

Simulação de conversor *buck-boost* com RPMP por condutância incremental aplicado a módulos fotovoltaicos

Gabriel Luiz Dantas Lopes Nogueira^[1], Ednardo Pereira da Rocha^[2] e Herick Talles Queiroz Lemos^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; gabriel.nogueira@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[3] Instituto Federal de Pernambuco; herick.lemos@pesqueira.ifpe.edu.br

Resumo: A energia solar fotovoltaica é uma fonte renovável crucial para a geração de energia sustentável que cresceu substancialmente nas últimas décadas e ocasiona a constante busca pela otimização da eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A aplicação de algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP) é considerada a abordagem mais apropriada para a maximização da eficiência do sistema. Este trabalho aborda a modelagem matemática de módulos fotovoltaicos, com ênfase no modelo de diodo ideal e explora o dimensionamento de conversores CC-CC do tipo *buck-boost* e na utilização do algoritmo da condutância incremental para rastreamento do PMP. As simulações computacionais foram realizadas a partir do *software* MATLAB/Simulink, que serviu como *software* de base para modelar o módulo CS6W-530MS e sua integração ao conversor e ao algoritmo. Os principais resultados revelaram que por meio da técnica da condutância incremental, o algoritmo de RPMP demonstrou eficácia na busca do ponto de máxima potência, mesmo em condições climáticas variáveis. A análise das curvas de potência, tensão e corrente ao longo do tempo refletiu um desempenho satisfatório do sistema, com períodos transitórios oscilantes, porém com erros de estado estacionário abaixo de 1% e tempo de acomodação inferior 0,15s em todas as curvas geradas.

Palavras-chave: energia solar; simulação computacional; rastreamento do ponto de máxima potência; condutância incremental.

Abstract: Photovoltaic solar energy is a crucial renewable source for sustainable power generation, which has experienced substantial growth in recent decades, prompting a continuous quest for optimizing the efficiency of photovoltaic systems. The application of Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms is considered the most appropriate approach to maximize system efficiency. This study delves into the mathematical modeling of photovoltaic modules, with a focus on the ideal diode model, and explores the design of buck-boost DC-DC converters in conjunction with the use of the incremental conductance algorithm for MPPT. The Simulations were conducted using MATLAB/Simulink, serving as the foundational software to model the CS6W-530MS module and its integration with the converter and algorithm. The main findings indicate that, through the incremental conductance technique, the MPPT algorithm demonstrated effectiveness in tracking the maximum power point, even under variable weather conditions. The analysis of power, voltage, and current curves over time reflected a satisfactory system performance, with oscillating transient periods but steady-state errors below 1% and accommodation times below 0.15 seconds in all generated graphs.

Key-words: solar power; computer simulation; maximum power point tracking; incremental conductance.

1. INTRODUÇÃO

O término da década de 1960 viu o surgimento de debates, análises e investigações sobre os impactos ambientais insustentáveis das ações humanas. Estas conversas levaram à reestruturação de instituições voltadas para abordar a eficiência energética como estratégia para reduzir o consumo de recursos oriundos de combustíveis fósseis e a produção de gases de efeito estufa [1].

No contexto atual, o desenvolvimento econômico e aumento desenfreado da população vem exigindo das nações uma demanda ilimitada de energia elétrica. No entanto, os recursos naturais para sua geração estão se esgotando. O uso crescente de dispositivos elétricos e a produção industrial aumentam o consumo de eletricidade e as emissões de gases poluentes, agravando o efeito estufa. Assim, as nações estão buscando alternativas de geração de energia mais sustentáveis e economicamente viáveis devido aos altos custos e

impactos financeiros das fontes de energia atuais. Isso inclui o uso de energias renováveis, que não só reduzem as emissões, mas também estão se tornando mais economicamente acessíveis [2].

No Cenário brasileiro, um fator que pode influenciar o crescimento do setor de energias renováveis é que o Brasil possui fontes de energia, como a hidrelétrica, que, apesar do impacto ambiental da construção de usinas e do alto investimento inicial, resultam em custos mais baixos de eletricidade em comparação com outras fontes [2].

Dentre as energias que mais têm crescido, destaca-se a energia solar que tem como vantagens a abundância, acessibilidade e inesgotabilidade; a ausência de resíduos na geração de energia pelos painéis fotovoltaicos; a longa vida útil dos módulos fotovoltaicos devido à falta de partes móveis, possibilitando até 30 anos de operação; e a característica modular dos painéis fotovoltaicos, permitindo uma expansão simplificada do sistema [3].

Tendo isso em vista, segundo [2], a geografia do país é extremamente propícia à geração de energia solar, uma vez que a média diária de irradiação solar ao longo de um ano em qualquer região do território brasileiro varia entre 4,1 e 6,5 kWh/m², que possibilitou um crescimento exponencial como uma das principais fontes de energia renovável na última década, de acordo com o relatório anual do Balanço Energético Nacional [4].

A geração distribuída, por exemplo, registrou um aumento de 87,8% em comparação com 2022, com a energia solar representando uma parcela de 94,3% da micro e mini geração distribuída no Brasil durante o ano 2021. Esse aumento tem incentivado uma série de estudos para otimizar o desempenho e a eficácia dos sistemas de módulos fotovoltaicos [4].

De acordo com [5], um dos principais fatores que limita o uso da energia solar é a eficiência de conversão das células solares, que varia entre 6% e 19% da energia da energia absorvida em razão de perdas. Uma maneira de melhorar a baixa eficiência dos sistemas fotovoltaicos é por meio da implementação de sistemas de controle para rastrear o ponto de máxima potência pois os sistemas fotovoltaicos alcançam sua eficiência máxima quando operam no ponto de máxima potência (PMP) da curva de Potência versus Tensão (P-V) [6].

Além disso, a geração de energia por painéis fotovoltaicos é impactada pelas condições climáticas predominantes na área onde estão instalados. Portanto, é essencial que o sistema responda bem às flutuações de irradiação e temperatura, já que essas variáveis podem diminuir a eficiência do sistema [3].

Os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP), ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), têm o potencial de aprimorar o desempenho em um intervalo de 15% a 30%. Os principais critérios para isso são a capacidade de convergência, a garantia de uma resposta dinâmica rápida, a minimização do erro em condições de equilíbrio, a habilidade de lidar com perturbações e a consistência da eficiência em diferentes níveis de potência [7].

Sendo assim, essas técnicas são aplicadas ao sistema de controle por meio de algoritmos associados a conversores CC-CC, que é o componente que interpreta os dados do algoritmo e gera o sinal de saída do módulo fotovoltaico. Logo, a escolha do tipo de conversor é de extrema importância, pois deve estar em conformidade com a aplicação [6].

Além do mais, dentre as várias estratégias de MPPT existentes, muitas são complicadas de implementar, exigem muito processamento de dados e frequentemente necessitam da medição de diversas variáveis físicas, como irradiação, temperatura, tensão e corrente dos módulos, além de tensão e corrente na conexão com a rede elétrica, que aumentam os custos de fabricação do sistema [8].

Portanto, este trabalho tem como objetivo simular um módulo fotovoltaico arbitrário utilizando uma RPMP da condutância incremental, que se fundamenta no princípio de que a potência não varia com a tensão quando o ponto de máxima potência (PMP) é atingido, observado a partir da curva P-V. Logo, o PMP pode ser determinado com base no incremento ou decremento observado na condutância. Ao final, será feita uma análise comparativa entre a simulação e os dados do fabricante com base nas formas de onda da tensão, corrente e potência no PMP.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresentará os principais conceitos, utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, partindo desde os princípios da energia solar, modelagem matemática do módulo fotovoltaico, definições básicas de conversores CC-CC e os algoritmos de RPMP, com foco na condutância incremental.

2.1. Princípios da geração solar fotovoltaica

A geração de energia elétrica a partir da energia proveniente dos raios solares é possível graças ao efeito fotovoltaico, que foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel que mediu uma tensão em uma solução condutora quando exposta à luz do sol. Posteriormente, em 1880, os estudos envolvendo este efeito foram ampliados na construção da primeira célula fotovoltaica, construída utilizando selênio (Se), obtendo uma eficiência de 2% [9].

Atualmente, a grande parte das aplicações práticas envolvendo energia solar são com semicondutores de silício, que teve suas pesquisas iniciadas na década de 1950. Processos mais elaborados permitem que se alcance limite uma eficiência de conversão máxima teórica para uma célula solar de até 33,5%, porém em aplicações

comerciais de módulos fotovoltaicos (conjunto de várias células fotovoltaicas), a eficiência chega à ordem 15% a 18% [7, 9].

Comercialmente, os módulos são conectados aos sistemas de energia a partir de combinações (série e/ou paralelo) a fim de gerar energia necessária dentre os níveis de tensão e corrente sistema, que também estão diretamente relacionadas às características climáticas (irradiação e temperatura) da região a qual o sistema está instalado, conforme pode ser observado na Figura 2 [3, 5].

A Figura 1 ilustra as curvas características I-V e P-V de um módulo fotovoltaico arbitrário. Os principais pontos nessas curvas incluem o PMP, localizado no ponto mais elevado da curva P-V, representando a potência máxima que o módulo pode gerar. Na curva I-V, este ponto caracteriza a corrente e tensão de máxima potência (I_{mp} e V_{mp}). Além disso, vale destacar também a Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}), que corresponde à corrente quando a tensão do módulo é igual a zero, e a Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}), que é a tensão quando a corrente do módulo é nula.

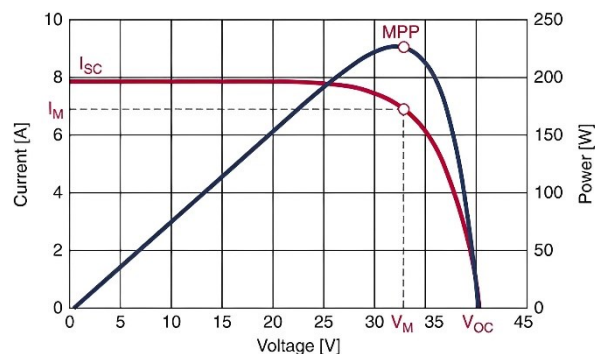


FIGURA 1. Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico sobrepostas [10].

A Figura 2 exibe a curva I-V do módulo fotovoltaico CS6W-530MS da Canadian Solar®, que será o módulo adotado como objeto de estudo nesta pesquisa, onde é mostrada como a curva característica varia em resposta às mudanças na irradiação solar e revela o impacto da temperatura sobre essa mesma curva.

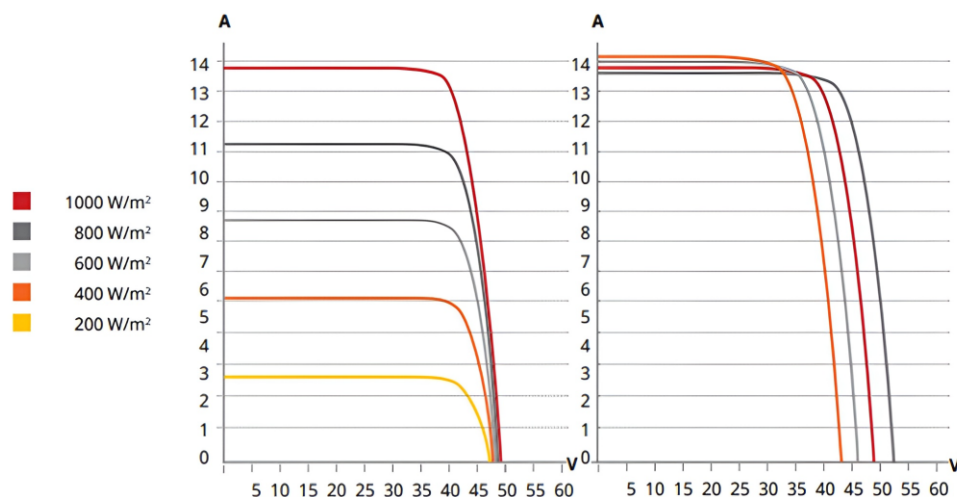


FIGURA 2. Curvas I-V do módulo CS6W-530MS [11].

Os sistemas de energia fotovoltaica, para se tornarem praticamente utilizáveis, necessitam fornecer energia de corrente alternada (CA). Isso ocorre devido ao fato de que a maioria dos dispositivos elétricos empregados em residências, estabelecimentos comerciais, instalações industriais, entre outros, operam com energia em corrente alternada, enquanto os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (CC). Assim, um dos componentes responsáveis por fazer a conversão CC/CA é o inversor.

Este trabalho se contera apenas à análise da corrente contínua, utilizando primeiro estágio do inversor que são os conversores CC-CC, que faz a interface do inversor com os algoritmos RPMP. Nas próximas seções serão exploradas as técnicas de modelagem matemática do módulo, os tipos de conversores CC-CC e algoritmos de RPMP e sua interface com os algoritmos RPMP.

2.2. Modelagem de módulos fotovoltaicos

De acordo com [12], na literatura, podem ser encontrados diversos modelos matemáticos que têm como propósito descrever o comportamento do gerador fotovoltaico. Estes modelos exibem variações significativas tanto no processo de cálculo quanto na sua precisão, além de diferirem na quantidade de parâmetros incorporados na análise das características corrente-tensão.

As versões mais comuns são as baseadas no diodo de Shockley sendo os modelos mais comuns: diodo ideal, diodo ideal e dois diodos. O modelo de diodo ideal que consiste em uma fonte de corrente constante em paralelo com um diodo e é descrito por três parâmetros: a corrente foto gerada, corrente de saturação e o fator de idealidade do diodo [13].

O modelo de diodo simples envolve uma fonte de corrente constante em paralelo com um diodo, complementado por duas resistências: uma em série e outra em paralelo. O modelo de dois diodos, por outro lado, compreende uma fonte de corrente constante em paralelo com dois diodos [13].

Neste trabalho será abordado apenas o modelo de diodo ideal, devido a simplicidade de sua estrutura para a modelagem e simulação. A Figura 3 mostra o circuito equivalente do modelo de diodo ideal, no qual a fonte de corrente gera a corrente foto gerada (I_{ph}), que é diretamente proporcional à irradiância solar (G) [12].

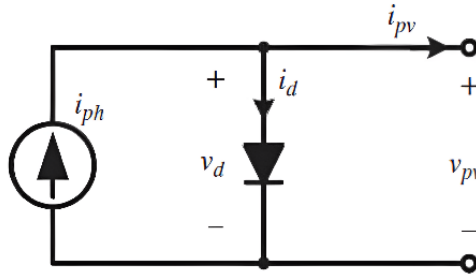


Figura 3. Circuito equivalente do modelo de diodo ideal [13].

A Equação 1 rege a relação corrente-tensão do circuito equivalente simplificado é deduzida a da Lei de Kirchhoff [12].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV_d}{KT_c A_n}} - 1 \right) \quad (1)$$

No qual:

- I_{pv} e V_{pv} são a corrente (A) e tensão (V) nos terminais de saída do módulo, respectivamente;
- I_s é a corrente de saturação de polarização reversa do diodo (A);
- V_d é tensão no diodo, que neste caso $V_d = V_{pv}$ (V);
- q é a carga elementar do elétron, que equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ C;
- K é constante de Boltzmann, que equivale a $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;
- T_c é a temperatura da célula (K);
- A_n é o fator de idealidade do diodo.

Conforme citado, os parâmetros que descrevem o modelo ideal são a corrente foto gerada, corrente de saturação e o fator de idealidade do diodo, que podem ser obtidos por meio das condições de teste padrão (*Standard Test Conditions* – STC) para curto-circuito, circuito aberto e operação no ponto de máxima potência [13]. A Tabela 1 mostra a relação três condições com as variáveis da Equação 1.

TABELA 1. Valores de cada variável para cada condição (adaptado de [13])

Condição	I_{pv}	V_{pv}	I_d	I_{ph}
Curto-circuito	I_{sc}	0	0	I_{sc}
Circuito aberto	0	V_{oc}	I_{ph}	$I_s \left(e^{\frac{qV_d}{KT_c A_n}} - 1 \right)$
Máxima potência	I_{mp}	V_{mp}	$I_{ph} - I_{mp}$	$I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{qV_d}{KT_c A_n}} - 1 \right)$

As condições postas na Tabela 1 representam um sistema de equações não lineares. O método iterativo mais reconhecido e utilizado para solucionar esse tipo sistema é o de Newton-Raphson, que envolve a criação de um modelo linear local, baseado nas derivadas parciais da função $F(x)$ [14]. O método pode ser entendido melhor a partir da Equação 2.

$$[x]_{i+1} = [x]_i - J[x]^{-1} F(x) \quad (2)$$

No qual:

- $[x]_{i+1}$ é a próxima matriz de valores da função na iteração;
- $[x]_i$ é a matriz atual de valores da função na iteração;
- $F(x)$ é a matriz que contém o sistema de equações não lineares;
- $J[(x)]^{-1}$ é o inverso da matriz jacobiana, que contém as derivadas parciais de $F(x)$.

Para garantir a eficácia do procedimento iterativo, é necessário selecionar um valor inicial que esteja suficientemente próximo do valor desejado da raiz. Consequentemente, a interpretação geométrica nem sempre se mantém válida e o método pode conduzir a uma discrepância entre a sequência de estimativas e a raiz, dependendo das circunstâncias associadas ao ponto inicial e à função $F(x)$ [13].

Dessa forma, a fim de ilustrar o funcionamento do método, as equações derivadas do equacionamento apresentado na Tabela 1 serão empregadas. Sendo assim, a Equação 3 rearranja as expressões em uma função designada como $F(x)$, a qual constitui uma matriz 2×1 e é subdividida em $F_1(x)$ e $F_2(x)$.

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{qV_d}{kT_c A_n}} - 1 \right) = 0 \\ I_{mp} - I_{sc} + I_s \left(e^{\frac{qV_{mp}}{kT_c A_n}} - 1 \right) = 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim, a Equação 2 aplicada à Equação 3 resulta em:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ A_n \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} I_s \\ A_n \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial A_n} \\ \frac{\partial F_2(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_2(x)}{\partial A_n} \end{bmatrix}^{-1} F(x) \quad (4)$$

A resolução da Equação 4 pode ser simplificada utilizando-se linguagens de programação, as quais permitem a realização de cálculos iterativos até a obtenção dos valores requeridos, desde que sejam determinados valores iniciais apropriados. No presente estudo, o software MATLAB® foi empregado para encontrar os valores convergentes de I_s e A_n .

2.3. Conversores CC-CC

Conversores CC-CC, são utilizados para se obter um nível de tensão CC variável de entrada a partir de uma fonte de tensão CC constante. Quando se promove uma alteração no período em que o sinal de tensão de saída permanece ativo, conhecido como ciclo de trabalho (*duty cycle*), torna-se viável a modificação do valor médio da tensão presente no referido sinal [15]. Sendo a forma mais comum de mudar o ciclo de trabalho é por meio de um dispositivo eletrônico de chaveamento (MOSFETs, IGBTs, tiristores etc.) de alta frequência.

Na eletrônica de potência existem diversos tipos de conversores CC-CC, porém as aplicações mais comuns são utilizando conversores *buck*, *boost* e *buck-boost*, conforme citado anteriormente. O conversor *buck* ou abaixador, em síntese, é empregado em situações que demandam uma tensão de saída inferior à tensão de entrada. Entretanto, de acordo com [6], esse tipo de conversor não possui a capacidade de seguir o PMP em condições de elevada temperatura e intensidade luminosa, devido à curva de carga ingressar em uma região não operacional da curva I-V, particularmente em momentos próximos ao horário solar do meio-dia.

Já o conversor *boost*, cuja função consiste em amplificar a tensão de saída, apresenta limitações na capacidade de monitorar o PMP em condições de baixas temperaturas e intensidades luminosas, ou seja, durante as fases iniciais da manhã ou em dias de elevada nebulosidade. O conversor *buck-boost*, por sua vez, pode aumentar ou diminuir a tensão de entrada para a tensão que se deseja obter em sua saída, além de ser capaz de garantir a continuidade do rastreo do PMP independentemente das condições climáticas [6].

Neste trabalho, apenas o conversor *buck-boost* será abordado pois ele é o conversor que apresenta as características compatíveis com a região de interesse (semiárido). Sendo assim, o conversor *buck-boost* tem sua estrutura básica ilustrada na Figura 4.

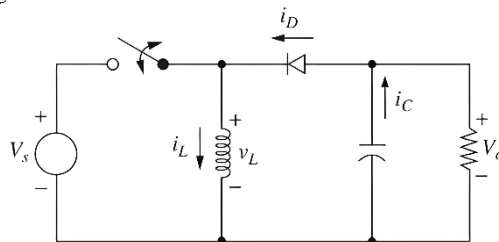


Figura 4. Circuito equivalente do conversor *buck-boost* (adaptado de [16]).

Para que o conversor funcione, [16] lista algumas suposições pertinentes ao projeto do conversor a serem feitas: o circuito está funcionando no estado estável; o indutor funciona no modo de condução contínua; o valor

do capacitor é alto o suficiente para supor que a tensão na saída é uma constante; a chave é fechada pelo tempo DT e aberta por $(1-D)T$, no qual D é o ciclo de trabalho e T o período de chaveamento; os componentes são ideais. Sendo assim, a partir de uma análise do circuito com chave aberta e fechada, a relação entre a tensão de entrada (V_{in}) e saída (V_{out}) do conversor é dada pela Equação 5.

$$V_{in} = -V_{out} \left(\frac{1-D}{D} \right) \quad (5)$$

Considerando que os dados de entrada serão os dados de saída do módulo em seus valores máximos, verifica-se que $I_{in} = I_{mp}$ e $V_{in} = V_{mp}$. Além disso, uma consideração válida a ser feita, uma vez que os componentes, nesta análise é que a potência de saída (P_0) é igual à potência de entrada (P_s), logo:

$$P_s = P_0 \Rightarrow V_{in} I_{in} = V_{mp} I_{mp} = \frac{V_{out}^2}{R} \quad (6)$$

No qual R é a resistência da carga e I_{in} é a corrente de entrada do conversor. Assim, ao combinarmos as equações 5 e 6, obtemos:

$$\frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \left(\frac{1-D}{D} \right)^2 R \quad (7)$$

A Equação 7 pode ser utilizada para calcular o ciclo de trabalho a partir dos dados de entrada (módulo) e saída (carga) esperados e vice-versa.

A Figura 4, mostra, ainda, que o conversor *buck-boost* também é composto por um indutor e um capacitor. A determinação da indutância (L_{min}) considera valores mínimos, de modo a garantir que o conversor permaneça em modo de condução contínua no qual os valores mínimos são definidos conforme estabelecido na Equação 8.

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2f} R \quad (8)$$

Onde f é a frequência de operação do conversor. A capacitância (C), por sua vez, pode ser determinada com base na tensão desejada para a oscilação de saída, conforme expresso pela Equação 9.

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_{out}/V_{out})f} \quad (9)$$

Onde o termo $\Delta V_{out}/V_{out}$ equivale à tensão de oscilação expressa em valores percentuais da amplitude da tensão V_{out} .

2.4. Algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP)

Como mencionado anteriormente, a maximização da eficiência de um sistema fotovoltaico requer a implementação de técnicas para rastrear continuamente o PMP do arranjo fotovoltaico e apresenta uma variação não linear em relação à irradiância solar e à temperatura das células fotovoltaicas [12].

A temperatura nas células fotovoltaicas varia de forma gradual e lenta, com respostas que podem chegar a dezenas de segundos. Por outro lado, a irradiância solar variar subitamente em alguns de segundos, devido a fatores como sombreamento, acúmulo de sujeira etc. que podem modificar a curva característica dos painéis fotovoltaicos, gerando falsos PMP e comprometendo a obtenção da máxima eficiência do sistema [5].

Quando associado a um conversor CC-CC, a maximização da potência gerada é viabilizada, independentemente da irradiância e a temperatura ambiente. A técnica de controle mais utilizada consiste em realizar a regulação automática do ciclo de trabalho D com o objetivo de direcionar o gerador no PMP. Na interface entre o algoritmo e o conversor, o ciclo de trabalho atua como uma variável de controle (conforme indicado na seção 2.3), afetando diretamente o estado de comutação do conversor [5, 12].

Existem inúmeras técnicas de RPMP e formas de aplicação, desde às mais simples como o método da tensão constante, Perturba e Observa (P&O), *Hill Climbing* (HC) e condutância incremental, até os algoritmos inteligentes mais avançados, como Rede Neural Artificial (RNA), *fuzzy* e Sistema de Inferência *Neuro-Fuzzy* Adaptativo (ANFIS) [6].

Neste trabalho será abordado especificamente a técnica da condutância incremental, que dentre as técnicas mais simples citadas, apresenta melhor resultado, uma vez que é caracterizado por baixas oscilações em regime permanente e alta velocidade, apesar de demandar maior esforço computacional [17].

Na técnica da condutância incremental, o controle do PMP na análise da derivada dP/dV na curva P-V se fundamenta no princípio de que o PMP é alcançado quando $dP/dV = 0$, por meio da regulação do ciclo de trabalho.

Dessa forma, quando a inclinação da derivada dP/dV é positiva, o ciclo de trabalho é ajustado para aumentar a tensão do módulo fotovoltaico, que está operando abaixo de V_{mp} . Por outro lado, quando a inclinação

da derivada dP/dV é negativa, o ciclo de trabalho é ajustado para reduzir a tensão do módulo fotovoltaico, que está operando acima do V_{mp} [17].

A Equação 10 mostra o rearranjo da derivada, que é utilizado para aplicar no algoritmo. A equação releva os termos da condutância incremental (dI/dV) e da condutância instantânea (I/V), a qual se baseia o nome da técnica.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (10)$$

A Figura 5 mostra o fluxograma da técnica da condutância incremental. Quando o sistema se encontra no PMP, então $\Delta V = 0$ e a condutância não pode ser determinada, logo a corrente do conjunto fotovoltaico é avaliada. Caso $\Delta I \neq 0$, implica que PMP foi alterado e a razão cíclica deverá sofrer um acréscimo ou decréscimo (ΔD) para que o novo PMP seja encontrado. Caso contrário $\Delta I = 0$, a razão cíclica permanece a mesma. Quando $\Delta V \neq 0$ e o valor da condutância incremental for igual do valor negativo da condutância instantânea, a razão cíclica permanece a mesma. Caso sejam diferentes, então a razão cíclica sofre uma alteração (ΔD) [18].

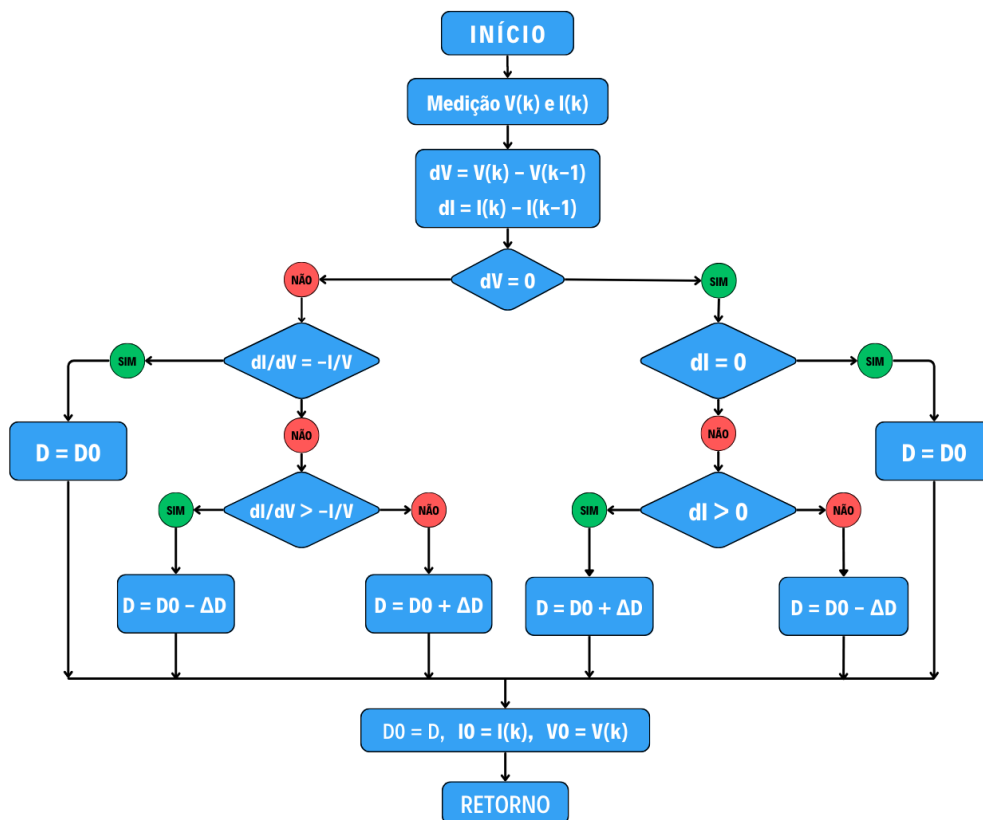


Figura 5. Fluxograma da condutância incremental (adaptado de [18]).

Com relação à velocidade de convergência, segundo [17], quanto mais distante do PMP, maior é o valor de dP/dV e do tamanho do passo, resultando em uma convergência rápida. Assim, o sinal da derivada determina a razão cíclica, e o módulo define o tamanho do passo a ser adotado.

3. METODOLOGIA

Este estudo se configura como uma pesquisa bibliográfica, com uma metodologia de natureza hipotético-dedutiva e uma abordagem predominantemente quantitativa. Sua fundamentação se baseia na análise teórica dos princípios subjacentes à geração de energia solar fotovoltaica, os quais têm como base o efeito fotovoltaico, e investiga as influências das condições climáticas sobre a produção de energia elétrica nesse contexto.

Além disso, foi conduzida uma revisão crítica da modelagem matemática de módulos fotovoltaicos, partindo de um modelo de diodo ideal. Nesse processo, foi necessário calcular o fator de idealidade e a corrente de saturação na Equação 1 por meio do método iterativo de Newton-Raphson, que se fundamenta nas equações 2 a 4.

O módulo utilizado como estudo e modelagem foi o CS6W-530MS da Canadian Solar®, que tem seus principais parâmetros apresentados na Tabela 2 e suas curvas característica I-V apresentadas na figura 2. Foi utilizado o *software* MATLAB/Simulink da MathWorks® para simular o módulo através de blocos dinâmicos,

onde inicialmente foi modelado o a fonte de corrente representada na figura 3 e posteriormente o módulo fotovoltaico.

O conversor CC-CC utilizado para realizar a interface entre o módulo e o algoritmo de RPMP foi do tipo *buck-boost* (figura 4), que teve o dimensionamento realizado com base nas equações 5 a 8. No qual foi calculado o ciclo de trabalho a partir de um valor predeterminado da carga R e o cálculo da indutância e capacitância mínima dos componentes a partir de um valor definido de frequência e operação e tensão *ripple*. Além dos componentes utilizados na figura 4, foi incluído também um capacitor de filtro nos terminais do módulo solar, com a finalidade mitigar as oscilações na tensão de saída do módulo.

TABELA 2. Parâmetros elétricos do módulo CS6W-530MS (adaptado de [11])

P_{MP}	I_{MP}	V_{MP}	I_{SC}	V_{OC}
530W	12,96A	40,9V	13,8A	48,8V

A partir do cálculo e /ou definição dos parâmetros, tornou-se viável a aplicação do algoritmo da condutância incremental, mediante a adoção de um valor específico para o ciclo de trabalho inicial (D_0) e a variação ΔD , as quais são variáveis explicitamente apresentadas no diagrama de fluxo ilustrado na figura 5.

Com a simulação concluída, foi possível analisar do comportamento da tensão, corrente e potência durante os primeiros instantes da simulação, com foco na avaliação de variáveis críticas em análises de transitórios, tais como *overshoots*, tempo de subida e acomodação e erro de estado estacionário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresentará o resultado do dimensionamento e simulação do módulo fotovoltaico aplicado ao algoritmo de RPMP da condutância incremental, conforme definido na seção 3.

4.1. Modelagem do módulo

A Tabela 3 apresenta os resultados das iterações realizadas utilizando o método de Newton-Raphson aplicado ao módulo CS6W-530MS, simulado com base na Equação 1. As iterações obtidas foram obtidas considerando uma temperatura constante de 25°C (298K), valores iniciais predefinidos para A_n e I_s (indicados na própria tabela) e os dados apresentados na Tabela 2.

TABELA 3. Valores A_n e I_s nas iterações do método Newton-Raphson (autoria própria).

Iteração	I_s	A_n
0	$7,0000 \times 10^{-7}$	110,0000
1	$4,2739 \times 10^{-7}$	109,9434
2	$4,2742 \times 10^{-7}$	109,9084
3	$4,2742 \times 10^{-7}$	109,9086

Pela tabela 3, observa-se que foram necessárias três iterações para que o método convergisse e alcançasse um único valor. O diagrama de blocos correspondente à Equação 1, contendo os valores calculados e/ou predefinidos, representado pelo no software Simulink, encontra-se ilustrado na Figura 6.

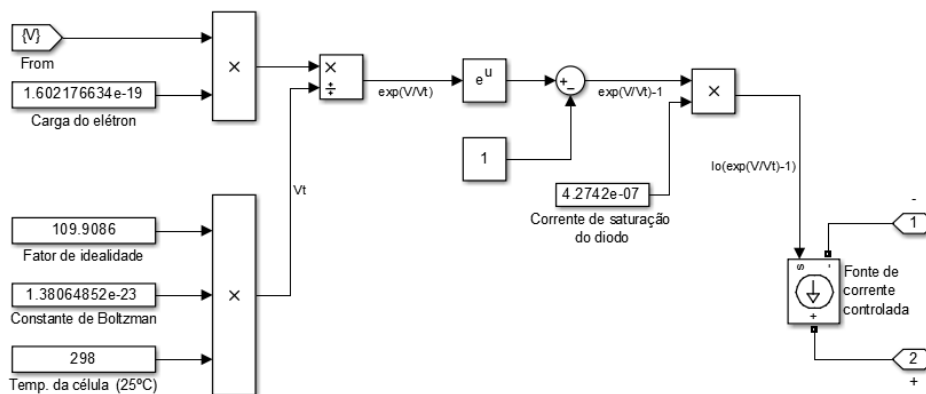


Figura 6. Diagrama de blocos para geração da corrente do diodo no Simulink (autoria própria).

A Figura 7, por sua vez, ilustra o diagrama de blocos do circuito equivalente do modelo de diodo ideal (Figura 3), adicionado de algumas modificações como a adição de um resistor de alta resistência em paralelo

ao diodo, um filtro de passa-baixa e um bloco de delay à saída do medidor de tensão na saída do circuito. Essas modificações visam reduzir as oscilações na tensão de saída e acelerar a convergência do modelo.

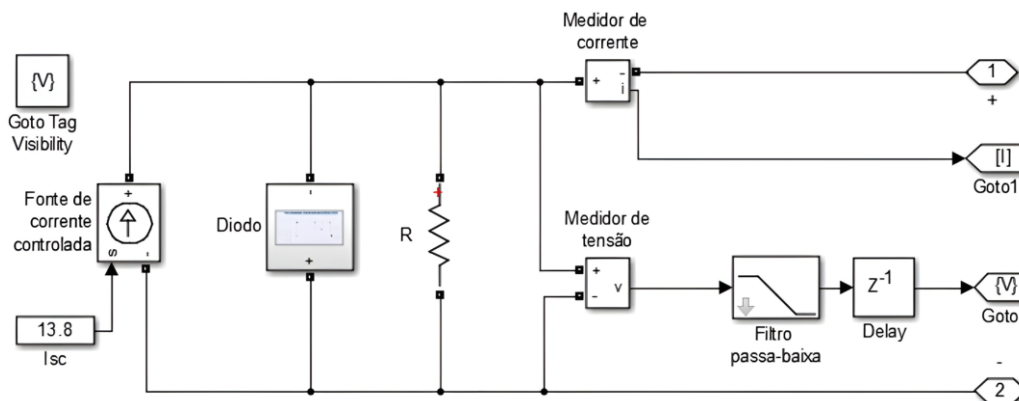


Figura 7. Diagrama de blocos do modelo de diodo ideal no Simulink (autoria própria).

4.2. Dimensionamento do conversor

Utilizando-se as Equações 7 a 9, foi possível calcular o valor do ciclo de trabalho, indutância e capacitância mínima com base nos valores apresentados na Tabela 2 e outros dados predefinidos. A Tabela 4 apresenta os dados utilizados para caracterizar os principais componentes do conversor CC-CC *buck-boost*.

TABELA 4. Parâmetros definidos e dimensionados do conversor CC-CC (autoria própria)

Parâmetro gerais definidos		Parâmetros do capacitor e indutor	
Resistência de saída	100Ω	Indutância mínima calculada	1,39mH
Frequência de operação	10kHz	Valor comercial utilizado	10mH
Filtro de entrada	2mF	Corrente inicial do indutor	6A
Tensão inicial do filtro	40,9V	Capacitância mínima calculada	17μF
Tensão percentual de <i>ripple</i> no capacitor	5%	Valor comercial utilizado	20μF
Ciclo de trabalho calculado	0,84	Tensão inicial do capacitor	230V

Os valores da capacitância e tensão inicial do filtro inicial de entrada, bem como os valores comerciais e tensão e corrente iniciais do capacitor e indutor foram determinados por tentativa e erro de forma a selecionar os valores que desempenharam o melhor resultado na simulação. Os parâmetros mencionados afetam principalmente o comportamento do transitório no gráfico da potência x tempo. A Figura 8 mostra o diagrama de blocos do conversor CC-CC simulado no Simulink.

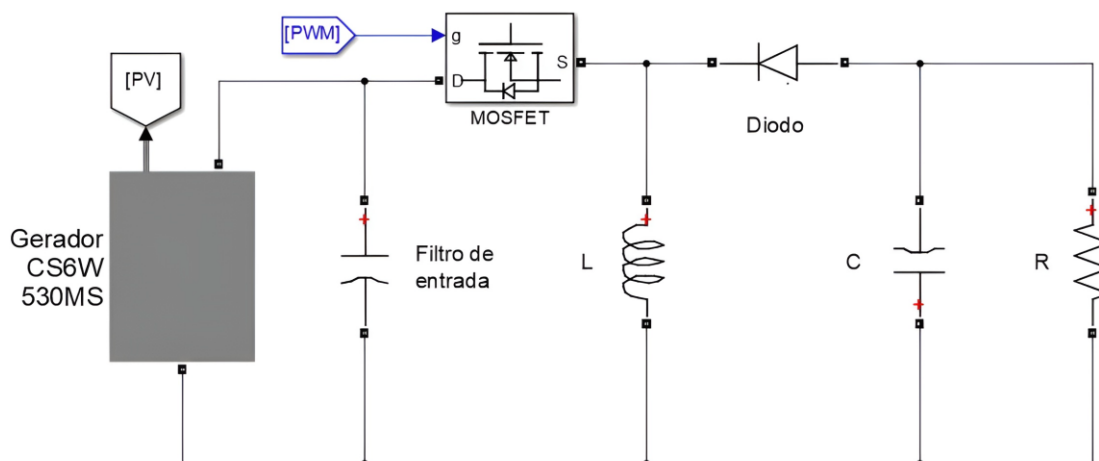


Figura 8. Diagrama de blocos do conversor CC-CC *buck-boost* no Simulink (autoria própria).

4.3. Simulação computacional do sistema

As Figuras 9, 10 e 11 mostram, respectivamente, as curvas da potência, tensão e corrente em função do tempo na saída do módulo fotovoltaico simulado no *software* Simulink. A curva de potência demonstra um período transitório oscilante, evidenciado por um pico negativo próximo a -100W, decorrente dos efeitos do indutor e do capacitor presentes no conversor CC-CC. Registrou-se, além disso, um tempo de acomodação inferior a 0,1 segundos e uma oscilação em torno do ponto de equilíbrio de cerca de 0,6W durante o regime permanente, que é um resultado relativamente satisfatório, uma vez que a potência máxima esperada é de 530W.

É relevante destacar, ademais, que o tempo de acomodação e os picos negativos de potência alcançados durante o período transitório são substancialmente impactados pelos parâmetros do capacitor e do indutor, delineados na Tabela 4. Notou-se que maiores valores de capacitância e indutância se traduzem em tempos de acomodação maiores e em picos negativos menores no período transitório e vice-versa.

Além disso, outro parâmetro importante que influencia no tempo de acomodação e subida é o ciclo de trabalho inicial D_0 e a variação ΔD a cada iteração utilizado no algoritmo da condutância incremental. No algoritmo em questão, utilizou-se um valor inicial de $D_0 = 0,84$ e $\Delta D = 1 \times 10^{-8}$, escolhidos com base na melhor performance registrada nos testes realizados neste estudo.

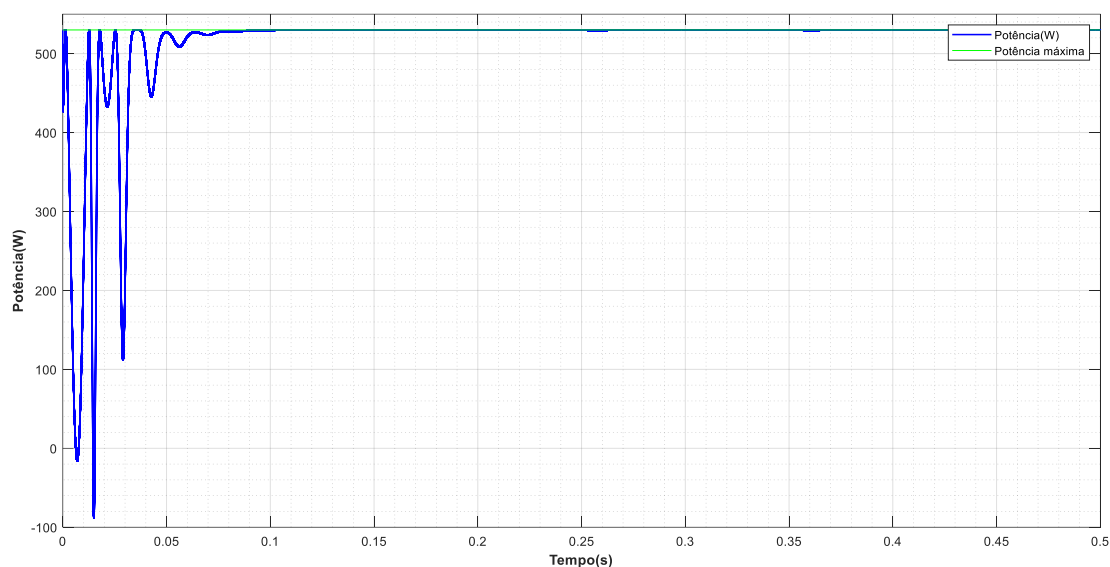


Figura 9. Curva da potência x tempo na saída do módulo (autoria própria).

Na curva da tensão da Figura 10, também foi possível constatar a presença de um período transitório oscilante, caracterizado por um pico negativo abrupto. Além disso, observaram-se *overshoots* mais acentuados, com picos próximos a 9V em relação ao ponto de equilíbrio. Foi registrado um intervalo de tempo de acomodação situado entre 0,1s e 0,15s e erros de estado estacionário que se aproximaram de 0,9V.

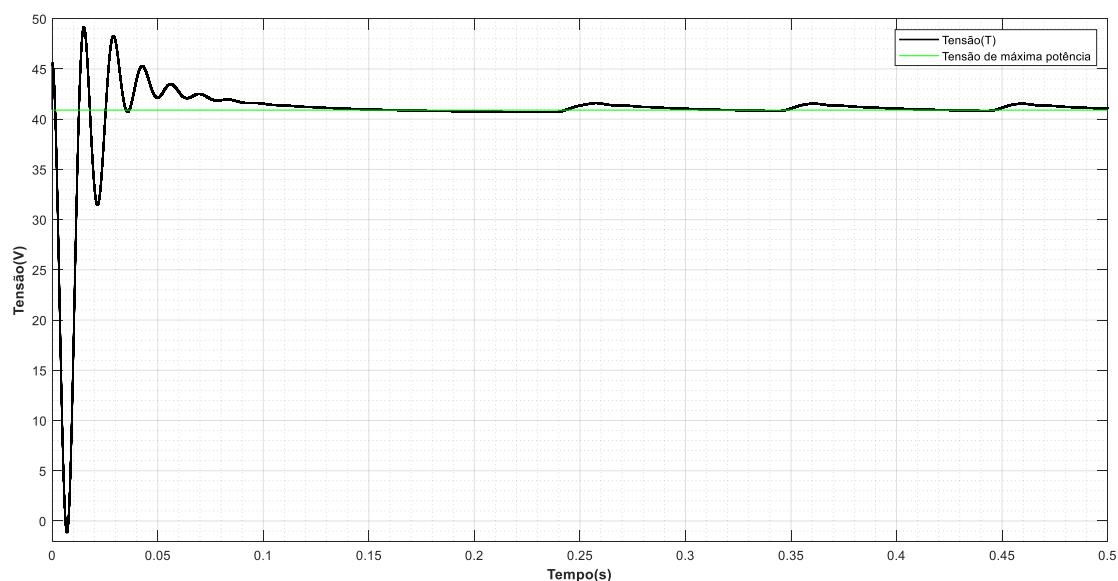


Figura 10. Curva da tensão x tempo na saída do módulo (autoria própria).

A curva da corrente apresentou um comportamento congruente com as expectativas, considerando o que foi observado nas curvas de potência e tensão. Na qual foram registrados picos abruptos negativos de corrente, *overshoots* mais discretos em torno de 1,8A, tempo de acomodação de 0,15s e erros de regime estacionário de aproximadamente 0,3A.

Os resultados obtidos das três curvas, destacam que o dimensionamento ocorreu de forma precisa e correta, uma vez que os erros de estado estacionário foram abaixo de 1%. Apesar do período transitório se apresentar de forma turbulenta para as escalas do conversor e módulo fotovoltaico, é válido afirmar que parte disso também se deve às imprecisões geradas pela própria simulação e modelagem do equipamento e em uma situação prática/real, provavelmente o comportamento transitório seria diferente.

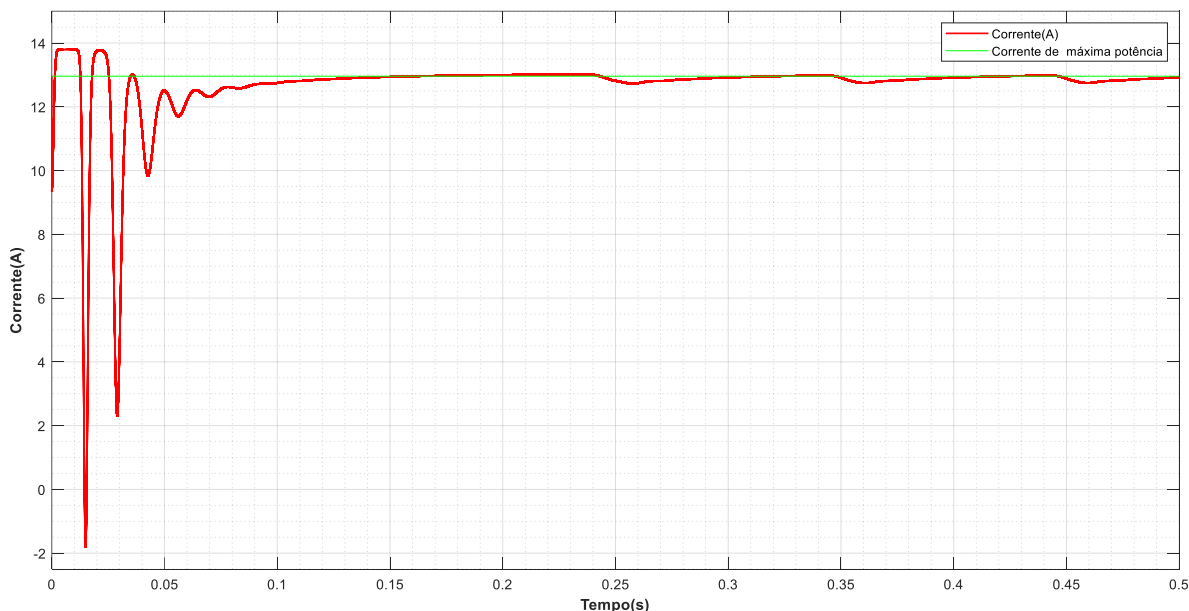


Figura 11. Curva da corrente x tempo na saída do módulo (autoria própria).

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa conseguiu, de forma satisfatória, modelar o módulo fotovoltaico CS6W-530MS da Canadian Solar®, dimensionar um conversor CC-CC do tipo *buck-boost* e simular um sistema de RPMP utilizando o algoritmo da condutância incremental, com precisões menores que 1% de erro. Da interpretação dos resultados, pode-se destacar que durante o período transitório, foram observados picos negativos nos três gráficos (potência, tensão e corrente), o tempo de acomodação nos gráficos não ultrapassou 0,15s, o que pode ser considerado resultados relativamente bons, considerando o algoritmo de RPMP utilizado no trabalho.

Além disso, os valores específicos do ciclo de trabalho inicial (D_0) e da variação (ΔD) foram fundamentais para otimizar o desempenho do sistema e amenização da oscilação do período transitório e redução do tempo de acomodação. Acredita-se que as oscilações transitórias observadas nos primeiros milissegundos da simulação são características dos métodos numéricos, potencialmente influenciadas pelas derivadas presente no método de RPMP utilizado.

Com relação ao modelo do diodo ideal, é possível perceber que, diante das diferentes variações do modelo de diodo, sua escolha afeta a complexidade da modelagem e a precisão das previsões. O método iterativo de Newton-Raphson se destacou como a principal ferramenta para obtenção dos parâmetros do modelo.

É importante reconhecer, portanto, as limitações associadas aos resultados da simulação, uma vez que esses resultados são baseados em modelos computacionais e podem não refletir com precisão o comportamento de sistemas reais. Portanto, pode ser importante abordar essas limitações em futuras pesquisas, considerando a realização de experimentos práticos para confirmar os resultados obtidos e modelos de diodo mais complexos para representar os módulos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- [1] TSURUDA, L. K et al. A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável e social. International workshop advances in cleaner production, São Paulo, p. 1-10, 26 maio 2017. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sessoes/6B/1/tsurada_et_al_report.pdf. Acesso em: 20 ago. 2023.
- [2] ROSA, Antonio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. Revista Brasileira de Energia Solar, [s. l.], ano 6, v. 7, n. 2, p. 140-147, 5 jan. 2016.

- [3] HAFEMEISTER, A., DIAS, J. B., POLTOSI, L. A. C. Aplicação do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em módulos fotovoltaicos. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.
- [4] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2023>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- [5] FARIAS, Mikelly de Lima. Simulação de conversor *buck-booster* com RPMP por HC aplicado a módulos fotovoltaicos. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, Mossoró, ano 5, v. 5, n. 1, ed. 7, p. 35-43, 21 jun. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/issue/view/313/50>. Acesso em: 21 ago. 2023.
- [6] GUERRA, Maria Izabel da Silva. Estudo de controladores inteligentes para rastreamento do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico. Orientador: Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo. 2022. 187 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- [7] CARVALHO, Edson de Paula. Uma Nova Abordagem de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos. Orientador: Pedro Paulo Leite do Prado. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado de engenharia mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012.
- [8] 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. 231 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- [9] BRAGA, Renata Pereira. Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações. Orientador: Jorge Luiz do Nascimento. 2008. 67 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia elétrica) – Escola politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [10] VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. Desenvolvimento de traçador de curva I-V portátil para caracterização de arranjos fotovoltaicos até 400V e 10A. Gramado: UFRGS, 2018. 8 p. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/353/353>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- [11] CANADIAN SOLAR. HiKu6 Mono PERC 530 W ~ 555 W, 2022. Disponível em: https://www.dicomp.com.br/downloads/materiais_apoio/datasheet/24248-1.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.
- [12] REKIOUA, Djamila; MATAGNE, Ernest. Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control. Londres: Springer, 2012. 283 p. ISBN 978-1-4471-2348-4.
- [13] BESERRA, Amanda Santiago. Simulação e análise da influência da radiação e temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos. Orientador: Herick Talles Queiroz Lemos. 2019. 12 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/3632>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [14] BORUCH, Isaias; SCALDELAI, Dirceu. Método de Newton para Resolução de Sistemas Não Lineares: uma abordagem gráfica no software GeoGebra. Colóquio Luso-Brasileiro de Educação (II COLBEDUCA). Joinville, SC. 2016. 485-497 p.
- [15] AHMED, Ashfaq. Eletrônica de potência. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2000. v. 1, ISBN 8587918036.
- [16] HAYT, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 477 p. ISBN 9788580550450.
- [17] GRUNDEMANN, Wagner Turchielo. MPPT perturba e observa aplicado ao conversor boost. Orientador: Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon. 2017. 60 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.
- [18] SILVA, Angélica da. Estudo comparativo entre técnicas de seguimento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos. Orientador: Marcelo Cabral Cavalcanti. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.