescimento mundial médio de 15% ao ano até 2030 (IEA, 2021). No Brasil, também se observa uma ampliação, como a que se deu a partir da Resolução Normativa nº 482/2012, emitida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que possibilitou a micro e minigeração de energia distribuída a partir de fontes renováveis.

Em relação a seus tipos, quando a geração é fotovoltaica, pode ser *on-grid* ou *off-grid*. Os sistemas *on-grid* são compostos pelos painéis fotovoltaicos, um conversor de energia, para elevar a tensão dos painéis, e um inversor, para converter a corrente contínua em alternada. Já os sistemas *off-grid*, que funcionam com o mesmo princípio, não necessitam de conexão com a rede de distribuição da concessionária, pois a energia excedente fica alocada em baterias.

Em todos os casos, porém, apesar das inúmeras vantagens ligadas à utilização de sistemas de energia solar, a maioria dos painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado ainda apresenta eficiência inferior a 20%. De acordo com dados do Portal Solar, as células fotovoltaicas dos módulos de silício policristalino apresentam uma eficiência de 15% a 17%. Ainda, a energia elétrica produzida pelo módulo depende diretamente da irradiação absorvida. Quanto maior a irradiação, maior a corrente elétrica que o módulo pode fornecer e maior será a sua tensão de saída, o que afeta a potência elétrica máxima entregue pelo sistema. A utilização de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, chamadas MPPT (do inglês – *Maximum Power Point Tracking*), garantem que a tensão fique no nível em que a transferência de potência seja máxima (Silva, 2015).

Essas técnicas de MPPT, como, por exemplo, *P&O* (do inglês – *Perturb and Observe*), podem ser implementadas em plataformas de prototipagem eletrônica, como Arduino®, a qual controla os conversores de energia CC-CC ou CC-CA. É possível verificar a eficiência de tais técnicas utilizando-se de um módulo fotovoltaico e de um medidor da irradiância solar. Entretanto depender da irradiância solar dificulta e reduz a confiabilidade de resultados experimentais de pesquisas, já que ela varia de acordo com as condições climáticas (dias ensolarados, nublados, estações do ano, entre outras).

Um desses experimentos foi realizado por Bazzi *et al.* (2012), que apresentaram um simulador solar baseado em diodos emissores de luz (do inglês – *Light Emitting Diodes - LED*) para testes de células solares e outros dispositivos fotossensíveis, abordando espectros de LED, conversores de energia para seu acionamento.

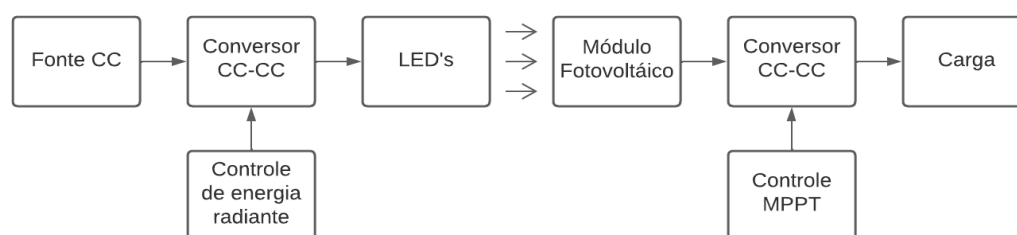
Também Vicente, Reis e Vicente (2015) desenvolveram um simulador solar com irradiação emitida por diferentes tipos de LEDs para teste de módulos fotovoltaicos. Os resultados experimentais foram aplicados a uma célula fotovoltaica de apenas 1W como demonstração do conceito e os valores de irradiação foram estimados, com base nas curvas corrente versus tensão da célula. Não houve relação entre a corrente de alimentação dos LEDs e a irradiação emitida.

Ainda Buso, Spiazzi e Meneghini (2013) desenvolveram um gerador solar com irradiância controlada por LEDs que possibilita testes dinâmicos controláveis em um módulo fotovoltaico de 35W. A luz é gerada por 1.344 LEDs individuais distribuídos em uma placa de circuito impresso de 0,44m<sup>2</sup>, alimentados por 24 conversores do tipo *buck*, tornando o *hardware* complexo.

E Leite *et al.* (2021) apresentaram em seu trabalho uma proposta de bancada para teste de controle de células fotovoltaicas para fins educacionais e de pesquisa. A emissão de luz é feita a partir de LEDs e lâmpadas de luz mista. A coleta de dados e o controle da bancada é realizado por um sistema supervisor em um microcomputador. Entretanto o trabalho não apresentou dados suficientes para que fosse replicado neste projeto.

Diante disso, este trabalho apresenta a implementação de uma bancada didática de energia fotovoltaica, de construção simplificada, empregando a tecnologia de COB (*Chips on Board*) controlados por um único conversor CC-CC. O gerador possibilita testes dinâmicos com condições de irradiância controláveis para fins didáticos e de pesquisa, a fim de demonstrar o princípio de funcionamento do módulo fotovoltaico e testar algoritmos e técnicas de rastreamento de máxima potência e o uso de conversores eletrônicos para aplicações fotovoltaicas. Tal sistema é apresentado na Figura 1. Os COB LEDs induzem a geração de energia do módulo e, dessa maneira, a emissão de energia radiante dentro do comprimento de onda sensível ao módulo fotovoltaico pode ser controlada, simulando variações rápidas e pré-determinadas. A energia radiante emitida é controlada pela corrente entregue aos COB LEDs pelo conversor CC-CC, o qual é controlado por um microcontrolador que possui uma interface homem-máquina (IHM) para o ajuste dos parâmetros e visualização de variáveis tais como: tensão, corrente nos terminais do módulo e a razão cíclica do conversor CC-CC. A energia gerada pelo módulo fotovoltaico é transferida para uma carga resistiva, por meio do conversor CC-CC controlado por outro microcontrolador que possibilita a implementação do MPPT.

**Figura 1** – Diagrama em blocos do sistema proposto



Fonte: Autoria própria (2022)

## GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Módulos fotovoltaicos são dispositivos que convertem diretamente a energia radiante solar em energia elétrica. Células fotovoltaicas são agrupadas para formar um módulo. Uma célula é basicamente um diodo semicondutor, cuja junção PN fica exposta à energia radiante solar. Células comerciais são fabricadas principalmente com o silício monocristalino ou silício policristalino. São compostas por uma fina camada de silício, em que um dos lados é dopado para formar uma junção PN. Uma fina grade metálica é aplicada na superfície do semicondutor voltada para o sol. A incidência de energia radiante gera corrente elétrica se os terminais da célula forem curto-circuitados e se a energia do fóton incidente é suficiente para separar os elétrons do semicondutor. Tal fenômeno dependerá do material semicondutor e do comprimento de onda da energia radiante incidente (Villalva; Gazoli; Ruppert Filho, 2009).

O modelo elétrico básico de uma célula fotovoltaica ideal é composto por uma fonte de corrente e um diodo em paralelo. Entretanto os painéis fotovoltaicos são formados por várias células conectadas, tornando necessário incluir outros parâmetros no modelo que são a resistência série com os terminais de saída ( $R_s$ ) e resistência paralela ( $R_p$ ) à fonte e ao diodo.

A equação 1 modela a corrente de saída  $I$  do módulo fotovoltaico, na qual  $I_{pv}$  é a corrente gerada pela irradiância solar,  $I_0$  é a corrente saturação reversa da junção PN,  $V$  é a tensão nos terminais de saída do módulo e a constante  $a$  é o fator de idealidade do diodo.  $V_t$  é expressa pela equação 2 que indica a tensão térmica do módulo, sendo que  $N_s$  representa o número de células que estão conectadas em série,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura em Kelvin e  $q$  é a carga do elétron (Villalva; Gazoli; Ruppert Filho, 2009).

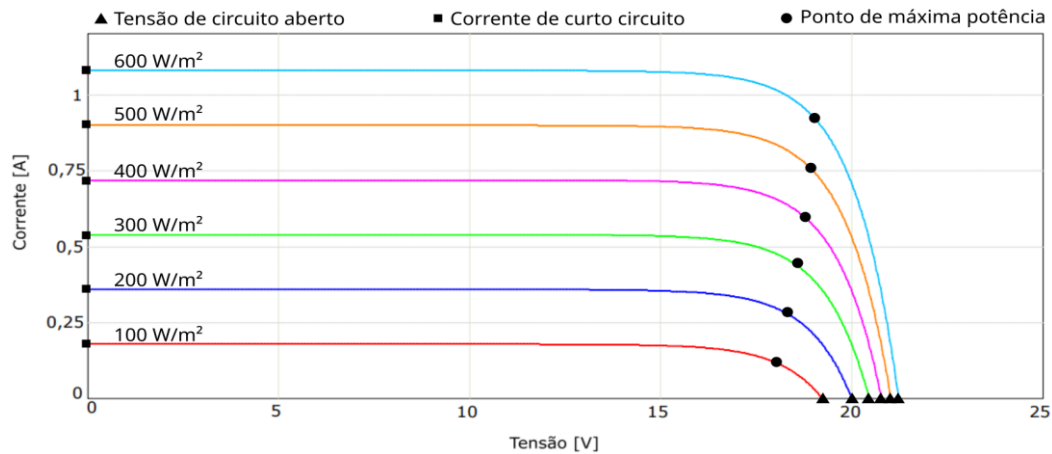
$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (2)$$

A equação 1 origina a curva I-V mostrada na Figura 2, em que estão destacados os seguintes pontos: ponto de máxima potência (MPP), no qual a corrente ( $I_{mp}$ ) e tensão ( $V_{mp}$ ) do módulo fornecem a máxima potência; corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), em que a tensão é zero, e a corrente de saída é máxima; e circuito tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), na qual a corrente é zero, e a tensão de saída é máxima (Villalva; Gazoli; Ruppert Filho, 2009).

É possível verificar que quanto maior a irradiância, maior será a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico. Por outro lado, deve-se observar a tensão de saída do módulo que também é dependente da corrente e afeta a potência entregue pelo módulo. Por exemplo, para a irradiância de  $200 \text{ W/m}^2$  o ponto de potência máxima de  $5,2 \text{ W}$ . A corrente de curto-circuito é  $0,38 \text{ A}$ , e a tensão de circuito aberto é de  $20 \text{ V}$ .

Figura 2 – Curva I x V característica do módulo solar *SunEnergy 30 Wp* para diferentes irradiâncias



Fonte: Autoria própria.

Além da irradiância, o comprimento de onda incidente também afeta a geração fotovoltaica. A Eficiência Quântica Externa (EQE) é a razão entre o número de portadores de carga coletados pela célula solar e o número de fótons de uma determinada energia que incide na célula solar de fora. Em Kinsey (2015) é possível verificar a EQE de módulos fotovoltaicos construídos com diferentes materiais, em função do comprimento de onda incidente. Dentre eles, estão os materiais mais comercializados, que são o silício policristalino (multi-Si) e o silício monocristalino (mono-Si). Para o silício policristalino, a eficiência quântica máxima é de 90% para comprimento de onda próximo a 700 nm e acima de 85% entre o intervalo que vai de 400 nm a 1000 nm.

Buso, Spiazzi e Meneghini (2013) demonstram, em seu trabalho, que a utilização de LEDs para induzir a geração de energia fotovoltaica deve considerar os seguintes requisitos de projeto: a uniformidade espacial da luz, o espectro da radiação emitida pelos LEDs e a energia radiante necessária. No espectro de potência média medido em diferentes níveis de corrente para um LED modelo W724CO *white*, verifica-se que a maior densidade de potência radiante está próxima ao comprimento de onda de 450 nm, estando dentro da região de maior EQE do silício policristalino (multi-Si). Além disso, ainda de acordo com o trabalho citado, a potência radiante média é obtida pela integração das curvas de potência radiante em relação ao comprimento de onda. Pode-se concluir que a potência radiante emitida por LEDs, que está dentro do espectro sensível dos módulos, pode ser aproveitada para induzir a geração de energia elétrica nos módulos fotovoltaicos multi-Si e mono-Si.

## TÉCNICAS MPPT

Com o intuito de maximizar a energia produzida e, dessa forma, reduzir o tempo de amortização do investimento na implantação de um gerador fotovoltaico, deve-se sempre buscar o ponto de maior potência do módulo fotovoltaico, levando a uma maior produção de energia (Faranda *et al.*, 2008).

A Figura 3(b) mostra a potência de saída em função da tensão no módulo *SunEnergy 30Wp*, para diferentes níveis de irradiação solar. Nela se observa que se deve buscar o ponto em que a derivada da curva da potência é igual a zero. E os sistemas fotovoltaicos possuem controladores que implementam técnicas que buscam esse ponto. Dentre as técnicas clássicas de MPPT, podem-se citar: InC (do inglês – *Incremental Conductance*), FOCV (*Fractional Open-Circuit Voltage*), FSCC (*Fractional Short Circuit Current*), HC (*Hill Climbing*), P&O (*Perturb and Observe*), P&O (*Variable Step Size*), CV (*Constant Voltage*) (Bollipo *et al.*, 2020).

Os algoritmos de MPPT buscam a máxima potência, alterando parâmetros do sistema, como ciclo de trabalho ou frequência de chaveamento dos conversores de energia. Dentre as diversas técnicas de MPPT, uma das mais utilizadas na literatura é a P&O. Ela opera incrementando ou decrementando a razão cíclica, até que a potência gerada seja a maior possível para o sistema. Para medir a potência, são usados dois sensores: um responsável pela leitura da tensão e o outro, pela corrente no módulo fotovoltaico (Bollipo *et al.*, 2020).

O algoritmo P&O é relativamente simples de implementar em microcontroladores. Basicamente, a cada ciclo de execução, o algoritmo faz o cálculo da diferença da potência ( $\Delta P$ ) e da tensão ( $\Delta V$ ) em relação aos valores anteriores. As condições de mudança do módulo de tensão partem do resultado dessas variáveis. Por exemplo, quando a variação de potência e a variação de tensão são positivas, há um decréscimo na razão cíclica do conversor. Já quando são negativas, há um incremento.

Uma variação do método P&O é o método de passo variável, cuja implementação consiste basicamente no módulo da perturbação ser maior quando o sistema está longe do ponto de máxima potência e menor em módulo quando alcança o MPP (Bollipo *et al.*, 2020). A literatura apresenta vários meios de implementação do algoritmo do passo variável. Mohapatra *et al.* (2019) realizam uma perturbação na corrente do módulo ao invés da tensão, a fim de melhorar a velocidade da busca. Os autores afirmam que o método de rastreamento é mais rápido e tem menos oscilação da potência, tensão e corrente no módulo, comparado ao método P&O convencional. John *et al.* (2017) também propõem um método do P&O com passo variável. No seu algoritmo, a variação da tensão é dividida pela variação da potência, a qual é comparada com um erro, e define um passo pequeno ou grande, ambos fixos. O intuito é que o algoritmo use o passo grande quando está longe do MPP e use o passo pequeno quando está próximo. Uma comparação entre os métodos é feita por Bollipo *et al.* (2020), os quais concluem que o método P&O é de baixa complexidade. A implementação de métodos melhorados de P&O apresenta uma complexidade maior, porém a velocidade e precisão de busca são maiores.

## METODOLOGIA

Considerando-se que o objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de uma bancada didática, optou-se por um módulo fotovoltaico de 30 W para facilitar a sua mobilidade. A Tabela 1 mostra as especificações do módulo *Sun Energy* com eficiência de 13,2%, potência máxima 30 W na irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>, sendo o ponto de máxima potência na tensão de 18,5 V e corrente de 1,66 A.

Tabela 1 – Especificações do módulo Fotovoltaico *SunEnergy* 30 Wp

Potência Máxima	30 W
Tensão MPP	18,15 V
Corrente MPP	1,66 A
Tensão Circuito Aberto	21,80 V
Corrente Curto-Circuito	1,80 A
Eficiência	13,20%



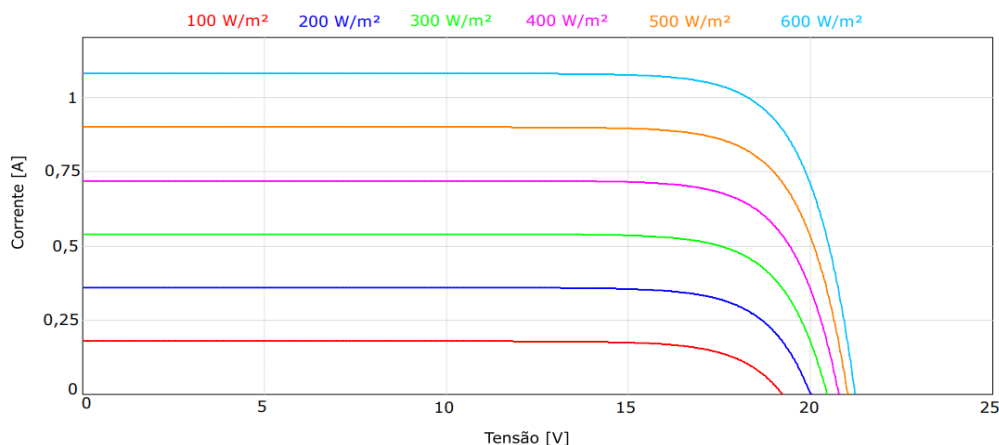
Dimensões	650x360x25 mm
Células	36

Fonte: Sunenergy (2022)

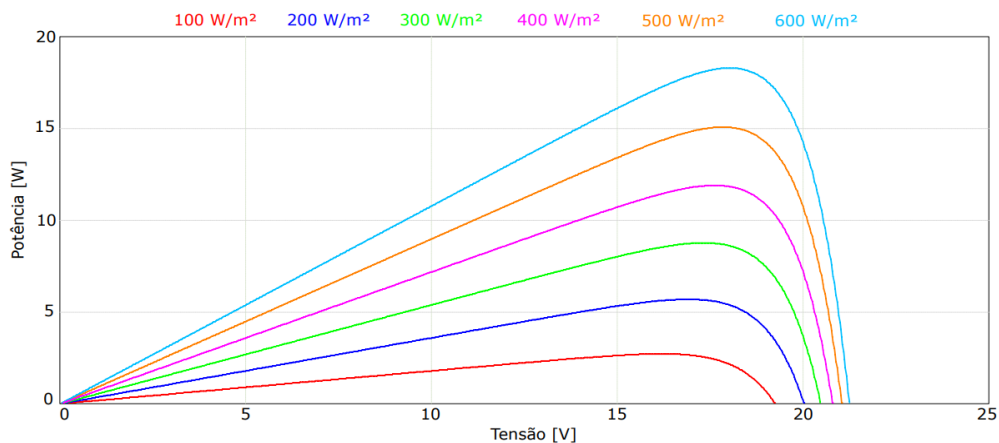
A partir dos parâmetros do módulo fotovoltaico, foram obtidas as curvas características de corrente pela tensão (I-V) e de potência pela tensão (P-V) no *software* PSIM®. A Figura 3(a) mostra a relação de corrente e tensão para diferentes valores de irradiância. Pode-se observar que, em uma irradiância de 400 W/m², a corrente de curto-circuito é de aproximadamente 0,7 A e a tensão de circuito aberto é aproximadamente 21 V. Quanto maior a irradiância, maior será a corrente gerada. A Figura 3(b) mostra a relação entre a potência e a tensão para diferentes irradiâncias, na qual é possível identificar o ponto de máxima potência.

Para o dimensionamento do sistema de iluminação por LEDs, optou-se por definir a potência elétrica necessária, a partir da eficiência do módulo fotovoltaico e da eficiência média aproximada de LEDs comerciais. Considerando-se o rendimento do módulo fotovoltaico ( $\eta_{módulo}$ ) de 13,2%, sua potência nominal máxima ( $P_V$ ) de 30 W, e considerando eficiência média da conversão da energia elétrica em energia radiante pelos LEDs ( $\eta_{LED}$ ) de 20%, foi possível estimar a potência elétrica necessária em 1.153,8 W com a equação 3:

Figura 3 – Curvas características do módulo solar SunEnergy 30 wp



(a) Corrente x Tensão para diferentes irradiâncias



(b) Potência x Tensão para diferentes irradiâncias

Fonte: Autoria própria (2022)

$$P_{LED} = \frac{P_V}{\eta_{módulo} \times \eta_{LED}} \quad (3)$$

Com vistas a melhorar a densidade de potência, para a construção da lâmpada, optou-se pela utilização da tecnologia de COB (*Chips on Board*) LEDs de 50 W, cujas características são mostradas na Tabela 2. Para evitar um desgaste térmico, dimensionou-se o número de COB LEDs considerando a metade da potência máxima informada pelo fabricante. Dessa forma, estimou-se a necessidade de 46 LEDs para atingir a potência de 1.153,8 W.

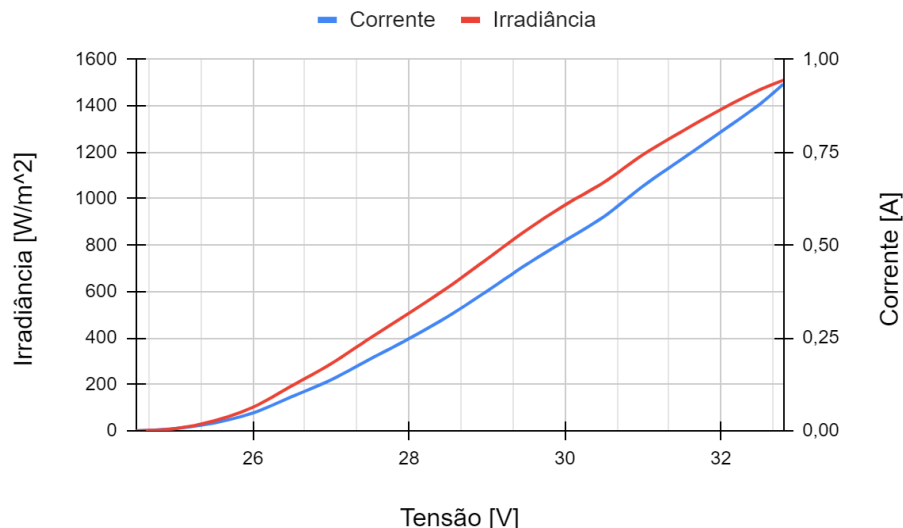
Tabela 2 – Características COB LED

Potência Máxima	50 W
Tensão Entrada	28 - 34 V
Corrente Máxima	1 A
Dimensões	42x42x4 mm
Eficiência Luminosa	90-120 Lúmens/W

Fonte: Zero 41 LED (2022)

A irradiância incidente no painel gerada por um COB LED foi medida com o *Instrutherm* MES-100 com o intuito de obter a curva de irradiância e de corrente em função da tensão aplicada de um COB LED. A irradiância foi medida à distância de 30 mm. Na figura 4, pode-se observar que, quando aplicada uma tensão acima de 26 V, tanto a corrente como a irradiância passam a ter um comportamento aproximadamente linear, característica importante para o controle da energia radiante. Também se verifica que a irradiância máxima, considerando o limite de tensão informado pelo fabricante, é de 1500 W/m<sup>2</sup>.

Figura 4 – Irradiância e corrente pela tensão em um COB LED a 30 mm de distância



Fonte: Autoria própria (2022)



Com base nas características elétricas dos COB LEDs, foi possível definir a tensão e corrente da fonte de alimentação. Optou-se pela conexão paralela dos COB LEDs alimentados por uma fonte de 30 V com corrente máxima de 45 A. O controle da tensão aplicada nos COB LEDs é realizado por um conversor CC-CC do tipo *buck-boost*. O projeto do conversor foi definido considerando-se os níveis de tensão e correntes necessários, para uma irradiância mínima de 100 W/m<sup>2</sup> e máxima de 500 W/m<sup>2</sup>. O dimensionamento dos componentes do conversor foi realizado de acordo com a metodologia apresentada por Hart (2012).

Conhecendo o MPP em função da irradiância, obteve-se experimentalmente a razão cíclica do conversor que alimenta os LEDs, a fim de atender os parâmetros de tensão e corrente, além de encontrar o ponto de máxima potência antes simulados, para determinada irradiância. Os resultados dos testes são mostrados na Tabela 3.

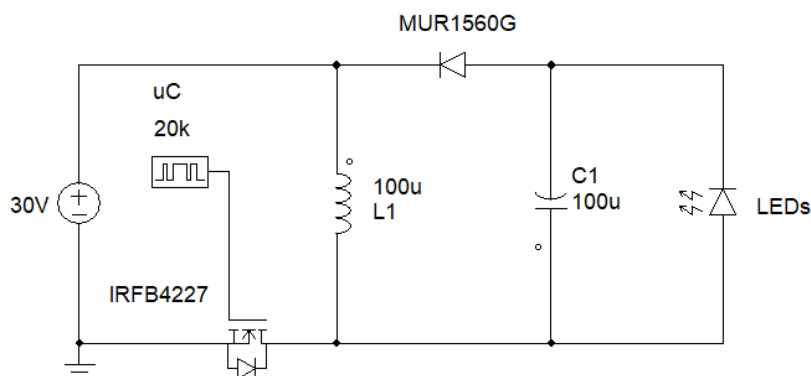
Tabela 3 – Razão cíclica do conversor para algumas faixas de irradiância

Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Corrente no Módulo (A)	Tensão no Módulo (V)	Corrente nos LEDs (A)	Tensão nos LEDs (V)	Razão Cíclica do Conversor (%)
100	0,17	16,17	2,27	26,45	49,27
200	0,34	16,89	4,06	27,04	52,48
300	0,51	17,31	6,62	27,56	55,68
400	0,68	17,60	9,44	28,04	58,89
500	0,85	17,83	13,7	28,77	62,09

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 5 mostra o circuito equivalente do conversor *buck-boost*, simulado no PSIM. Os componentes utilizados na construção do protótipo estão na Tabela 4.

Figura 5 – Circuito equivalente *buck-boost* para controle da irradiância



Fonte: Autoria própria (2022)

O conversor de saída do módulo fotovoltaico foi dimensionado a partir da sua potência máxima, conforme Tabela 1. O projeto foi realizado, conforme a metodologia descrita por Hart (2012). A partir dos dados

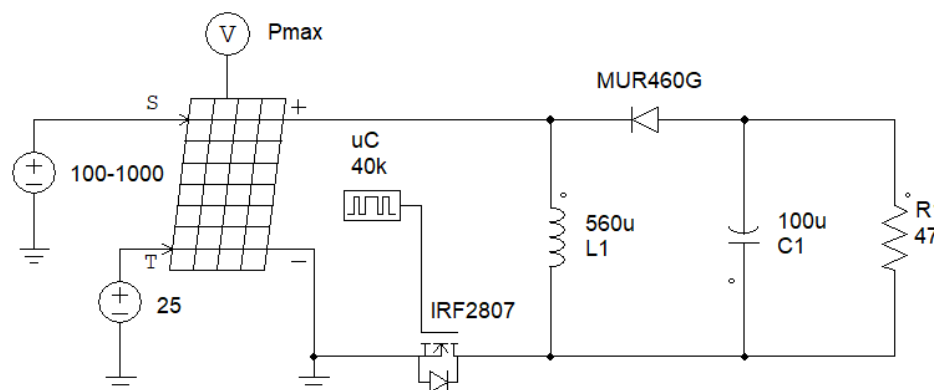
do módulo e de simulações no *software* PSIM®, foi possível obter os valores mínimos e máximos de corrente e tensão na saída do módulo, por meio da variação da irradiância. Quando atribuída uma irradiância de 100 W/m<sup>2</sup>, tem-se uma tensão de 16,5 V e corrente de 0,17 A (mínimos). Quando atribuída uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, tem-se uma tensão de 18,15 V e corrente de 1,66 A (máximo).

O algoritmo implementado no projeto foi o método P&O com passo variável, cujo fluxograma está indicado na Figura 7. Inicialmente, o algoritmo faz uma série de leituras da corrente e tensão nos terminais de saída do módulo fotovoltaico e realiza uma média móvel a fim de obter uma medição mais assertiva. Na sequência, ele faz o cálculo da sua potência, variação da potência, da tensão e da razão, que será utilizada como módulo de incremento ou decremento do ganho do conversor – ou seja, quanto maior a variação da potência e menor a variação da tensão, maior será a variação do ganho. Com base na variação da potência e tensão, o algoritmo decide se deve incrementar ou decrementar o ganho.

O algoritmo foi adaptado para variar o ganho ( $Gain[n]$ ) e, a partir desse ganho, calcular o ciclo de trabalho ( $PWM[n]$ ) para o conversor *buck* por meio da equação 4. O algoritmo foi implementado na plataforma Arduino® Mega 2560.

$$PWM[n] = \frac{Gain[n]}{(Gain[n]+1)} \quad (4)$$

Figura 6 – Circuito equivalente *buck-boost* para o módulo solar



Fonte: Autoria própria (2022)

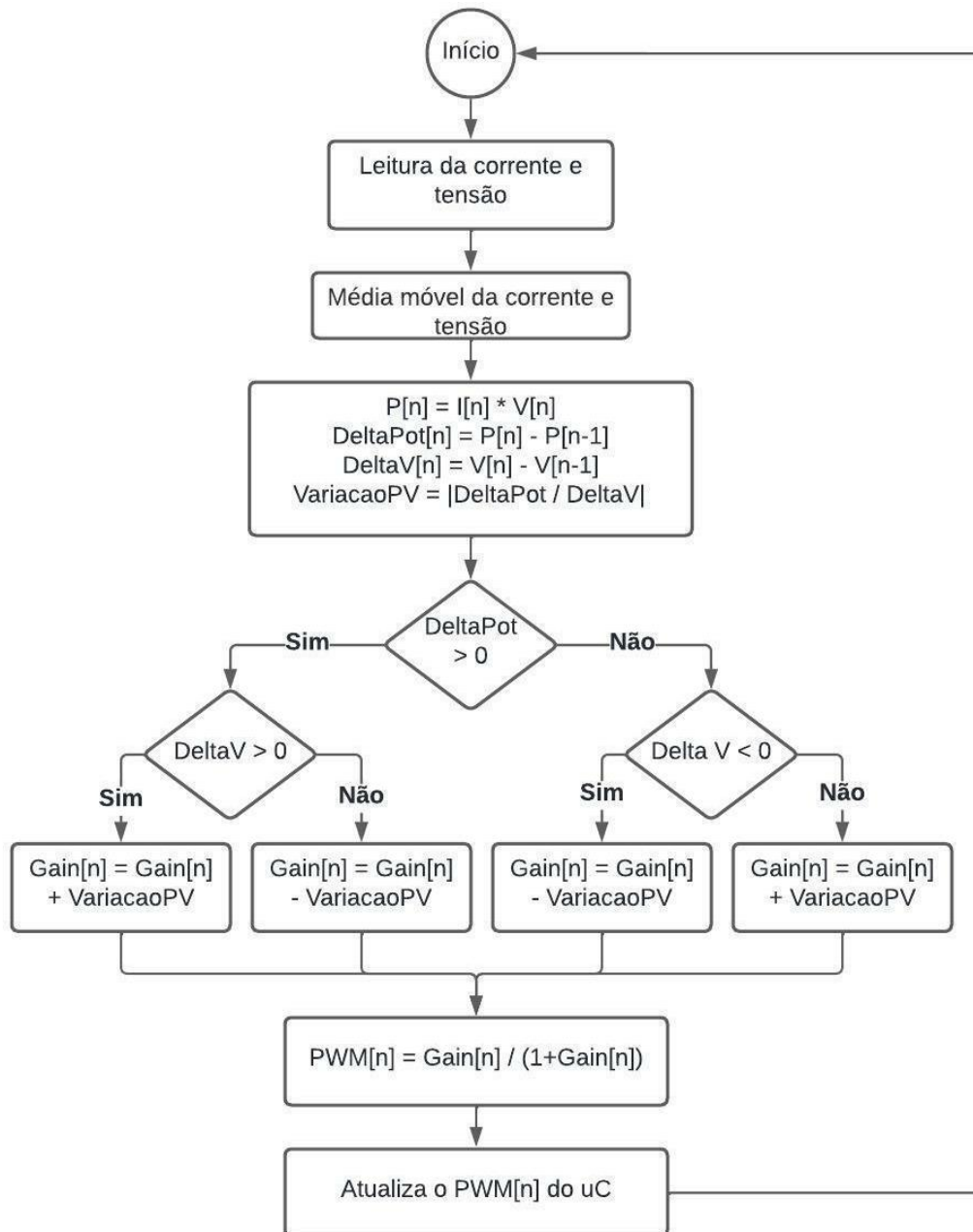
Tabela 4 – Componentes utilizados para os conversores

Dispositivo	Irradiação LEDs	Módulo Solar
Mosfet	IRFB4227	IRF2807
Half-Bridge Driver	IR2104	IR2104
Capacitor	100 uF	100 uF
Indutor	100 uH	560 uH

Diodo	MUR1560G (04 unidades)	MUR460G
Resistor variável	-	3006P-103Lf (10 KΩ)
Sensor de corrente	-	ACS71220A

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 7 – Fluxograma algoritmo P&O com passo variável



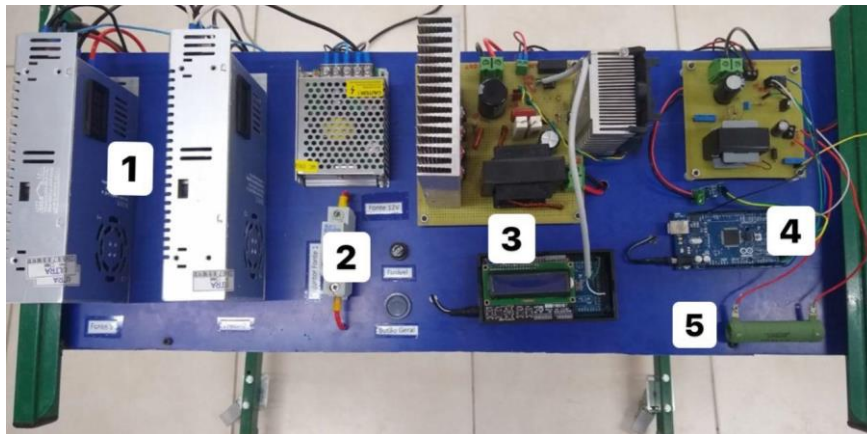
Fonte: Autoria própria (2022)

Na figura 8(a), é possível visualizar a bancada montada com os seguintes equipamentos: as duas fontes de alimentação do sistema em série, sendo 15 V cada uma (1), disjuntor e fusível de proteção para os circuitos

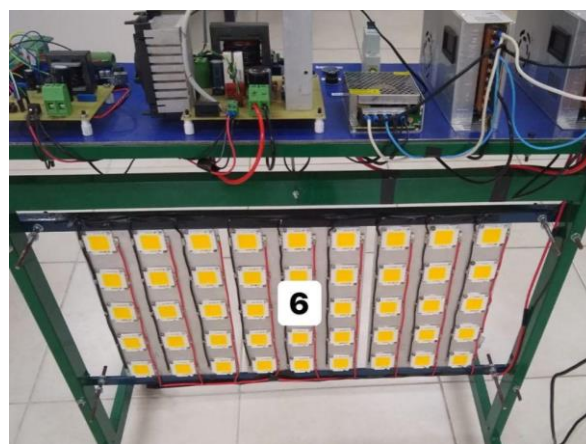
elétricos de potência (2), conversor *buck-boost* para o controle da irradiância (3), conversor *buck-boost* na saída do módulo fotovoltaico (4) e, por fim, uma carga resistiva (5) na qual a potência gerada pelo módulo será dissipada.

Na figura 8(b), mostra-se a distribuição dos COB LEDs (6), sendo que o módulo fotovoltaico é fixado a 25 mm, de tal forma que haja uma incidência direta da energia radiante.

Figura 8 – Bancada didática de energia fotovoltaica



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

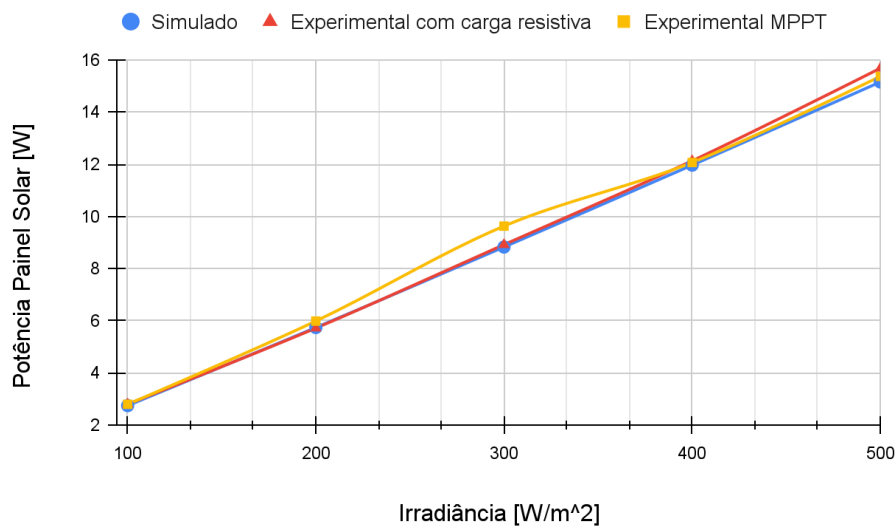
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 9 mostra os resultados experimentais obtidos a partir da aplicação direta de uma carga resistiva variável na saída do módulo fotovoltaico, cujos valores de resistência foram ajustados para se obter o ponto de máxima potência, de acordo com os valores apresentados na Tabela 3 e também a partir da conexão do conversor *buck-boost* na saída do módulo fotovoltaico com a aplicação da técnica MPPT P&O modificada. É possível observar que o comportamento da potência em função da irradiância do módulo é bastante linear, iniciando com potência de 2,74 W em 100 W/m<sup>2</sup>, chegando a 15,15 W em 500 W/m<sup>2</sup> de irradiância. Ao aplicar a carga resistiva diretamente na saída do painel, foi possível obter as mesmas potências máximas, quando comparadas à

simulação, mostrando que os valores de potência encontrados experimentalmente condizem com determinada irradiação aplicada ao módulo. A curva experimental MPPT foi obtida, variando a irradiação e deixando o algoritmo buscar a razão cíclica do conversor *buck-boost* até estabilizar no ponto de máxima potência.

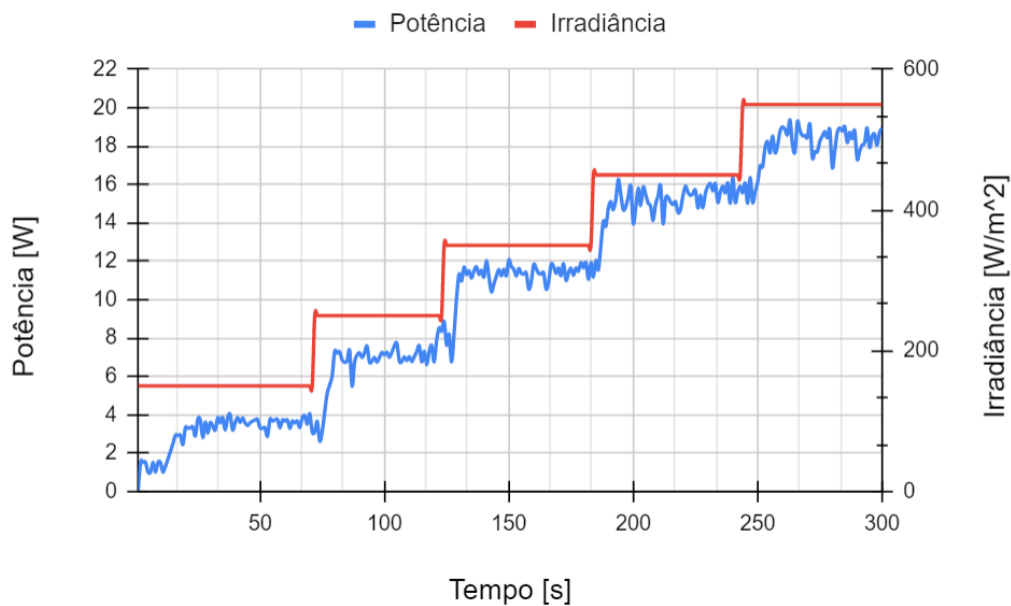
A figura 10 mostra o gráfico de um ensaio realizado para verificar o desempenho do algoritmo MPPT por meio da variação da irradiação. Neste experimento, a cada um minuto, foram acrescentados  $100 \text{ W/m}^2$  manualmente na interface do microcontrolador que controla o conversor *buck-boost* que alimenta os COB LEDs. O algoritmo MPPT deve, então, variar a razão cíclica do conversor a fim de determinar o novo ponto de máxima potência, após cada variação.

Figura 9 – Potência gerada no módulo solar pela irradiação



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 10 – Potência gerada no módulo solar em diferentes faixas de irradiação



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se que o algoritmo encontrou os pontos de máxima potência da forma desejada e condizente com os resultados simulados, encontrando o ponto de máxima em uma média de 5 a 10 segundos. É importante ressaltar que há uma variação significativa de potência quando o algoritmo encontra o ponto de máxima potência, pois se trata de uma característica do próprio algoritmo, porém, com vistas a diminuir essa oscilação, deve-se melhorar a sensibilidade dos sensores de tensão e corrente.

## CONCLUSÃO

A bancada didática é capaz de simular, em laboratório, diversas condições de irradiância de forma controlada, alterando o assim a geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico. O controle da irradiância facilita as demonstrações didáticas, especialmente a relação entre a irradiância, a tensão e a corrente de saída do módulo e seu ponto de máxima potência. É possível controlar o conversor conectado à saída do módulo, de forma manual ou por meio de um algoritmo MPPT. Controlando a razão cíclica do conversor de saída de forma manual, é possível buscar o ponto de máxima potência, visualizando as grandezas de saída como tensão, corrente e potência. Quando o conversor de saída é controlado por meio do algoritmo MPPT, pode-se então demonstrar e comprovar se é capaz de buscar a máxima potência para determinada irradiância. Futuros trabalhos de pesquisa e conclusão de curso poderão utilizar a bancada para testar seus algoritmos. Tais demonstrações são importantes para a compreensão da irradiância na geração de energia, compreensão das curvas de saída do módulo e da importância do MPPT. Os detalhes apresentados neste trabalho possibilitarão, ainda, que outras pesquisas repliquem o projeto.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSC (câmpus Chapecó) pelo fomento financeiro pelo EDITAL 17/2021/PROPPI.

## REFERÊNCIAS

BAZZI, A. M. *et al.* Solid-State Solar Simulator. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 4, p. 1195–1202, jul. 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa nº 487, de 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

BOLLIPO, R. B.; MIKKILI, S.; BONTAGORLA P. K. Critical Review on PV MPPT Techniques: classical, intelligent and optimisation. **IET Renewable Power Generation**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 1433-1452, 12 jun. 2020. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1163>.

BUSO, S.; SPIAZZI, G.; MENEGHINI, M. **Laboratory PV generator for MPPT dynamic response testing.** 2013 Brazilian Power Electronics Conference. Anais... In: 2013 BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (COBEP 2013). Gramado, Brasil: IEEE, out. 2013. Disponível em: <https://sobraep.org.br/artigo/cobep-2013>. Acesso em: 3 ago. 2021



FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. **MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison.** IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: [s.n.]. 2008. p. 1-6.

HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos.** Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.

IEA. **Global Energy Review 2021.** Paris: International Energy Agency, 2021a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>>. Acesso em: 28 jul. 2021.

JOHN, R.; MOHAMMED S, S; ZACHARIAH, R. **Variable Step Size Perturb and Observe MPPT Algorithm for Standalone Solar Photovoltaic System.** 2017 IEEE International Conference on Intelligence Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITCOSP.2017.8303163.

KINSEY, G. S. Spectrum Sensitivity, Energy Yield, and Revenue Prediction of PV Modules. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 1, p. 258–262, jan. 2015.

LEITE, A. C. Q. B. *et al.* **Workbench proposal for PV cell control test for research and educational purposes.** 2021 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). **Anais...** Em: 2021 BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (COBEP). João Pessoa, Brazil: IEEE, 7 nov. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9684045/>>. Acesso em: 23 fev. 2023

MOHAPATRA, A.; NAYAK, B.; SAIPRAKASH, C. **Adaptive Perturb & Observe MPPT for PV System with Experimental Validation,** 2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS), 2019, pp. 257-261, doi: 10.1109/ICSETS.2019.8744819.

SILVA, L. R. C. **Análise de técnicas de rastreamento de máxima potência (MPPT) para aplicação em arranjos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia MG, 2015. p. 235.

SUNENERGY. **SE30Wpp.** Datasheet. Disponível em: <https://www.energyshop.com.br/placa-solar/placa-solar-ate-50w/painel-solar-fotovoltaico-sun-energy-30w>. Acesso em: 17 jun. 2022.

VICENTE, P. S.; REIS, G. L.; VICENTE, E. M. **Development of a solid-state solar simulator to test PV modules.** 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). **Anais...** Em: 2015 IEEE 13TH BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (COBEP) AND 1ST SOUTHERN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (SPEC). Fortaleza: IEEE, nov. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7420279/>>. Acesso em: 23 fev. 2023.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. RUPPERT FILHO, E. **"Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,"** em IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, Maio 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

ZERO 41 LED. **Chip LED COB 50W Real para Refletor Branco Quente 3000K.** Disponível em: <https://www.zero41led.com.br/acessorios-led/chip-led-cob-50w-real-para-refletor-branco-quente-3000k>. Acesso em: 17 jun. 2022