



Artigo

Simulação de conversor buck-booster com RPMP por HC aplicado a módulos fotovoltaicos

Mikelly de Lima Farias^[1], Herick Talles Queiroz Lemos^[2], Gustavo Maia Rodrigues^[3], Wallace Vieira de Medeiros^[4], Adriano Aron de Freitas Moura^[5], Ednardo Pereira da Rocha^[6]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; mikellylima17@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; herick.lemos@ufersa.com.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; gustavo.rodrigues39172@alunos.ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; wallace.medeiros@alunos.ufersa.edu.br

^[5] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

^[6] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Recebido: 19/03/2023;

Aceito: 07/06/2023;

Publicado: 21/06/2023.

Resumo: A energia solar tende a disseminar-se amplamente na utilização cotidiana para suprir a crescente demanda energética, esta possui uma gama de benefícios e vantagens na sua implementação, principalmente pelo caráter pouco poluente ao meio ambiente. Os painéis fotovoltaicos somente atingiram os patamares atuais de geração graças ao desenvolvimento da eletrônica de potência, que é utilizada no processamento da energia fotogerada, porém a eficiência ainda é em torno de 20%, ao mesmo tempo que os parâmetros elétricos dos módulos são diretamente influenciados por fatores climáticos e ambientais, tornando seu controle complexo. Para isso, técnicas vêm sendo criadas de forma a manter os sistemas fotovoltaicos operando com sua eficiência máxima independente dos fatores. Tais técnicas são denominadas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking), no qual se utilizam conversores controlados por algoritmos que rastreia o ponto de máxima potência (PMP), e assim mantém os painéis solares entregando sua potência útil máxima. Existem na literatura diversas técnicas de controle MPPT, a abordada no presente trabalho será uma denominada Hill CLimbing. Desenvolveu-se em software Matlab/Simulink a modelagem de um sistema de controle MPPT utilizando como conversor o tipo buck-boost controlado pelo algoritmo Hill Climbing. Após a modelagem foi analisado o funcionamento do algoritmo através do rastreamento do PMP e comparado com os valores obtidos experimentalmente do módulo ZW85X115. O comparativo entre os valores experimentais e simulados ocorreu de forma satisfatória.

Palavras-chave: Solar; Potência; MPPT.

Abstract: Solar energy tends to spread widely in everyday use to meet the growing energy demand, it has a range of benefits and advantages in its implementation, mainly due to its low-polluting character to the environment. Photovoltaic panels only reached the current levels of generation thanks to the development of power electronics, which is used in the processing of photogenerated energy, but the efficiency is still around 17%, while the electrical parameters of the modules are directly influenced by climatic and environmental factors, making its control complex. For this, techniques have been created in order to keep photovoltaic systems operating at their maximum efficiency regardless of the factors. Such techniques are called Maximum Power Point Tracking (MPPT), which uses converters controlled by algorithms that track the maximum power point (PMP), and thus keep the solar panels delivering their maximum useful power. There are several MPPT control techniques in the literature, the one addressed in the present work will be called Hill CLimbing. The modeling of an MPPT control system was developed in Matlab/Simulink software using the buck-boost type converter controlled by the Hill Climbing algorithm. After modeling, the functioning of the algorithm was analyzed through PMP tracking and compared with the values obtained experimentally from the ZW85X115 module. The comparison between the experimental and simulated values occurred satisfactorily.

Key-words: Solar; Power; MPPT.

1. INTRODUÇÃO

O cenário atual sobre a produção e demanda de energia pela sociedade, aliada à uma possível escassez dos combustíveis fósseis estabelece uma procura pela ampliação das fontes de geração de energia, principalmente

as renováveis. Estas, por sua vez, se mostram primordiais na busca da associação entre desenvolvimento sustentável, diversificação da matriz energética e fortalecimento da economia. Dentre as fontes geradoras de energia renovável encontra-se a energia solar fotovoltaica, considerada umas das fontes primárias menos poluentes, no qual tem recebido bastante pesquisas na área e incentivos econômicos. Sua utilização promove a complementaridade da matriz energética brasileira ao tempo que diminui a dependência das outras fontes de energia produzidas no país, como a hidrelétrica [1].

O recurso solar é inesgotável na escala de tempo terrestre, estabelecendo a energia solar fotovoltaica como uma solução promissora no suprimento da demanda de energia dos próximos anos de forma limpa e de pouco impacto ambiental [2]. O Brasil manifesta um enorme potencial para geração de energia proveniente do sol, pois em todas as regiões do país são medidos altos níveis de incidência de radiação solar, sendo o nordeste brasileiro considerado como uma das regiões com melhor potencial para geração de energia solar no mundo [3]. De acordo com [4] o Brasil é um país favorecido, onde os valores de irradiação solar global diária incidente em qualquer região do território brasileiro superam em sua maioria os países europeus e boa parte dos Estados Unidos da América. A geração fotovoltaica possui uma série de características vantajosas como: a não emissão dióxido de carbono, não geração ruído, podem ser configuradas com vários arranjos para formar a potência desejada, requer baixo grau de manutenção, não há necessidade de operador humano e a instalação é simples e rápida. Outra vantagem, se encontra na instalação ocorrer nos centros de consumo de energia elétrica, evitando a utilização de linhas de transmissão [5].

Diante de vários aspectos positivos, existe uma crescente motivação no desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos para torná-los mais eficientes e de menor custo. Com isso, é possível garantir acessibilidade e disseminação da tecnologia para um público cada vez maior, devido primordialmente ao declínio substancial dos custos no processo de fabricação, instalação e manutenção [7]. Sabendo-se que a disponibilidade dos painéis fotovoltaicos tem aumentado no mercado, têm-se uma busca crescente da confiança nas informações dos seus parâmetros elétricos, principalmente relacionado à potência útil.

Os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos dependem de fatores variáveis como condições climáticas e cargas no sistema, logo sua potência pode variar continuamente ao longo de um determinado período. Uma característica que deixa a desejar é a baixa eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos, que gira em torno de 6 a 16%. Diante dos fatores que acarretam a baixa eficiência dos módulos fotovoltaicos, para evitar ainda mais perdas na capacidade de geração, estes necessitam operar no ponto de máxima potência (PMP). Devido ao ponto de operação dos módulos ser influenciado por condições climáticas, no qual não é possível se ter o controle, é necessário a utilização de métodos que garantam a atuação do sistema no PMP, pois caso tais métodos não sejam utilizados, muito provavelmente o sistema atuará fora do PMP [5]. Com isso, o sistema MPPT utiliza-se de técnicas de seguimento do ponto de máxima potência através de sistemas de controle associados a conversores CC-CC e algoritmos que garantem a máxima eficiência dos módulos fotovoltaicos.

Uma gama de algoritmos são utilizados como estratégias de MPPT, porém muitas demonstram implementação e processamento de dados excessivamente complexas, além de em muitas situações contarem com a obtenção de múltiplas grandezas físicas [7]. Logo o presente trabalho tem como objetivo a utilização do algoritmo Hill Climbing (HC) para o rastreamento do MPPT por meio de simulação computacional. Esta técnica se configura como sendo simples e flexível para manter corretamente o sentido de rastreamento, sendo assim chamada devido ao modo de rastreamento do PMP, que se encontra no topo da curva de Potência versus Tensão, análoga a uma colina. O algoritmo rastreia pouco a pouco a curva P-V, indo em direção ao topo até atingir o ponto de máxima potência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Características do módulo

O módulo utilizado é de pequena dimensão para a realização do experimento e possui as características conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1. Características do módulo fotovoltaico.

<i>Características</i>	<i>Valor</i>
Modelo	ZW85X115
Material	Policristalino
Dimensões	8cm x 11,5cm

Fonte: Autoria Própria, 2023.

2.2. Obtenção dos parâmetros do módulo

Para o presente trabalho, inicialmente necessitou-se da obtenção dos parâmetros do módulo solar. O módulo ZW85X115 passou por um ensaio no qual obteve-se sua curva Corrente *versus* Tensão. Por meio da curta I-V foi possível obter os parâmetros necessários conforme mostra a Tabela 2.

TABELA 2. Parâmetros do módulo fotovoltaico

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
Corrente de curto-circuito [ICC]	0,073 A
Tensão de circuito aberto [VOC]	19 V
Corrente de máxima potência [Imp]	0,06149 A
Tensão de máxima potência [Vmp]	11,31 A
Ponto de máxima potência [Pmp]	0,6953 W
Irradiância [IR]	1000 W/m2
Temperatura do modulo [T]	37 °C

Fonte: Autoria própria, 2023.

2.3. Modelagem do módulo fotovoltaico por meio do modelo ideal

Com a finalidade de obter-se os dados mais aproximados do módulo empregado, optou-se pela utilização do modelo ideal, consistindo em uma fonte de corrente em paralelo a um diodo junto a uma carga resistiva. A partir da utilização do método Newton-Raphson, foi possível obter a corrente de saturação e fator de idealidade do módulo. Tais parâmetros encontram-se especificados na Tabela 3.

TABELA 3. Parâmetros encontrados por meio da utilização do método de Newton-Raphson

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
Corrente de saturação [ISC]	5.703037204977991e-04 A
Fator de idealidade [AN]	1.386490442589101e+02

Fonte: Autoria própria, 2023.

Após a obtenção da corrente de saturação reversa e fator de idealidade do módulo, foi possível iniciar o processo de construção da simulação computacional. Para a construção do modelo Matlab/Simulink foi construído um bloco, como mostrado na Figura 1, representando a equação (1), correspondente à corrente que circula no modelo de diodo ideal.

$$I_s \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T_c \cdot A_n}} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde:

I_s : é a corrente de saturação de polarização reversa do diodo (A);

V_d : tensão no diodo que é igual a tensão nos terminais de saída V ;

q : é a carga elementar do elétron (C);

K : Constante de Boltzmann (J/K);

T_c : Temperatura da célula (°K);

A_n : fator de idealidade do diodo.

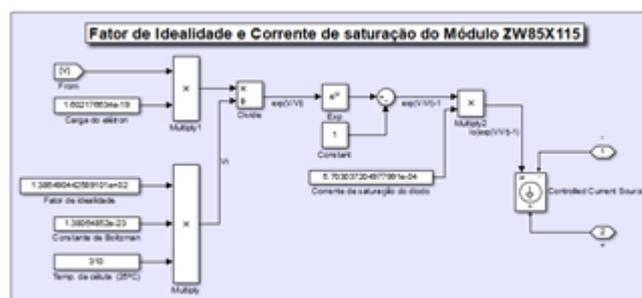


FIGURA 1. Bloco representativo para geração da corrente do diodo no Matlab/Simulink (autoria própria, 2023).

O circuito do modelo de diodo ideal no Matlab/Simulink encontra-se ilustrado na Figura 2. A sua construção se deu através da inserção de uma fonte de corrente contínua simulando a corrente de curto-circuito

do módulo, obtida experimentalmente, em paralelo com o bloco representativo do diodo ideal e um resistor de alto valor de resistência. Medidores de tensão e corrente foram inseridos para o acompanhamento do comportamento dos parâmetros do circuito, como tensão, corrente e potência. A saída do medidor de tensão possui um filtro passa baixa juntamente com um delay. Esses elementos foram adicionados com a finalidade de melhor acompanhamento dos dados de tensão devido às fortes variações no início da simulação, no qual o software ocasiona devido aos componentes levarem algum tempo para a estabilização de seus valores.

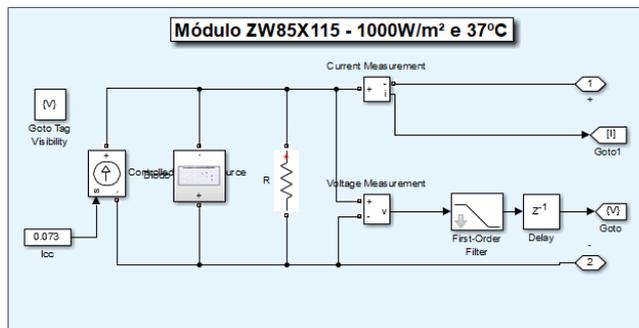


FIGURA 2. Bloco representativo do modelo de diodo ideal no Matlab/Simulink (autoria própria, 2023).

2.4. Dimensionamento do conversor buck-boost

Para o dimensionamento do conversor buck-boost fixou-se uma frequência de 7,8kHz. Para a carga escolheu-se um resistor de 100 Ω . Optou-se por considerar a largura de pulso máxima de 60% com o intuito de garantir a estabilidade do circuito, pois o dispositivo de chaveamento tende a entrar em colapso para ciclos de trabalho próximos de 100%. Admitiu-se uma variação de tensão na saída de 5%.

A relação da resistência efetiva de entrada (R_{ei}) com a resistência de saída da carga (R_{carga}) é apresentada na equação (2), onde D é o *duty cycle* ou ciclo de trabalho.

$$R_{ei}(D, R_{carga}) = \frac{(1 - D)^2 R_{carga}}{D^2} \quad (2)$$

O *duty cycle* deve ser alterado para manter a impedância efetiva de entrada R_{ei} com os valores no ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico. Sendo os valores de I_{mp} e V_{mp} apresentados na tabela 4, temos que o valor de R_{ei} é especificado conforme a equação (3).

$$R_{ei} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{11,31}{0,06149} = 183,93 \Omega \quad (3)$$

Substituindo o valor de R_{ei} e R_{carga} na equação (2), obtemos a equação (4) de segundo grau.

$$-83,93D^2 - 200D + 100 = 0 \quad (4)$$

Temos como raízes da equação (4), $D' = 0,42$ e $D'' = -2,81$. Logo o *duty cycle* necessário para manter a impedância de entrada com valores no ponto de máxima potência é aproximadamente $D = 0,42$ ou 42%.

Para o conversor operar em condução contínua, se deve utilizar valores comerciais maiores que os valores mínimos estabelecidos pelo dimensionamento. A indutância crítica mínima foi calculada conforme a equação (5).

$$L_{min} = \frac{(1 - d^2)R}{2f} = \frac{(1 - 0,6^2) * 100}{2 * 7800} = 4,1mH \quad (5)$$

O cálculo da capacitância mínima é apresentado na equação (6).

$$C = \frac{V_s d}{R \Delta v f} = \frac{12 * 0,6}{100 * 0,05 * 7800} = 184,61\mu F \quad (6)$$

Para a simulação, foram adotados valores próximos aos valores críticos, tendo uma indutância de 4,1 mH e uma capacitância de 185 μF .

2.5. Simulação computacional do circuito para controle MPPT

O esquema do circuito é ilustrado conforme mostra a Figura 3. O módulo fotovoltaico fornece uma tensão e uma corrente fotogerada ao circuito. O mosfet chaveia o circuito conforme o ciclo de trabalho estabelecido pelo algoritmo MPPT, para assim, ocorrer o rastreamento do ponto de máxima potência.

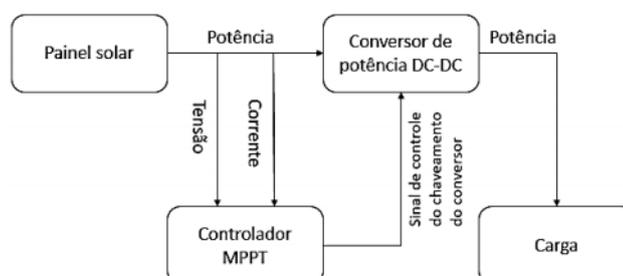


FIGURA 3. Bloco representativo do circuito para controle MPPT (autoria própria, 2023).

A Figura 4 ilustra a construção da simulação do circuito no software Matlab/Simulink. Medidores de tensão e corrente foram implementadas na carga e no painel fotovoltaico para o monitoramento dos parâmetros. O capacitor C1 nos terminais do módulo solar tem como finalidade deixar a corrente que flui do painel mais regular e contínua, sendo possível adquirir pontos de potência em todo instante de tempo.

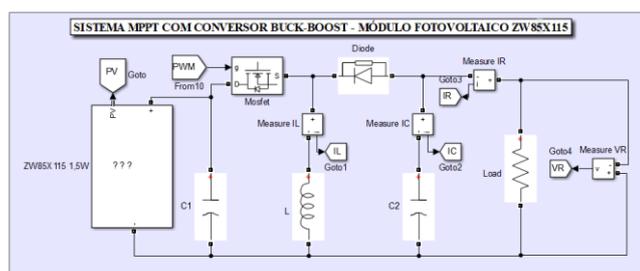


FIGURA 4. Simulação do circuito para controle MPPT no Matlab/Simulink (autoria própria, 2023).

O PWM incrementado no gate do mosfet é controlado através do circuito gerador de PWM. Tal circuito é controlado pelo algoritmo Hill Climbing, rastreador do ponto de máxima potência, ao qual modifica o *duty cycle* do PWM para que o PMP seja alcançado.

2.6. Implementação do algoritmo para o rastreamento do ponto de máxima potência

O algoritmo utilizado para o rastreamento do ponto de máxima potência foi o Hill Climbing (HC). É um método robusto e popular, que necessita somente dos valores medidos de tensão e potência nos terminais do módulo fotovoltaico. E com base no cálculo da potência, o algoritmo HC é usado para rastrear o ponto de máxima potência. A curva da potência tem a forma de uma colina e o ponto de operação do módulo sobe a colina e com a finalidade de chegar ao topo e permanecer.

A Figura 5 ilustra como se deu a geração do PWM na simulação. Dados de tensão e potência do módulo fotovoltaico foram fornecidos por meio de uma barra ao bloco *duty cycle*, responsável pela implementação do algoritmo Hill Climbing. O bloco fornece o *duty cycle* para um gerador PWM, que se conecta no gate do mosfet.

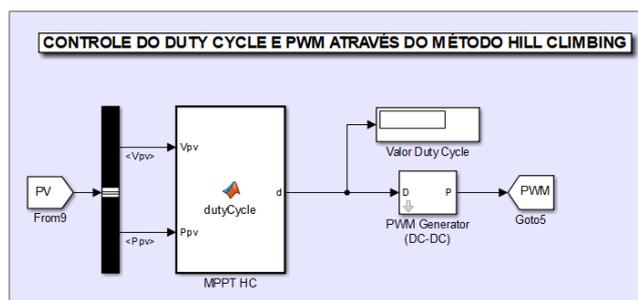


FIGURA 5. Controle do PWM por meio do método HC no Matlab/Simulink (autoria própria, 2023).

O algoritmo Hill Climbing foi produzido conforme representação esquemática da Figura 6. Inicialmente se têm um comparativo entre a potência atual e a potência anterior. Caso os valores de potência sejam diferentes, o algoritmo procede para uma comparação de tensões, no qual se a tensão atual for maior que a tensão anterior, o *duty cycle* recebe alteração através do decréscimo ocasionado pelo *slope*. O decréscimo do *duty cycle* promove o descolamento no ponto de operação do módulo para a direita sobre a curva de potência.

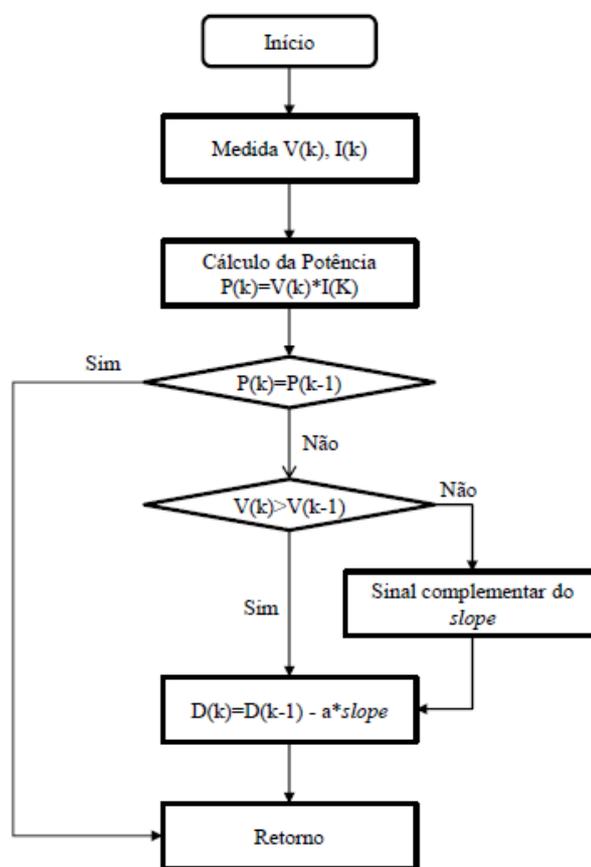


FIGURA 6. Fluxograma do funcionamento do algoritmo Hill Climbing (Fonte [5]).

Caso a tensão atual seja menor que a tensão anterior, uma inversão no sinal do *slope* ocorre devido à constate “a” e o *duty cycle* aumenta. O aumento dele gera um deslocamento do ponto de operação do módulo fotovoltaico para a esquerda. Logo, a partir das medições e comparações dos parâmetros do módulo, é possível que o seu ponto de operação de desloque sobre a curva da potência de um lado a outro até que o ponto de operação se estabilize no topo da curva da potência.

3. RESULTADOS

Após todos os procedimentos seguidos para a simulação do sistema com controle MPPT, a Figura 7 ilustra os valores de tensão, corrente e potência do módulo finais da simulação no módulo ZW85X115, cujo tempo foi de 10 segundos.

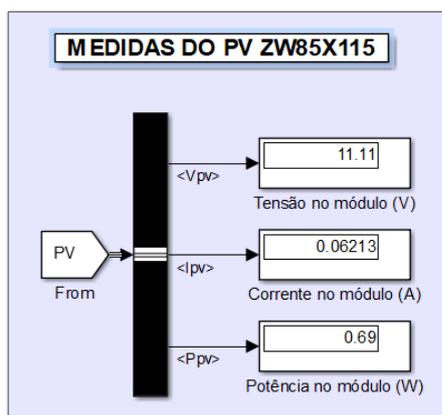


FIGURA 7. Resultados obtidos na simulação (autoria própria, 2023).

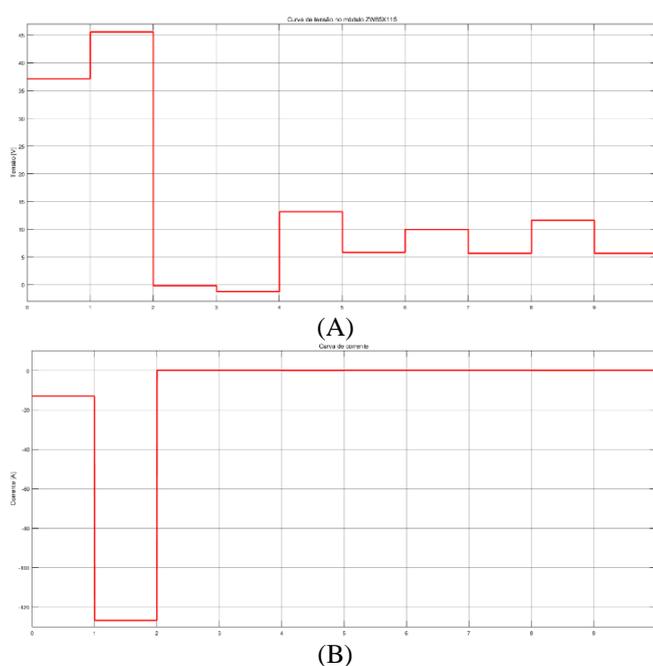
A Tabela 4 apresenta os valores experimentais obtidos, os valores simulados, assim como a diferença entre ambos. A maior diferença ocorreu para os valores de tensão, mas ainda considerado demasiado baixo, enquanto a corrente e a potência obtiveram valores muito similares entre os valores simulados e experimentais.

TABELA 4. Características do módulo fotovoltaico.

Descrição	Valores experimentais	Valores simulados	Diferença
Tensão [V]	11,31	11,11	0,20
Corrente [A]	0,06149	0,06213	$6,4 \times 10^{-4}$
Potência [W]	0,6953	0,69	$5,3 \times 10^{-3}$

Fonte: Autoria própria, 2023.

Os gráficos da tensão, corrente e potência no módulo ZW85X115 ao longo dos 10 segundos de simulação foram plotados e analisados individualmente, conforme mostra a Figura 8. A análise geral que se obtém da simulação durante o tempo total é que o circuito apresenta uma falha nos primeiros dois segundos da simulação, ilustrando valores muito discrepantes. Porém após esse tempo, os valores tendem a ficar mais estabilizados. Uma justificativa sobre os altos valores no início da simulação se deve provavelmente à interpretação do software Matlab/Simulink com relação aos valores iniciais de tensão e corrente dos componentes eletrônicos, principalmente os dispositivos armazenadores de energia.



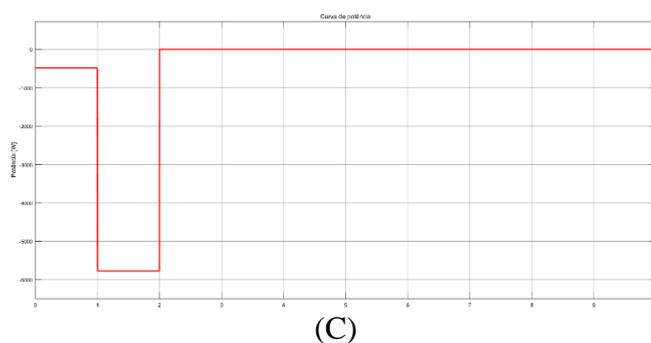


FIGURA 8. (A) Gráfico de tensão, (B) gráfico de corrente e (C) gráfico de potência no módulo ZW85X115 (autoria própria, 2023).

Devido aos valores do próprio módulo ZW85X115 serem bastante reduzidos, ampliou-se as curvas para análise mais detalhada do comportamento dos parâmetros elétricos. O método utilizado tem influência significativa sobre a tensão do módulo, pois à medida que o duty cycle varia, ele é capaz de aumentar ou diminuir a tensão sobre a curva da potência, e conseqüentemente alterando os valores de potência e corrente.

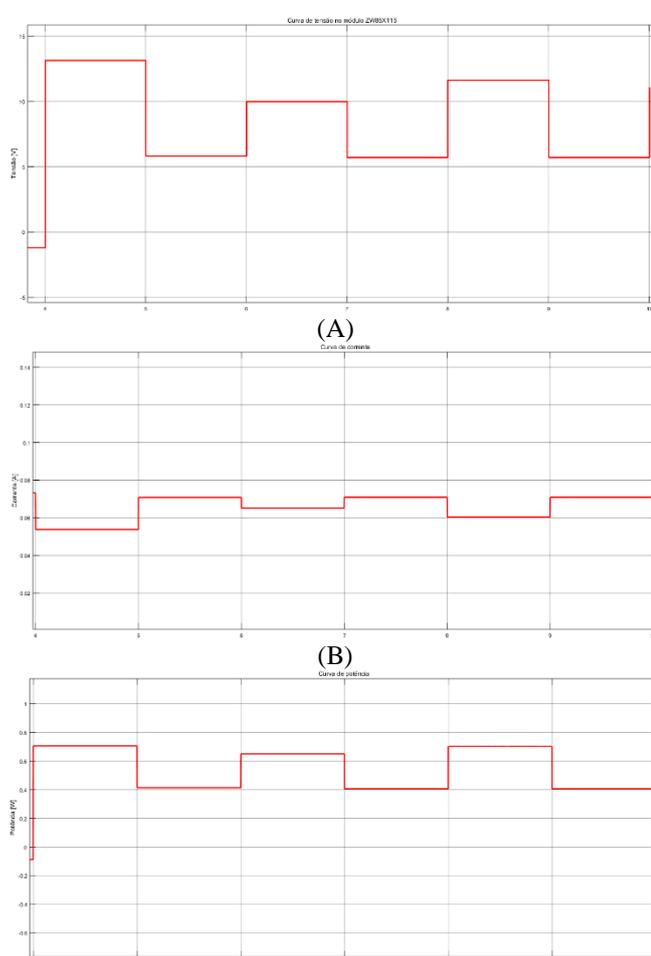


FIGURA 9. (A) Gráfico de tensão, (B) gráfico de corrente e (C) gráfico de potência no módulo ZW85X115 a partir dos 4 segundos de simulação (autoria própria, 2023).

De acordo com a Figura 9 (A), percebe-se que a tensão varia uma vez para cima e outra para baixo, significando que o algoritmo está rastreando o PMP. O comportamento da curva da corrente na Figura 9 (B) possui características inversas ao gráfico de tensão, indicando que o módulo está alterando também seu ponto de operação. O gráfico da potência na Figura 9 (C) possui características predominantemente similares ao da tensão, pois esta possui valores muito maiores que o da corrente. Outro ponto a ser observado é o valor do ciclo de trabalho final obtido na simulação. A Figura 10 apresenta o ciclo de trabalho final com valor de 0,4 ou 40%.

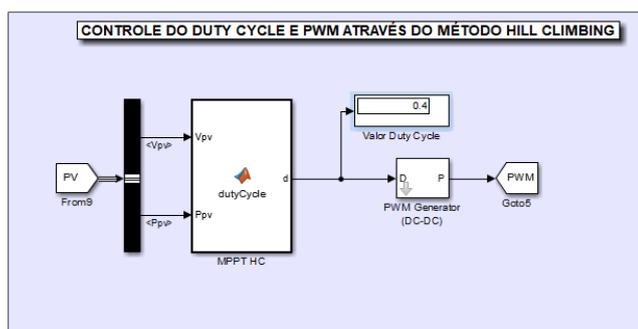


FIGURA 10. Resultados obtidos na simulação (autoria própria).

Logo, o valor do *duty cycle* se comparado com o resultado da equação (5), no qual se obteve *duty cycle* igual a 0,42 ou 42%, apresentam valores similares entre os resultados experimentais e os obtidos por meio da simulação.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal a abordagem da técnica para controle do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico ZW85X115 com a explanação de como os conversores atuam sobre o rastreamento do ponto de máxima potência (PMP) e o funcionamento do algoritmo Hill Climbing para o controle do rastreamento. A partir disso, se pôde construir no software Matlab/Simulink uma modelagem do próprio módulo fotovoltaico após a obtenção experimental dos seus parâmetros, para em seguida desenvolver o circuito conversor de rastreamento do ponto de máxima potência adequando a modelagem do módulo fotovoltaico ao conversor buck-boost e o circuito gerador do PWM.

A partir dos valores e gráficos obtidos diretamente da simulação, pode-se concluir que os valores foram bastante satisfatórios ao final do processo de simulação, embora nos primeiros 2 segundos ocorreram valores incongruentes para a estabilização inicial do circuito. Portanto, os valores de tensão, corrente, potência e ciclo de trabalho simulados apresentaram resultados bastante aproximados aos experimentais e calculados teoricamente. Com isso, pode-se concluir que o sistema modelado no software Matlab/Simulink através da técnica Hill Climbing, propiciou um bom rastreamento do PMP através da técnica MPPT.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, Luana Daiana de. "Estudos de técnicas de extração de máxima potência de painéis fotovoltaicos." (2019).
- [2] PINNHO T. J.; GALDINO A. M. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014.
- [3] GRUNDEMANN, Wagner Turchielo. "MPPT perturba e observa aplicado ao conversor Boost." (2017).
- [4] da COSTA, Wagner Teixeira. Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos. Diss. Universidade Federal do Espírito Santo, Brazil, 2010.
- [5] SILVA, Angélica da. Estudo comparativo entre técnicas de seguimento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos. MS thesis. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- [6] GOMES, Adjeferson Custódio. "Análise, projeto e implementação de um conversor Boost com técnica de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos." (2014).
- [7] PIRES, Lucas Pereira. "Proposta de uma nova técnica para extração global de máxima potência de módulos fotovoltaicos sem sensoriamento da corrente e da tensão provenientes da fileira fotovoltaica." (2019).
- [8] TESSLER, L. R.; LANDERS, R. Efeito Fotoelétrico. Laboratório de Física Moderna, 2015. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/efeito-fotoeletrico/>>. Acesso em: 30 Julho 2018.
- [9] CANADIANSOLAR. Folha de Dados CS6U-320P. Site da Canadian Solar. Disponível em: <<https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34226IdArquivo4451.pdf>>. Acesso em: 22 Janeiro 2020.
- [10] COELHO, Roberto Francisco. "Estudo dos conversores Buck e Boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos." (2008).