



Artigo

# Simulação de conversor buck-boost com RPMP por P&O aplicado a módulos fotovoltaicos

Manoel Lucas Dantas dos Santos<sup>[1]</sup>, Herick Talles Queiroz Lemos<sup>[2]</sup>, Adriano Aron Freitas de Moura<sup>[3]</sup>, Ednardo Pereira da Rocha<sup>[4]</sup> e Gabriel Luiz Dantas Lopes Nogueira<sup>[5]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi Árido; mlucassantoz@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi Árido; herick.lemos@ufersa.edu.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

<sup>[5]</sup> Universidade Federal Rural do Semi Árido; gabrieldantas503@gmail.com

Recebido: 19/03/2023;

Aceito: 07/06/2023;

Publicado: 21/06/2023.

**Resumo:** O baixo índice de eficiência dos módulos fotovoltaicos e a busca pelo seu melhor aproveitamento ainda é um fator alvo de pesquisas. Fatores que influenciam a eficiência do sistema fotovoltaico podem ter origens externas, como irradiação e temperatura, e internas, como a utilização de algoritmos rastreadores do ponto de máxima potência (PMP) associados aos conversores de potência. Esses algoritmos apresentam técnicas que alteram o nível de tensão e corrente, atuando diretamente na potência extraída do sistema. Dentre as principais técnicas estão a de tensão constante, perturba e observa (P&O) e a condutância incremental. A finalidade deste trabalho, sendo assim, é realizar um estudo e simulação de um conversor CC-CC *buck-boost* utilizando o método P&O aplicado para rastrear o PMP. Foram apresentados cálculos para a determinação dos parâmetros do conversor e sua modelagem física do painel, utilizando um *software* de simulação. A simulação realizada mostrou resultados satisfatórios, dos quais extraiu-se as formas de onda da corrente, tensão e a potência do módulo, no qual, os resultados alcançados da análise comparativa dos valores atingidos nas formas de onda indicaram erros de simulação de 2,91%, 8% e 2,55% para a corrente de MPPT, tensão de MPPT e potência do conversor, respectivamente.

**Palavras-chave:** energia solar; eficiência; conversor CC-CC buck-boost; ponto de máxima potência.

**Abstract:** The low efficiency rate of photovoltaic modules and the search for its best use still is a reason for searches. Factors that influence the efficiency of a photovoltaic system can have external origins, like irradiation e temperature, and internal, like a utilization of maximum power point (MPP) tracking algorithm associated with power converters. Those algorithms feature techniques that change the voltage and current level, acting directly on the power extracted from the system. Among the principal techniques are the constant voltage method, perturb and observe (P&O) and incremental conductance. The objective of this work, therefore, is to perform a study and simulation of a CC-CC buck-boost converter using the P&O method applied for PMP tracking. The calculations for the determining the parameters of the converter and its physical panel modeling of the panel were presented, using a simulation software. The simulation performed showed satisfactory results, from which the module's current, voltage and power waveforms were obtained, in which, the results achieved from the comparative analysis of the values reached in the waveforms indicated simulation errors of 2.91%, 8% and 2.55% for the MPPT current, MPPT voltage and converter power, respectively.

**Key-words:** solar power; efficiency; CC-CC buck-boost converter; maximum power point.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar passou por um aumento considerável de cerca de 316,1% de 2017 para 2018 no Brasil e tem elevado sua capacidade de geração de energia tanto no Brasil (impulsionada por incentivos governamentais) quanto no mundo. Vale destacar que o Nordeste possui um potencial comparável com as melhores regiões do mundo para esta prática. A sua utilização surge como uma alternativa de geração renovável e de baixo impacto se comparada a métodos convencionais de geração. Além disso, uma matriz

elétrica mais diversificada contribui para equilibrar e aliviar o sistema de distribuição e transmissão de energia [1].

Os módulos fotovoltaicos possuem características operacionais ideais tanto de tensão quanto corrente. Então, variando esses parâmetros é uma das formas de se obter o maior aproveitamento possível da geração, evitando perdas e rastreando assim, o Ponto de Máxima Potência (PMP) [2].

Os controladores de carga e inversores presentes nos sistemas fotovoltaicos possuem sofisticados algoritmos de rastreamento do PMP, dentre eles, a técnica de tensão constante, técnica do Perturba e Observa (P&O) e a condutância incremental. Esses algoritmos, que estão presentes nos conversores de potência alteram os parâmetros de corrente e tensão que compõe a curva I-V. No presente trabalho, será desenvolvido um conversor Buck-Boost onde será aplicado o método do rastreador de máxima potência Perturba e Observa.

Em seguida, será realizada uma análise com base nas formas de onda geradas pelo módulo estudado utilizando um software para simulação. Além disso, o presente estudo auxilia em futuras pesquisas ou melhorias dos painéis fotovoltaicos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Energia solar

A célula fotovoltaica é resultado de pesquisa sobre o efeito fotovoltaico, descoberto, em 1839, pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Uma explicação unificada desse fenômeno e da teoria do semicondutor veio com o advento da teoria da física do estado sólido e da mecânica quântica em meados do século 20. Na prática, quando a luz incide sobre os elétrons fazem com que estes circulem de átomo para átomo, formando uma corrente que pode ser armazenada. As células fotovoltaicas utilizam os semicondutores em sua composição que são materiais que apresentam resistência intermediária, comumente é utilizado o silício em sua construção [3].

A célula fotovoltaica possui em sua composição uma junção PN que é criada a partir de um processo de dopagem do silício com o fósforo, obtendo-se assim um material com carga negativa, e de maneira semelhante, porém dopando o silício com boro obtém-se a carga positiva do material. Nesta junção, os elétrons livres migram do lado P para o lado N, conforme ilustra a Figura 1. A região central é conhecida como região de depleção e ela oferece certa resistência a passagem desses elétrons até que uma tensão suficientemente grande rompa essa barreira.

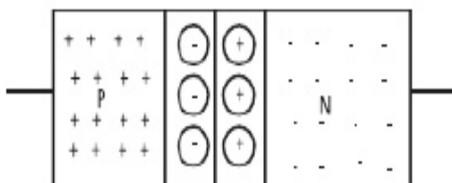


FIGURA 1. Junção PN [3].

A energia solar é hoje uma fonte de energia promissora, pois consegue gerar energia para atender uma demanda por meio do sol que é uma fonte inesgotável, não comprometendo assim nenhum recurso natural. Segundo último levantamento realizado em 2019, pela Empresa de Pesquisa Energética tendo como base o ano de 2018 é possível observar na Figura 2 a porcentagem de participação da energia solar na matriz energética brasileira.

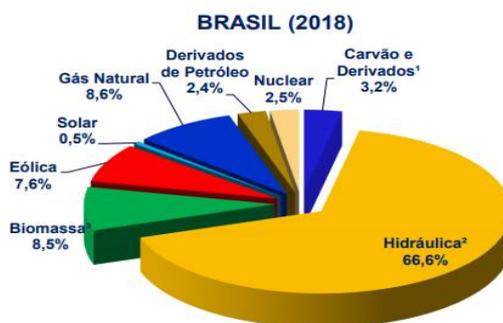


FIGURA 2. Matriz Elétrica Brasileira [1].

A necessidade de buscar fontes de energias renováveis se torna cada vez mais imprescindível tendo em vista o aumento na demanda e os limites do uso de combustíveis fósseis. Um sistema fotovoltaico é aquele

composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos destinados a geração de energia elétrica pela radiação solar. As formas de geração podem ser isoladas, usando um banco de baterias, ou ainda, *on grid*, com o sistema conectado à rede.

A energia gerada proveniente da radiação solar tem como unidade de medida ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). A alta intensidade da radiação influencia no aproveitamento do sistema FV. De acordo com [4], os principais fatores que influenciam o rendimento e a potência de saída das células ou painéis fotovoltaicos são:

- A variação da irradiação pode depender tanto do horário, como do efeito de sombreamento, época do ano etc. A Figura 3a mostra os efeitos da mudança de irradiação na curva I-V.
- A irradiação proveniente do sol provoca também o aquecimento dos painéis provocando perdas por energia térmica, fazendo com que a tensão de saída seja menor a uma corrente constante. É possível observar esse efeito na Figura 3b.
- A variação da irradiação pode depender tanto do horário, como do efeito de sombreamento, época do ano etc. A Figura 3a mostra os efeitos da mudança de irradiação na curva I-V.
- Vale mencionar também a velocidade do vento que é um fator que por sua vez impacta positivamente na geração de energia elétrica do módulo FV. Uma vez que além de contribuir para diminuição do nível de água no ar (umidade relativa), influencia também na troca de calor com o meio ambiente através da convecção, levando com ele as partículas quentes da superfície do módulo e equilibrando a temperatura da superfície do módulo.

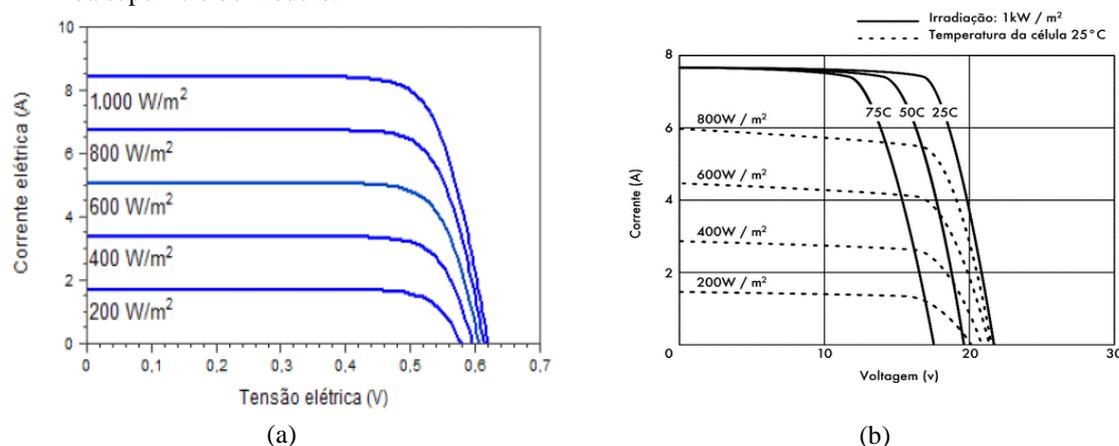


FIGURA 3. (a) Variação da irradiação solar na curva I-V [8]; (b) Efeito da temperatura na curva I-V [1].

## 2.2. Conversores CC-CC

Vale destacar o desenvolvimento da eletrônica de potência nos últimos anos, visto que esta é a ferramenta utilizada para processar a energia gerada. Na eletrônica, em determinados casos, é necessário que alguns parâmetros, de um circuito sejam modificados. Assim, a eletrônica de potência é utilizada para alterar os níveis de tensão e corrente com objetivo de alimentar uma determinada carga, essa alteração de parâmetros se dá por circuitos conversores de potência [2] [5].

O uso de conversores ou inversores de potência que são compostos de elementos armazenadores de energia, tais como indutores, capacitores, dentre outros. Possuem uma ou mais chaves semicondutoras que regulam o fluxo de potência entre um circuito e outro [4] [6].

Em termos de aplicabilidade, os conversores podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos, posicionando-os entre o módulo e a carga permitindo uma alimentação adequada à carga, além de fazer com que o módulo fotovoltaico opere no ponto de máxima potência.

O conversor utilizado é um conversor comutador. Primeiramente, para entender o funcionamento dos conversores comutadores é necessário entender o funcionamento dos conversores lineares. No conversor linear é utilizado um transistor que atua controlando a corrente de carga. Ajustando a corrente de base do transistor é possível controlar a tensão de saída de zero à  $V_{cc}$ . Este transistor opera na sua região linear se comportando como uma resistência variável [5].

Uma alternativa que se mostra mais eficiente ao conversor linear é o conversor comutador, onde o transistor funciona como um interruptor eletrônico, ora desligando, ora ligando o circuito. Nesse caso, o transistor opera na região de saturação e de corte, este conversor também recebe o nome de chopper [5].

Os conversores podem ser do tipo Buck ou abaixadores de tensão, tipo Boost ou elevadores de tensão e tipo Buck-Boost que têm a função de abaixar e elevar os níveis de tensão. Com a utilização de um Buck-Boost, é possível alterar o duty cycle ou ciclo de trabalho do conversor que consiste na determinação da fração de tempo em que o sistema elétrico se encontra em estado ativo ou de operação. Isso ocorre por que

estes componentes elétricos operam em regime de liga-desliga, repetitivamente [7]. O circuito básico do Buck-Boost é dado pela Figura 4.

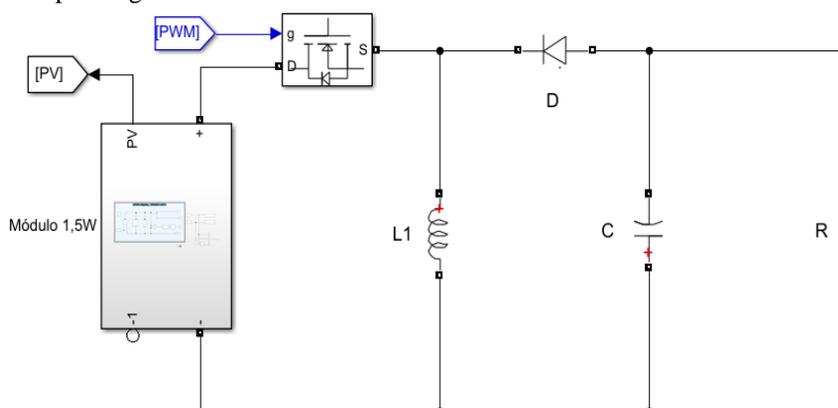


FIGURA 4. Conversor buck-boost (autoria própria).

Para que os painéis fotovoltaicos operem sempre no ponto de máxima potência é usada uma série de técnicas por meio de algoritmos de controle no conversor CC que está acoplado no painel, esta consiste de um incessante rastreamento do ponto de operação (*Maximum Power Point Tracking* ou MPPT). A Figura 5 consiste na curva IV de um módulo convencional.

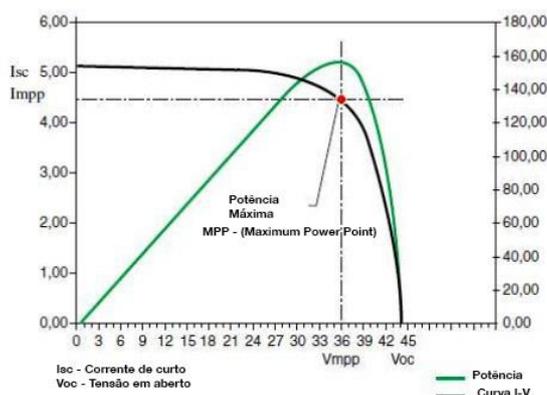


FIGURA 5. Conversor buck-boost (autoria própria).

O objetivo é fazer com que a curva da potência coincida com a curva I-V. Dentre os algoritmos usados, vale mencionar a técnica de tensão constante, técnica do Perturba e Observa (P&O) e a condutância incremental.

Na técnica de tensão constante o painel fotovoltaico é mantido em uma tensão de referência, que é a tensão do ponto de máxima potência. Com isto, a tensão de saída do painel é observada com base na referência, o controle se faz pela alteração do ciclo de trabalho de modo a atingir a tensão de referência. O método não é muito preciso, porém é utilizado em razão de sua simplicidade [6].

Na técnica do Perturba e Observa, a técnica se baseia em duas iterações, na primeira os valores de tensão e corrente são lidos e a potência é calculada. Na segunda se realiza um incremento na razão cíclica,  $\Delta D$ , e então a potência é novamente calculada, se ela for maior que a potência anterior conclui-se que o sistema está convergindo. Caso contrário se faz um decremento na razão cíclica [6].

Com essa técnica deve-se escolher entre velocidade de convergência e precisão. Uma vez que se o projetista escolher um passo maior o sistema converge mais rápido, porém será menos preciso. Se o passo for menor, o tempo será maior, porém mais preciso e maior qualidade no regime permanente. Conforme ilustra a Figura 6a e 6b, onde  $V_{mp}$  é a tensão do ponto de máxima potência.

O passo adotado é essencial para o desempenho e resultados da simulação, uma vez que será trabalhado com um módulo que possui parâmetros bem pequenos. Se adotarmos um passo muito grande, a variação de potência pode ser muito ampla o que é indesejado. A Figura 7 consiste em um modelo esquemático representado por diagrama de blocos o princípio de funcionamento do algoritmo P&O. Na qual:

- $P_{pv}$  – Potência gerada do painel fotovoltaico;
- $d$  – Ciclo de trabalho;
- $V_{pv}$  – Tensão gerada pelo painel fotovoltaico;

- $I_{pv}$  – Corrente gerada pelo painel fotovoltaico;
- $\Delta D$  – Passo aplicado ao Ciclo de trabalho.

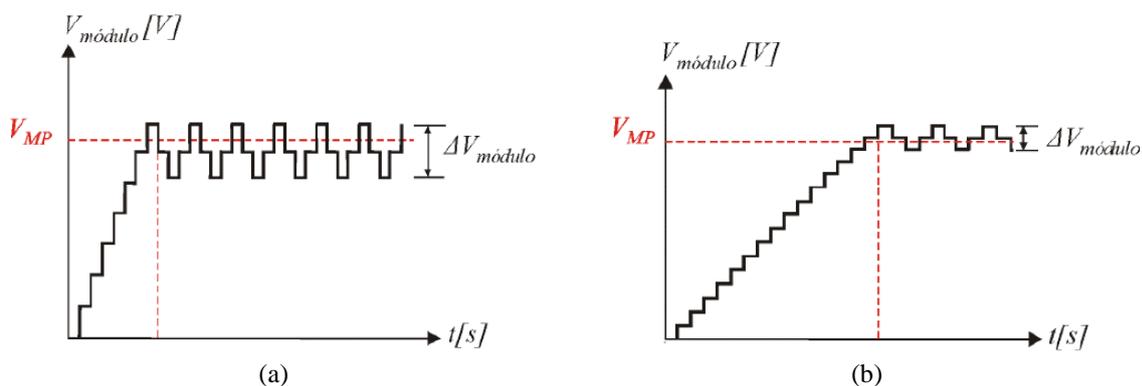


FIGURA 6. (a) Passo largo [6]; (b) Passo curto [6].

O método iterativo descrito na Figura 7 passa por duas condicionais e por meio do incremento ou decremento no valor do Ciclo de trabalho a potência varia até que atinja seu valor máximo.

O conversor estudado é um Buck-Boost que utiliza a técnica de alterar o ciclo de trabalho para aplicar o método perturba & observa (P&O) e dessa maneira rastrear a máxima potência possível variando a tensão e corrente evitando perdas e tornando os sistemas de geração de energia mais eficientes.

Para fabricar o conversor é necessária a determinação dos parâmetros que compõe o circuito eletrônico. Isso inclui a frequência de operação, indutor, capacitor e chaveamento. A simulação do conversor Buck-Boost permite realizar um planejamento prévio do circuito, bem como permite dar maior confiabilidade aos resultados obtidos com um eventual protótipo. Essa avaliação se dará por meio de uma análise comparativa das formas de onda geradas pelo software tendo como base nos valores obtidos.

Para plotar o gráfico da curva característica  $I \times V$ , é necessário conhecer a tensão de circuito aberto e de corrente de curto-circuito. Além disso, é preciso variar a carga nos terminais da célula para obter a curva dentro de uma radiação constante. Fazendo o produto da tensão e da corrente, se encontra a potência, porém para que ela seja máxima é necessário traçar uma curva da potência em função da tensão, então o valor máximo se encontrará no joelho desta curva.

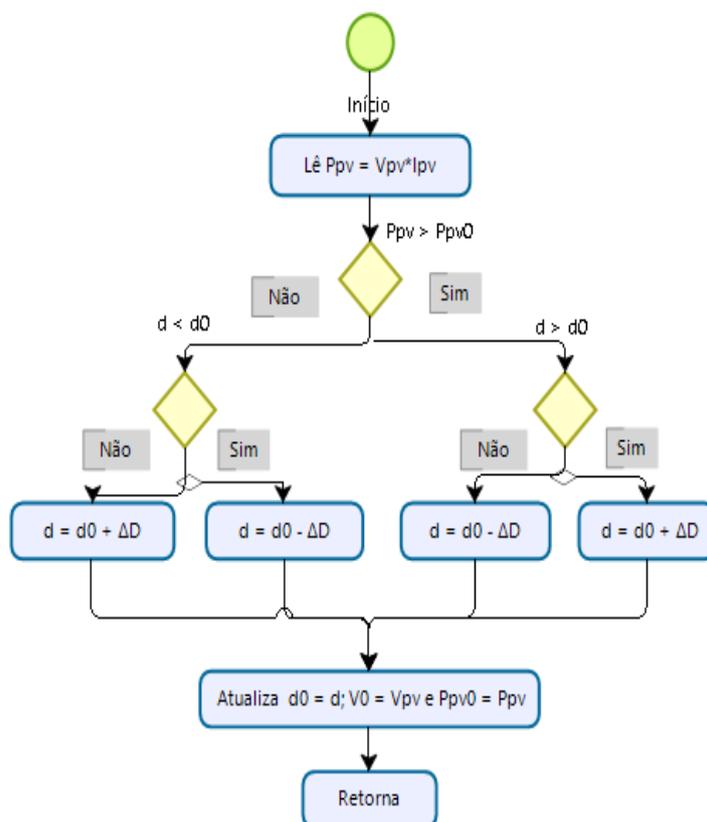


FIGURA 7. Diagrama do algoritmo P&O

### 3. METODOLOGIA

Esta seção consiste na descrição da metodologia utilizada para modelagem e construção do protótipo para avaliação do desempenho do método de rastreamento de máxima potência um módulo comercial utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. O método aplicado utiliza a técnica de iterações para obter como resultado a potência extraída do sistema e com base em um levantamento dos valores de tensão e corrente atualizado o sistema realiza uma série de iterações dentro de um valor amostrado e assim potência irá convergir para seu valor máximo.

#### 3.1. Características do módulo

O módulo utilizado consiste em um módulo composto por material policristalino conforme é possível observar na Figura 8. Para o presente artigo, o dimensionamento e simulação foram realizados considerando a utilização de um módulo cujas características são descritas na Tabela 1.



FIGURA 8. Módulo fotovoltaico (autoria própria).

Os valores abaixo foram obtidos através de testes que foram realizados para uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e uma temperatura ambiente de 35 °C. Esses testes foram realizados antes de dar início às medições que nesse caso foram os testes de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito para averiguar as condições atuais dos módulos fotovoltaicos

TABELA 1. Dados do módulo (autoria própria)

Potência máxima	1,5W
Tensão de circuito aberto (V <sub>ca</sub> )	19V
Corrente de curto-circuito (I <sub>cc</sub> )	9A
Tensão de operação (V <sub>op</sub> )	12V
dimensões	115 x 85

### 3.2. Conversor

Para dimensionar os componentes do conversor, será necessário fazer algumas suposições quanto ao seu funcionamento:

- O circuito opera em regime permanente;
- A corrente da bobina é permanente;
- A chave possui um tempo  $DT$  fechada, e o restante do tempo  $(1 - D)T$  aberta;
- Os componentes são ideais.

Para determinação dos componentes é preciso entender o funcionamento do circuito em seu período ligado e desligado. Quando a chave está fechada, a tensão na bobina é dada pela Equação 1.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (1)$$

No qual,  $i_L$  é a corrente no indutor,  $V_s$  é a tensão da fonte e  $L$  a indutância. O ritmo de variação de corrente na bobina é constante. No período em que o transistor está fechado, a variação de corrente pode ser dada pela Equação 2.

$$(\Delta i_L)_{fechado} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2)$$

No qual  $D$  é o ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) e  $T$  é o período. Já quando a chave está aberta a variação de corrente é descrita pela Equação 3.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_0}{L} \quad (3)$$

Assim como no caso anterior, a variação de corrente é constante e, portanto:

$$(\Delta i_L)_{aberto} = \frac{V_s(1 - D)T}{L} \quad (4)$$

Assim, em um regime permanente, a variação de corrente deve ser nula dentro de um intervalo de tempo e pode ser descrito pelo somatório das Equações 2 e 4.

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{V_s(1 - D)T}{L} = 0 \quad (5)$$

O ciclo de trabalho,  $D$ , é o regime de trabalho do conversor e será adotado o valor de 0,4 como valor

inicial. Sabendo que a tensão de operação do módulo,  $V_{in}$ , é de 12V, a tensão de saída pode ser calculada pela Equação 6.

$$V_{out} = V_{in} \frac{1 - D}{D} = 12 \cdot \frac{1 - 0,4}{0,4} = 18V \quad (6)$$

Primeiramente, será necessário definir a frequência de operação para calcular os demais componentes do circuito. Essa frequência tem que ser suficientemente grande para que seja possível obter valores comerciais dos dispositivos, proporcionando maior facilidade na aquisição de determinados equipamentos. Ou ainda, para que seja possível a fácil fabricação dos equipamentos Sendo assim a frequência de operação escolhida foi de 7,8125 kHz. Dessa forma, a indutância mínima necessária para o Buck-Boost é dada pela Equação 7.

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2f} = 1 \frac{(1 - 0,4)^2 \cdot 100}{2 \cdot 7812,5} = 2,304mH \quad (7)$$

Já a capacitância é obtida pelo produto ciclo de trabalho com a corrente inicial dividido pela frequência e a variação de tensão e pode ser descrita pela Equação 8.

$$C = \frac{DI_0}{f \Delta v} = \frac{0,4 \cdot 0,9}{7812,5 \cdot 12} = 3,84\mu F \quad (8)$$

Para realizar o chaveamento do circuito será utilizado o mosfet IRF740 que possui um bom desempenho dentro dessa frequência de operação. Através desse componente será realizado o controle do *Duty Cycle*, para isso o Gate do mosfet recebe um sinal de PWM (*Pulse Width Modulation*) que é a largura do pulso de uma onda. O *software* utilizado para realizar a simulação foi o Simulink e o algoritmo do circuito será realizado na plataforma de programação do Matlab.

O esquema lógico em questão é implementado por meio de um algoritmo utilizando a linguagem C de programação, conforme observa-se na Figura 9. Neste esquema, a variável Ppv é uma constante que é calculada com base no produto entre os valores de tensão e corrente do módulo. As variáveis 'Ppv0' e 'd0' por sua vez passam por um delay e estas consistem nos valores anteriores que serviram de base comparativa para determinar se será necessário incrementar ou decrementar o valor do Ciclo de trabalho.

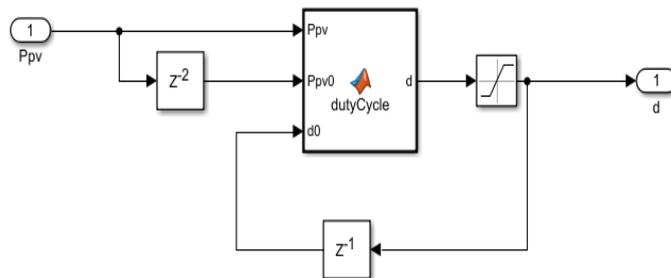


FIGURA 9. Malha do algoritmo (autoria própria)

Primeiramente, foi realizada a modelagem do módulo fotovoltaico para uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 35 °C com uma carga de 10 Ω. Em seguida, foi realizada uma estimativa dos valores ideais de corrente e tensão de operação do painel considerando um sistema sem perdas. Os resultados gerados são observados na Figura 10 e na Tabela 2.

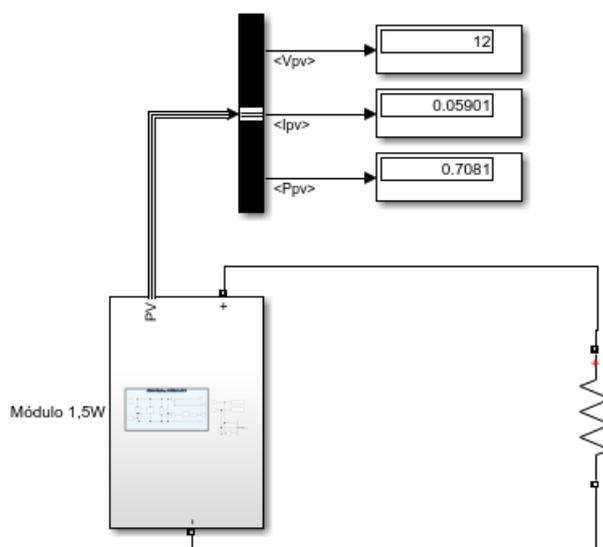


FIGURA 10. Módulo operando em condições ideais (autoria própria).

TABELA 2. Parâmetro do módulo (autoria própria).

Parâmetros do módulo	
Tensão no módulo (V)	12
Corrente no módulo (A)	0,05901
Potência no módulo (w)	0,7081

Então foi inserido no circuito Buck-Boost um conjunto de medidores de corrente e tensão na carga e no módulo. Dessa forma, é possível observar se os resultados obtidos das iterações realizadas pelo rastreamento do algoritmo foram satisfatórios, ou seja, se a modificação do ciclo de trabalho levou o módulo a operar próximo de suas condições ideais. Os valores adotados para o indutor e capacitor foram um pouco acima do mínimo estabelecido segundo os cálculos.

Além disso, foi adicionado um capacitor em paralelo com o módulo para minimizar o impacto do chaveamento no módulo. A ligação do conversor Buck-Boost é dado pela Figura 11. O diodo inserido no circuito tem como finalidade evitar a circulação de corrente em direção ao mosfet para prevenir o dispositivo contra eventual falha.

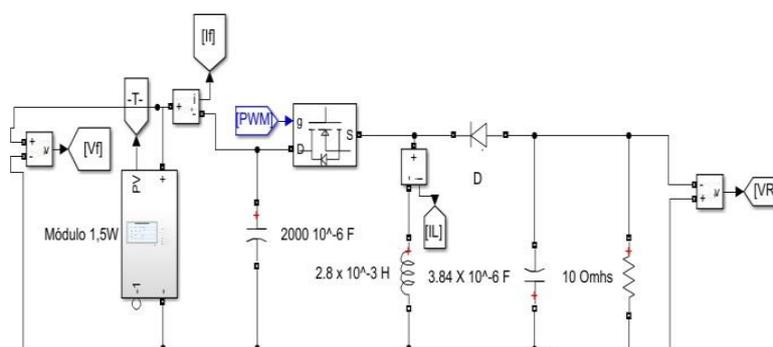


FIGURA 11. Simulação de Conversor Buck-Boost (autoria própria).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo estimado de simulação foi de  $T = 1$  s. O incremento para cada iteração foi definido como  $D = 1,0 \cdot 10^{-6}$ . E o erro tolerável escolhido foi de  $0,05$ . O valor do erro é pequeno, porém isso se deve aos valores pequenos coletados na simulação. Os valores obtidos após o período são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Medidas obtidas do conversor (autoria própria).

Medidas do módulo	
Tensão no módulo (V)	11,03
Corrente no módulo (A)	0,06073
Potência no módulo (W)	0,6693
<i>Duty Cycle</i>	0,4095

Em seguida, com base na variação de corrente e tensão do módulo até o momento que houve a estabilização foi possível plotar uma série de curvas comparando os resultados da simulação do conversor com o esperado ao longo do período de tempo, utilizando o bloco *Scope*, para assim observar o seu comportamento. Os dados da simulação foram extraídos e plotados no Excel para a amostra na qual o sistema apresentou estabilidade. A corrente gerada pelo módulo em condições ideais (azul) e em simulação com conversor (vermelho) é mostrada na Figura 12.

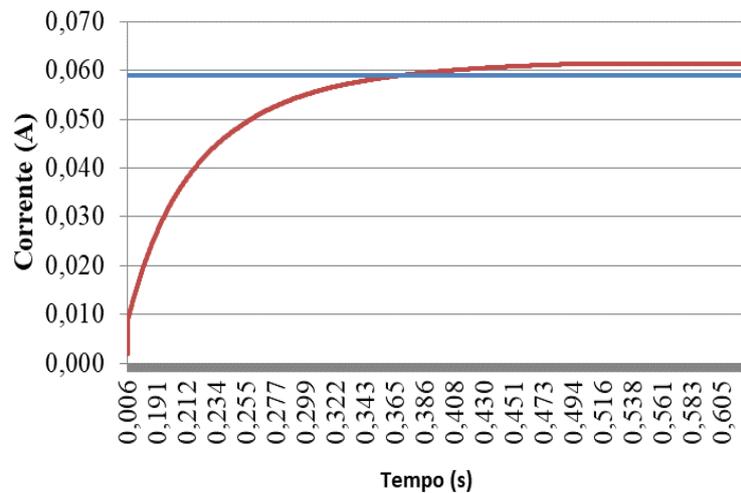


FIGURA 12. Curva da corrente (autoria própria).

Enquanto a corrente de MPPT é  $I_c = 0,05901A$ , a corrente da simulação do conversor é de  $I_f = 0,06073A$ . O que resulta em um erro absoluto e percentual dados pela Equação 9 e Equação 10.

$$E_{abs} = I_{mppt} - I_f = 0,05901 - 0,06073 = 0,00172 \quad (9)$$

$$E(\%) = 100 \cdot \left| \frac{I_{mppt} - I_f}{I_{mppt}} \right| = 100 \cdot \left| \frac{0,05901 - 0,06073}{0,05901} \right| \cong 2,91\% \quad (10)$$

De maneira análoga, com relação a tensão do módulo, a curva da Figura 13 mostra o comportamento da tensão ao longo do tempo. Como resultado, a Tensão de MPPT esperada (linha azul) é de  $V_{mppt} = 12V$ , enquanto a tensão da simulação do conversor é  $V_f = 11,03V$ . Os erros estão exibidos na Equação 11 e Equação 12.

$$E_{abs} = V_{mppt} - V_f = 12 - 11,03 = 0,97 \quad (11)$$

$$E(\%) = 100 \cdot \left| \frac{V_{mppt} - V_f}{V_{mppt}} \right| = 100 \cdot \left| \frac{12 - 11,03}{12} \right| \cong 8\% \quad (12)$$

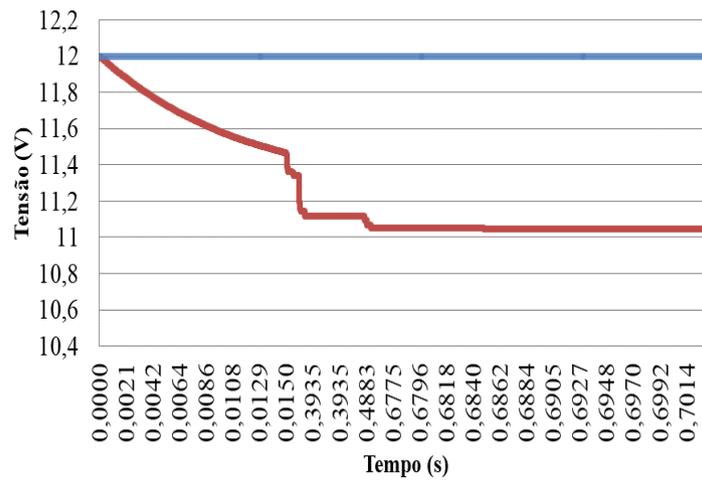


FIGURA 13. Curva da Tensão (autoria própria).

Realizando o produto da tensão e corrente obtida é possível calcular a potência do sistema. A máxima potência é representada pela linha azul e a potência gerada pelo conversor pela linha vermelha. Conforme é possível observar na Figura 14, a potência gerada pelo conversor é bem próxima da máxima potência. Dessa forma, o erro intrínseco da potência gerado é mostrado na Equação 13 e Equação 14.

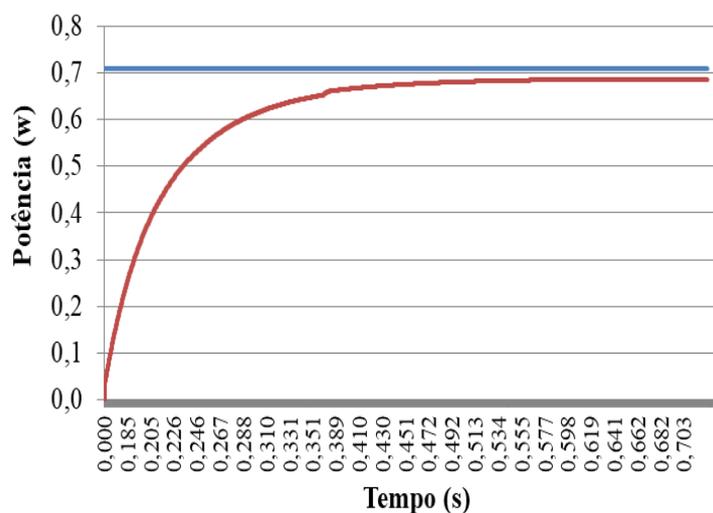


FIGURA 14. Potência gerada pela simulação (autoria própria).

$$E_{abs} = P_{mppt} - P_f = 0,7081 - 0,669 = 0,031 \quad (13)$$

$$E(\%) = 100 \cdot \left| \frac{P_{mppt} - P_f}{P_{mppt}} \right| = 100 \cdot \left| \frac{0,7081 - 0,669}{0,7081} \right| \cong 5,2\% \quad (14)$$

TABELA 4. Erros e medidas obtidas do conversor (autoria própria).

	Resultados	Erro (%)
Tensão no módulo (V)	11,03	2,91
Corrente no módulo (A)	0,06073	8
Potência no módulo (W)	0,6693	5,2

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento e simulação de um estudo que envolve a área de eletrônica de potência e energias renováveis utilizando um conversor de potência CC-CC Buck-Boost, aplicado ao método de rastreamento de máxima potência usando o perturba e observa.

Através do mecanismo de chaveamento, foi possível programar o circuito para que ele opere conforme seja mais eficiente. Desta forma, estudo desse caráter tem como finalidade promover a melhoria dos equipamentos, evitando o desperdício de energia e desgaste do próprio material, para que assim essa tecnologia seja mais difundida e viabilizada. Tendo em vista que o objetivo do presente artigo seria rastrear o ponto de máxima potência do conversor, observou-se que os parâmetros da simulação estão bem próximos das expectativas.

Dessa forma, os resultados obtidos foram satisfatórios, tendo em vista que o sistema alcançou estabilidade e as variações de tensão e corrente estão foram pequenas. Como sugestões para futuros artigos sugere-se a criação do protótipo do conversor Buck-Boost para que dessa forma seja possível obter as curvas resultantes aqui apresentadas, submetendo-o a condições reais. Dessa forma, é possível estudar com maior riqueza de detalhes as variações de irradiância, temperatura, sombreamento.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2018, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>  
Acesso em: 3/01/2020
- [2] VIEIRA, R. G. Análise comparativa do desempenho entre um painel solar Estático e com rastreamento no município de Mossoró-RN. Orientador: Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella. 2014. 86 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.
- [3] LIMA A.A., MENEZES N. P., et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 42. 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0191>. Acesso: 24/05/2023.
- [4] GRUNDEMANN, Wagner Turchielo. MPPT Perturba e Observa aplicado ao conversor boost. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017
- [5] HART. Daniel W. Eletrônica de potência. Prentice Hall. Valparaiso university, Indiana, pp. 201 – 254, 2001.
- [6] COELHO, R. F. Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. Orientador: Denizar Cruz Martins. 2008. 176 p. Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [7] BARBI, Ivo. Eletrônica de potência. Florianópolis, SC, pp. 179-318, 2000.
- [8] Solar Brasil. Componentes do sistema de energia solar fotovoltaico – módulo solar fotovoltaico. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/blog/componentes-do-sistema-deenergia-solar-fotovoltaico-modulo-solar-fotovoltaico/> Acesso em: 06/01/2020.