

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

Mikelly de Lima Farias
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
mikellylima17@gmail.com

Herick Talles Queiroz Lemos
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
herick.lemos@ufersa.com.br

Resumo — É perceptível atualmente que a sociedade tende a demandar gradativamente maior consumo de energia com o passar dos anos. Com isso, os países em sua maioria são responsáveis por buscar formas de suprir a demanda de energia, preferencialmente por meio de fontes renováveis que possuam pouco impacto ambiental. Atrelando o progresso e avanço da eficiência de conversão de energia junto à tendência mundial para utilização das fontes renováveis, a geração fotovoltaica tende a disseminar-se amplamente na utilização cotidiana para suprir a demanda energética. A energia solar possui uma gama de benefícios e vantagens na sua implementação, principalmente pelo caráter pouco poluente ao meio ambiente, ter o sol como fonte de energia primária inesgotável e ser de fácil implantação nos centros urbanos. Os painéis fotovoltaicos somente atingiram os patamares atuais de geração graças ao desenvolvimento da eletrônica de potência, porém sua eficiência ainda gira em torno de 17%, ao mesmo tempo que os parâmetros elétricos dos módulos solares são diretamente influenciados por fatores climáticos e ambientais, tornando seu controle mais complexo. Para isso, sistemas e técnicas vêm sendo criadas de forma a manter os sistemas fotovoltaicos operando com sua eficiência máxima independente dos fatores ambientais. Tais técnicas são denominadas sistemas de rastreamento do ponto de máxima potência ou 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 operando e entregando sua potência útil máxima à carga. Existem na literatura atualmente diversas técnicas de controle MPPT, porém a técnica abordada no presente trabalho será uma de fácil implementação denominada *Hill Climbing*. Desenvolveu-se em software de simulação a modelagem de um sistema de controle MPPT utilizando como conversor o tipo *buck-boost* controlado pelo algoritmo *Hill Climbing*. Após a modelagem foi possível analisar o funcionamento do algoritmo através do rastreamento do ponto de máxima potência e compará-los com os valores obtidos experimentalmente do módulo ZW85X115, utilizado como modelo para o presente trabalho. Obteve-se uma pequena diferença no comparativo entre os valores experimentais e simulados ocorreu de forma satisfatória.

Palavras-chaves — RPMP, *Hill Climbing*, buck-boost, PMP

I. 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 bastantes 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 tem 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 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 de dióxido de carbono, além de poder ser configurada com vários arranjos para obter a potência desejada, requerer baixo grau de manutenção, não há necessidade de operador humano e a instalação é simples e rápida. Outra vantagem, se encontra na instalação ser 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 19%. 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 RPMP 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 RPMP, 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 RPMP 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.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos e características da geração fotovoltaica, a relação das impedâncias de entrada do módulo fotovoltaico e a carga para o controle RPMP, assim como as técnicas de rastreamento de máxima potência.

A. Características construtivas e elétricas dos sistemas fotovoltaicos

A energia solar fotovoltaica é gerada por meio da conversão direta da luz em eletricidade, denominado efeito fotoelétrico, sendo descoberto ocasionalmente pelo físico francês Alexander Edmond Becquerel, em 1839, comprovado experimentalmente por Heinrich Hertz, e tendo posteriormente sua explicação através do físico Albert Einstein [8]. O desenvolvimento dessa tecnologia se deu principalmente pelo setor aeroespacial e de telecomunicações em locais remotos.

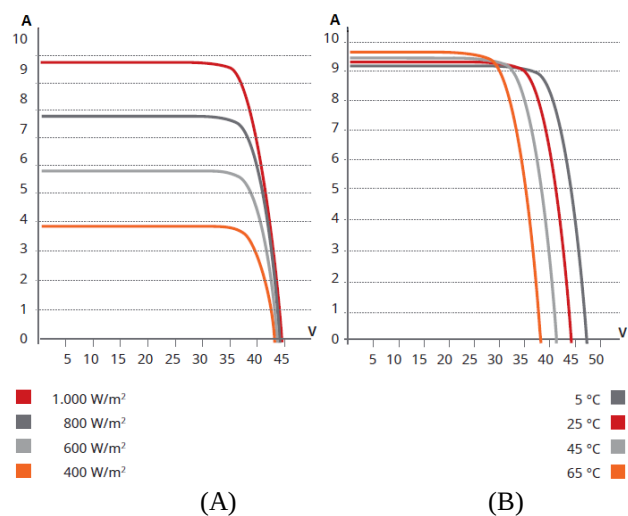
A descoberta do efeito fotoelétrico culminou com o desenvolvimento de tecnologias para geração de energia elétrica proveniente do sol, através da fabricação de painéis fotovoltaicos. Estes são constituídos de múltiplas células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, formadas de material semicondutor. A grande maioria dos módulos utilizam o silício monocristalino ou policristalino em sua fabricação, isso se deve principalmente ao avanço da tecnologia na purificação deste material semicondutor [6].

Os módulos são conectados em série e/ou paralelo com o objetivo de gerar a energia elétrica necessária para o consumo. Os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados ou autônomos, conectados à rede elétrica ou combinados com outras fontes de energia, denominados de sistemas híbridos. Geralmente o tipo de sistema fotovoltaico é influenciado pela disponibilidade energética das diferentes regiões de um país [2].

Estando os painéis fotovoltaicos diretamente relacionados com a geração de energia elétrica, segundo [7] as características da corrente estão intimamente ligadas à tensão nos terminais no módulo, à temperatura no ambiente de instalação e a radiação solar. A irradiância e a temperatura são os principais fatores ambientais que influenciam nas características elétricas dos painéis fotovoltaicos.

Um modo de análise do comportamento elétrico dos painéis solares se dá por meio da sua curva Corrente *versus* Tensão (Curva I-V), considerada uma das curvas mais relevantes na análise da eficiência dos módulos. A obtenção da curva I-V é feita pela variação da carga nos terminais do painel fotovoltaico para uma dada radiação solar [3]. À medida que a carga varia, os valores de corrente e tensão formam a curva característica. A Figura 1(A) mostra a variação da corrente de acordo com a variação da irradiância para uma temperatura constante de 25 °C e a figura 1(B) apresenta a variação acentuada da tensão para diferentes valores de temperatura com irradiância constante de 1000 W/m². Nota-se que a corrente do módulo tende a crescer linearmente com o aumento da irradiância, enquanto o aumento da temperatura no módulo ocasiona um decaimento no ponto de máxima potência, tendo maior influência sobre a tensão nos terminais do painel fotovoltaico [6].

Figura 1 – (A) Curva I-V com variação da irradiância para temperatura constante de 25°C e (B) curva I-V com variação da temperatura para irradiância constante de 1000 W/m².



Fonte: [9].

O produto da tensão pela corrente forma a curva da potência, no qual tem um pico característico onde o ponto mais alto é considerado o ponto de máxima potência (PMP) desenvolvida pelo painel fotovoltaico. No PMP a tensão e a corrente são denominadas de V_{MP} e I_{MP} , respectivamente [7]. Com o desenvolvimento da tecnologia nos últimos anos, mecanismos de controle foram criados para que haja o controle dos parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico, e assim a sua máxima potência seja entregue pelo painel.

B. Conversores

A eletrônica de potência possui alto grau de contribuição no desenvolvimento da tecnologia relacionada

à energia fotovoltaica, pois através dos circuitos eletrônicos é possível se alterar e controlar níveis de tensão e corrente para alimentação de cargas diversas. Os circuitos responsáveis pela alteração dos parâmetros de painéis fotovoltaicos são os chamados conversores de potência, geralmente localizados entre o painel fotovoltaico e a carga. Os conversores têm como finalidade manter a alimentação adequada da carga e alterar os parâmetros de tensão e corrente para que o painel fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, independentemente de qualquer alteração climática [3].

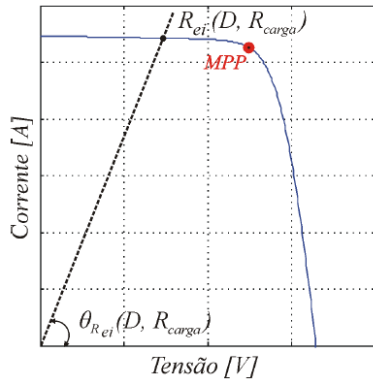
Sabendo que os módulos fotovoltaicos são demasiadamente dependentes de fatores climáticos, os conversores solucionam a influência de tais fatores sobre a atuação dos mesmos [5]. Determinadas técnicas atuam sobre o conversor, alterando seu ciclo de trabalho ou implementando sistemas de controle com projeção de ganho. A alteração dos parâmetros pelos conversores ocorre devido aos seus elementos armazenadores de energia, como indutores e capacitores, diodos e elementos de chaveamento que regulam o fluxo de potência entregue à carga.

Os conversores CC-CC têm função fundamental nos sistemas MPPT, pois são responsáveis pela alteração dos parâmetros elétricos do sistema, como tensão e corrente, fazendo com que a potência proveniente dos módulos fotovoltaicos atinja valor máximo ou próximo a ele. Tais conversores associados a técnicas que utilizam algoritmos tem grande potencial para controle e seguimento no ponto de máxima potência [6].

C. Atuação dos conversores no controle MPPT

Segundo [10], para análise dos circuitos rastreadores de máxima potência, inicialmente deve-se considerar a relação da resistência equivalente total vista nos terminais do módulo fotovoltaico, também denominada resistência efetiva de entrada (R_{ei}), com a resistência da carga (R_{carga}). Em termos gerais, a resistência efetiva de entrada é variável e dependente do ciclo de trabalho (D) e da resistência da carga (R_{carga}). Outro fator a ser observado refere-se ao ângulo formado pela curva de carga referente à resistência equivalente de entrada, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Curva de carga da resistência efetiva de entrada R_{ei} .



Fonte: [10].

A partir da Figura 2, percebe-se como o conversor atua no rastreamento do ponto de máxima potência através da mudança do ciclo de trabalho D . A região de operação de um conversor compreende a área do gráfico que abrange a variação do ciclo de trabalho de 0 a 1 [5]. As regiões de

operação dos conversores buck, boost e buck-boost são obtidas a partir da substituição do valor da resistência efetiva de entrada (R_{ei}) na fórmula do ângulo da resistência efetiva de entrada (θ_{ei}) apresentada na Equação (1).

$$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = \text{atan}\left(\frac{1}{R_{ei}(D, R_{carga})}\right) \quad (1)$$

A Tabela 1 apresenta as equações da resistência efetiva de entrada para os três tipos de conversores, assim como os valores obtidos limites da região de operação com o ciclo de trabalho variando de 0 a 1.

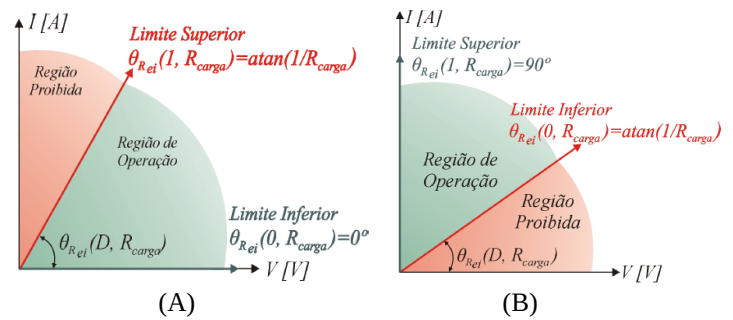
Tabela 1 – Regiões de operação dos conversores buck, boost e buck-boost.

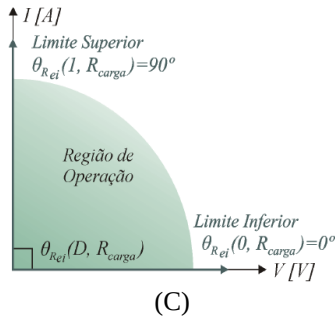
Conversor	Equações
Buck	$R_{ei}(D, R_{carga}) = \frac{R_{carga}}{D^2}$
$D = 0$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = 0^\circ$
$D = 1$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = \text{atan}\left(\frac{1}{R_{carga}}\right)$
Boost	$R_{ei}(D, R_{carga}) = (1 - D)^2 R_{carga}$
$D = 0$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = \text{atan}\left(\frac{1}{R_{carga}}\right)$
$D = 1$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = 90^\circ$
Buck-boost	$R_{ei}(D, R_{carga}) = \frac{(1 - D)^2 R_{carga}}{D^2}$
$D = 0$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = 0^\circ$
$D = 1$	$\theta_{ei}(D, R_{carga}) = 90^\circ$

Fonte: Autoria própria, 2020.

Como se observa da Tabela 1, os conversores buck e boost possuem uma região de operação no qual se pode varrer o PMP e uma região proibida, tornando-os limitados devido à sua incapacidade do controle total da região do primeiro quadrante. Porém o conversor buck-boost, considerado elevador-abaixador da tensão de saída, permite ao sistema a capacidade de rastreamento de toda a extensão do gráfico de Corrente versus Tensão dos módulos fotovoltaicos [10]. A Figura 3 demonstra as regiões de operação e suas regiões proibidas considerando os três tipos de conversores.

Figura 3 – (A) Região de operação para o conversor buck, (B) região de operação para o conversor boost e (C) região de operação para o conversor buck-boost.





(C)
Fonte: [10].

Fazendo um comparativo entre os conversores, pode-se afirmar que o buck-boost é mais adequado para utilização no rastreamento do ponto de máxima potência, pois sua região de operação permite uma ampla faixa de varredura do PMP em todo o primeiro quadrante.

D. Algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP)

A mudança da temperatura nas células fotovoltaicas ocorre de forma geralmente lenta, chegando a dezenas de segundos, porém a irradiância pode manifestar mudanças em cerca de segundos, ocasionados por condições adversas como sombreamento por árvores, nuvens, edificações, sujeiras, entre outras [2]. Isso promove alterações na curva característica dos painéis fotovoltaicos, gerando falsos PMP e tornando a extração do ponto de máxima potência ineficiente. Muitas técnicas vêm sendo desenvolvidas para melhorar o controle e o desempenho de circuitos como os painéis fotovoltaicos, que se comportam como uma fonte não linear com uma carga arbitrária. Os valores de tensão e corrente de saída dos módulos são utilizados como valores de alimentação das técnicas e algoritmos para o rastreamento da máxima potência [10].

Diante de muitos métodos, destacam-se as técnicas que utilizam inteligência artificial, como Lógica Fuzzy e Redes Neurais, métodos da Tensão Constante, Condutância Incremental, Perturba & Observa, e o Hill Climbing (HC), sendo esta última, uma variação da técnica Perturba & Observa. A técnica do Hill Climbing utiliza um algoritmo que rastreia a curva de Potência versus Tensão (Curva P-V). O formato da curva P-V se assemelha a uma colina, sendo que o ponto de máxima potência se encontra no topo da curva. Logo o algoritmo utilizado no método HC desloca o ponto de operação do módulo fotovoltaico em direção ao PMP, simulando uma escalada. O ciclo de trabalho se comporta como uma variável de controle, influenciando diretamente a mudança de estado da chave do conversor [6]. A técnica leva em consideração um comparativo inicial entre a potência atual e a potência anterior, de modo que se ambas divergirem, a região cíclica varia para cima ou para baixo, elevando ou diminuindo o valor da tensão do módulo e com isso rastreando o PMP. A técnica estagna no momento que a potência obtém um valor constate, indicando que o ponto de máxima potência foi alcançado.

III. METODOLOGIA

Esta seção é dedicada à explanação da metodologia aplicada para a modelagem do módulo fotovoltaico e sua simulação computacional junto ao circuito de controle, e alcance do ponto de máxima potência por meio do algoritmo escolhido.

1. Características do módulo

O módulo utilizado é de pequena dimensão para a realização do experimento e possui as características conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Características do módulo fotovoltaico.

Características	Descrição
Modelo	ZW85X115
Material	Policristalino
Dimensões	8cm x 11,5cm

Fonte: Autoria própria, 2020.

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 experimental no qual obteve-se sua curva Corrente versus Tensão. Por meio da curva I-V foi possível obter os parâmetros necessários conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do módulo fotovoltaico.

Parâmetros	Valor
Corrente de curto-circuito [I_{CC}]	0,073 A
Tensão de circuito aberto [V_{OC}]	19 V
Corrente de máxima potência [I_{mp}]	0,06149 A
Tensão de máxima potência [V_{mp}]	11,31 V
Ponto de máxima potência [P_{mp}]	0,6953 W
Irradiância [I_R]	1000 W/m ²
Temperatura do módulo [T]	37 °C

Fonte: Autoria própria, 2020.

3. Modelagem do módulo fotovoltaico por meio do modelo de diodo ideal

Com a finalidade de obter-se os dados mais aproximados do módulo empregado, optou-se pela utilização do modelo de diodo ideal, consistindo em uma fonte de corrente em paralelo a um diodo junto a uma carga resistiva. A partir da utilização do método de Newton-Raphson, foi possível obter a corrente de saturação e fator de idealidade do módulo. Tais parâmetros encontram-se especificados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros encontrados por meio da utilização do método de Newton-Raphson.

Parâmetros	Valor
Corrente de saturação [I_{SC}]	$5.703037204977991e^{-04}$ A
Fator de idealidade [A_n]	$1.386490442589101e^{+02}$

Fonte: Autoria própria, 2020.

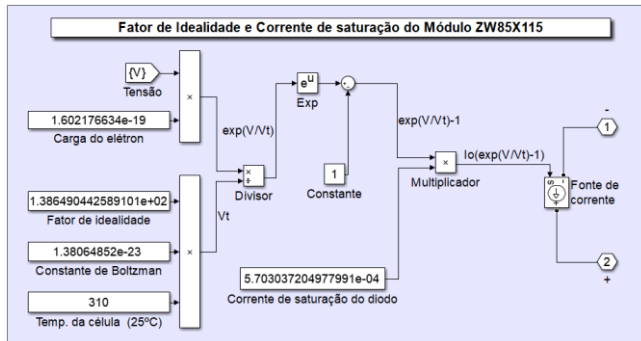
Após a obtenção da corrente de saturação reversa e fator de idealidade do módulo, iniciou-se o processo de construção da simulação computacional. Para a construção do modelo foi construído um bloco (Figura 4) representando a Equação (2), correspondente à corrente que circula no modelo de diodo ideal.

$$I_S \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T_C \cdot A_n}} - 1 \right) \quad (2)$$

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);
 An : fator de idealidade do diodo.

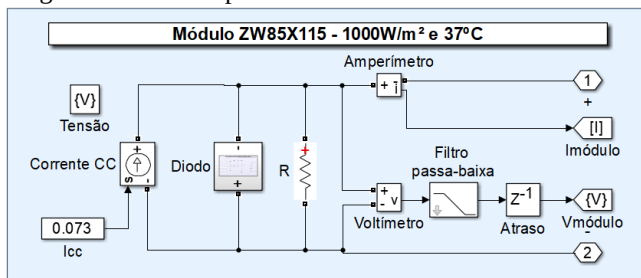
Figura 4 – Bloco representativo para geração da corrente do diodo.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O circuito do modelo de diodo ideal encontra-se ilustrado da Figura 5. 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 atraso. Esses elementos foram adicionados com a finalidade de melhor acompanhamento dos dados de tensão devido às fortes variações no início da simulação, pois os componentes levam algum tempo para a estabilização de seus valores.

Figura 5 – Bloco representativo do modelo de diodo ideal.



Fonte: Autoria própria, 2020.

4. Dimensionamento do conversor buck-boost

Para o dimensionamento do conversor buck-boost fixou-se uma frequência de 7,8 kHz. 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 (3), onde D é o duty cycle ou ciclo de trabalho.

$$R_{ei}(D, R_{carga}) = \frac{(1 - D)^2 R_{carga}}{D^2} \quad (3)$$

O ciclo de trabalho 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 (4).

$$R_{ei} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{11,31}{0,06149} = 183,93 \Omega \quad (4)$$

Substituindo o valor de R_{ei} e R_{carga} na Equação (3), obtemos a Equação (5) de segundo grau.

$$- 83,93D^2 - 200D + 100 = 0 \quad (5)$$

Temos como raízes da equação (5), $D' = 0,42$ e $D'' = -2,81$. Logo o ciclo de trabalho 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 (6).

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

O cálculo da capacitância mínima é apresentado na Equação (7).

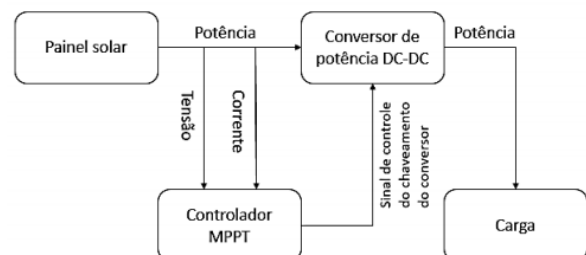
$$C = \frac{V_s d}{R \Delta v f} = \frac{12 * 0,6}{100 * 0,05 * 7800} = 184,61 \mu F \quad (7)$$

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

5. Simulação computacional do circuito para o controle MPPT

O esquema do circuito é ilustrado conforme mostra a Figura 6. 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.

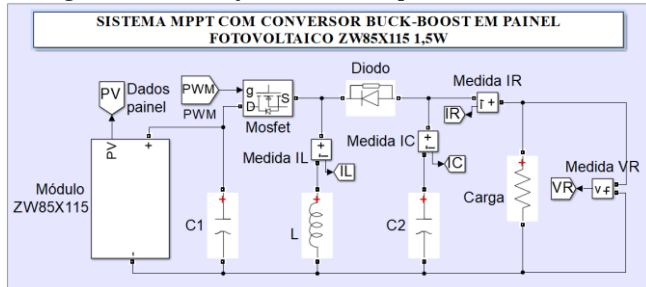
Figura 6 – Bloco representativo do circuito para controle MPPT.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 7 ilustra a construção da simulação do circuito no software. Medidores de tensão e corrente foram implementados 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 7 – Simulação do circuito para controle MPPT.



Fonte: Autoria própria, 2020.

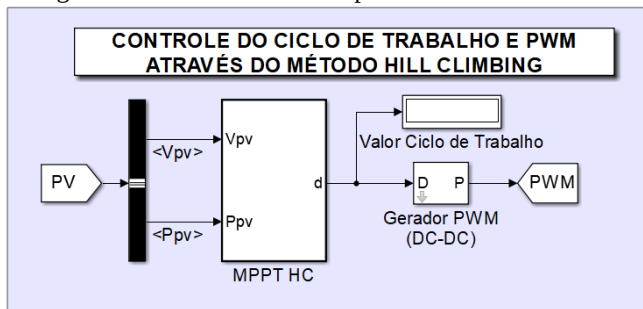
O PWM (*Pulse Width Modulation*) inserido no gate do mosfet é controlado através do circuito gerador de PWM. Tal circuito é controlado pelo algoritmo Hill Climbing, rastreador do ponto de máxima potência, ao qual modifica o duty cycle do PWM para que o PMP seja alcançado.

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 com a finalidade de chegar ao topo e permanecer.

A Figura 8 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 *dutyCycle*, 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 8 – Controle do PWM por meio do método HC.

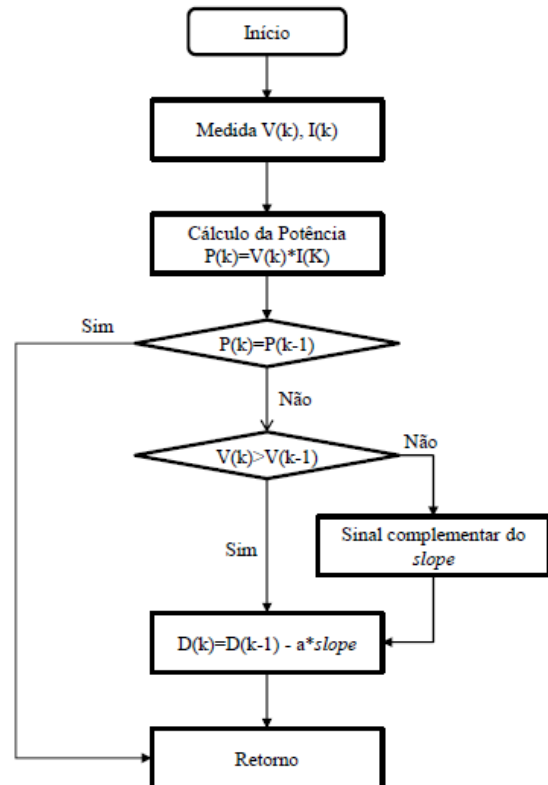


Fonte: Autoria própria, 2020.

O algoritmo Hill Climbing foi produzido conforme representação esquemática da Figura 9. Inicialmente se têm um comparativo entre a potência atual $P(k)$ e a potência

anterior $P(k-1)$. Caso os valores de potência sejam diferentes, o algoritmo procede para uma comparação de tensões, no qual se a tensão atual $V(k)$ for maior que a tensão anterior $V(k-1)$, o ciclo de trabalho recebe alteração através do decréscimo ocasionado pelo slope. O decréscimo do ciclo de trabalho promove o deslocamento no ponto de operação do módulo para a direita sobre a curva de potência.

Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo Hill Climbing.



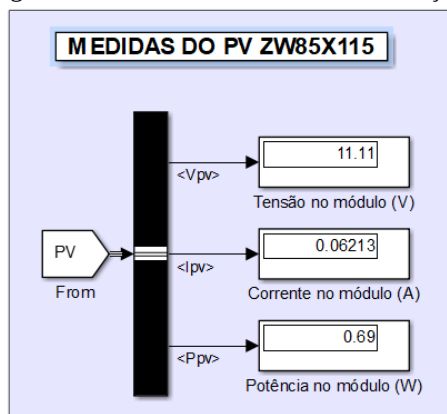
Fonte: [5].

Caso a tensão atual $V(k)$ seja menor que a tensão anterior $V(k-1)$, uma inversão no sinal do slope ocorre devido à constate “a” e o ciclo de trabalho aumenta. O aumento do mesmo 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.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

Figura 10 – Resultados obtidos na simulação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Tabela 6 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.

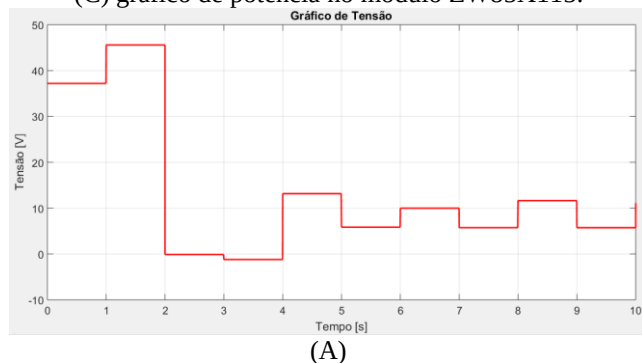
Tabela 3 – Características do módulo fotovoltaico.

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	$5,3 \times 10^{-3}$

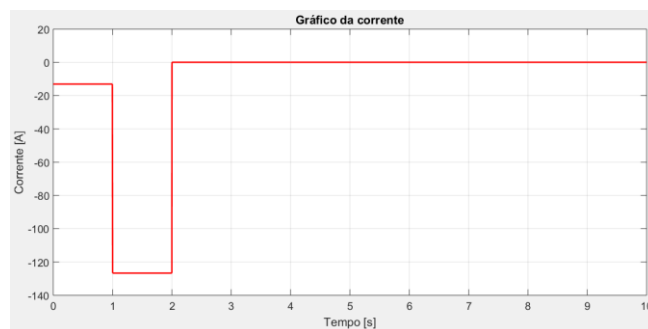
Fonte: Autoria própria, 2020.

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 11. 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 de simulação com relação aos valores iniciais de tensão e corrente dos componentes eletrônicos, principalmente os dispositivos armazenadores de energia.

Figura 11 – (A) Gráfico de tensão, (B) gráfico de corrente e (C) gráfico de potência no módulo ZW85X115.



(A)



(B)

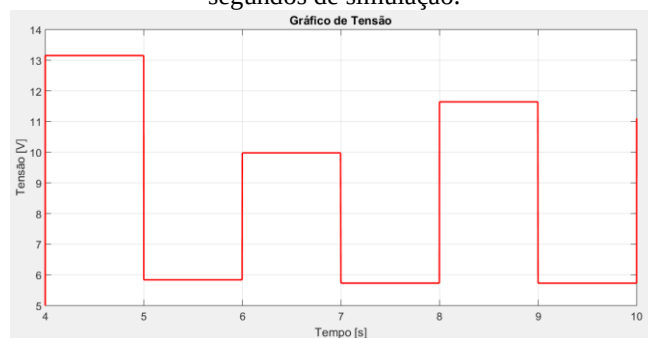


(C)

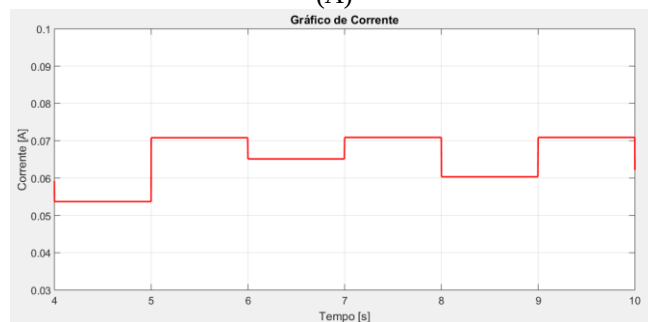
Fonte: Autoria própria, 2020.

Devido aos valores de corrente e potência do 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 ciclo de trabalho varia, ele é capaz de aumentar ou diminuir a tensão sobre a curva da potência, e consequentemente alterar os valores de potência e corrente.

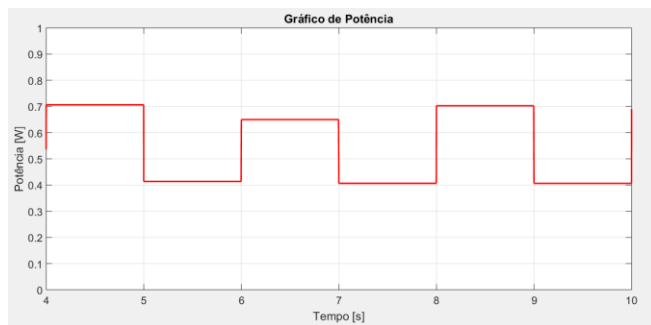
Figura 12 – (A) Gráfico de tensão, (B) gráfico de corrente e (C) gráfico de potência no módulo ZW85X115 a partir dos 4 segundos de simulação.



(A)



(B)

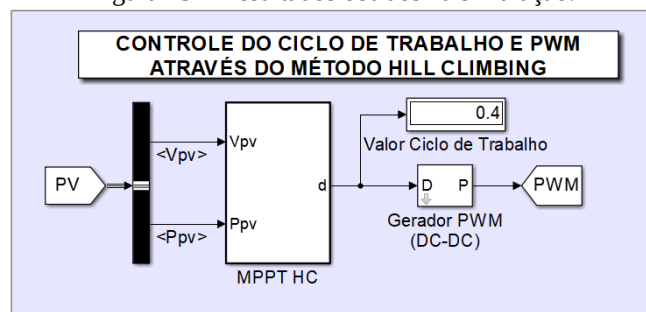


(C)

Fonte: Autoria própria, 2020.

De acordo com a Figura 12 (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 12 (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 12 (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 13 apresenta o ciclo de trabalho final com valor de 0,4 ou 40%.

Figura 13 – Resultados obtidos na simulação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

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

V. 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 de simulação 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

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 de simulação 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: CEPEL-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 sensoramento 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).