



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA OTIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA EM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Ingredy Gabriela Gomes Carmo*¹, Fernanda Prudente Morais¹, Antônio Marcos de Melo Medeiros¹, Marcos Antônio de Souza¹, Gustavo Siqueira Vinhal¹.

¹PUC-GO – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Resumo - Considerando o crescente interesse no uso de energia limpa e sustentável, contudo variáveis como temperatura, condição ambiente e irradiação, aos quais, o sistema é submetido, afetam diretamente a quantidade de energia transferida do(s) módulo(s) solar fotovoltaico(s) para o banco de baterias ou para a rede de serviços públicos. O objetivo deste trabalho foi estudar o sistema solar fotovoltaico utilizando um modelo sugerido implementado no MatLab, baseado em levantamentos bibliográficos para encontrar formas de maximizar a eficiência do sistema. Foi utilizado no modelo a técnica de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) juntamente com o algoritmo Método Perturbação e Observação para otimizar o sistema, rastreando a máxima corrente e tensão, e consequentemente o ponto máximo de potência (MPP), dada certa irradiação.

Palavras-chave - Conversor DC/DC, MPPT, P&O, Perturbação e Observação, Sistema Fotovoltaico.

CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT FOR PV MODULE POWER OPTIMIZATION

Abstract— Considering the growing interest in the use of clean and sustainable energy, however, variations such as temperature, ambient condition and irradiation, to which the system is subjected, directly affect the amount of energy transferred from the solar photovoltaic module(s) to the battery bank or to the public service network. The objective of this work was to study the photovoltaic solar system using a suggested model implemented in MatLab, based on bibliographic surveys to find ways to maximize the efficiency of the system. The MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) technique was used in the model, together with the Algorithm Disturbance and Observation Method to optimize the system, tracking the maximum current and voltage, and consequently the maximum power point (MPP), given some irradiation.

*ingredycarmo@icloud.com

Keywords— DC/DC converter, MPPT, perturbation and observation, P&O, photovoltaic system.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda no setor energético brasileiro, a uma taxa média de 1,9% a.a. entre 2016 e 2026, segundo a Empresa de Pesquisa Energética, do governo federal [1], a preocupação com a produção de energia limpa e sustentável e a conscientização quanto à limitação dos recursos naturais; novos tipos de energia renováveis têm sido buscados como alternativas à produção de energia elétrica derivada de combustíveis fósseis, que ainda é presente na maior parte do mundo e do Brasil. A Figura 1 apresenta a distribuição da matriz energética no país, na qual a matriz solar fotovoltaica ocupa um espaço pequeno se comparado com o total.

Figura 1: Matriz Energética Brasileira [2]



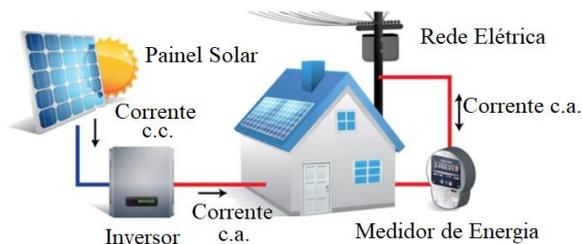
Na matriz pode-se observar que atualmente a energia solar fotovoltaica possui 1,6% da potência instalada em operação no país, portanto com grande potencial de crescimento nos próximos anos.

A energia solar fotovoltaica é uma das soluções para a substituição da energia produzida através de fontes não renováveis. Inicialmente, grande parte da instalação de painéis solares fotovoltaicos era concentrada no Norte e Nordeste devido ao Programa de Desenvolvimento

Energético de Estados e Municípios – PRODEEM. Este programa foi instituído pelo Governo Federal no ano de 1994 com o objetivo de atender às localidades isoladas não supridas de energia elétrica da rede convencional [3].

O sistema solar fotovoltaico pode ser conectado à rede (*on-grid*), isolado (*off-grid*) ou híbrido (*on-grid* e *off-grid* em um mesmo sistema). O sistema *on-grid* (Figura 2), é um sistema conectado a rede de energia elétrica, quando não há a produção necessária de energia é possível utilizar a da distribuidora, e caso haja excesso de produção, a energia excedente é injetada na rede da distribuidora local. O excedente produzido é convertido em créditos na concessionária, e podem ser compensados posteriormente, a depender do consumo de energia [4].

Figura 2: Sistema Solar Fotovoltaico *On-Grid* [5]



Uma vantagem do sistema *on-grid* é o custo mais baixo na instalação, pois não é necessário o investimento em baterias solares. Além disso, o sistema conectado à rede proporciona a possibilidade de compartilhamento da geração, que se divide em três modalidades: geração compartilhada, autoconsumo remoto e empreendimento com várias unidades consumidoras. Entre as desvantagens se encontram a obrigatoriedade da conexão à rede pública de distribuição de energia e a falta do sistema de armazenamento [5].

O sistema fotovoltaico *off-grid*, esquematizado na Figura 3, é utilizado para atender locais onde não há acesso à rede elétrica da distribuidora de energia, como em propriedades rurais e ilhas, ou a cargas específicas, com sistemas de comunicação, bombeamento de água e parquímetros. A energia é armazenada em um banco de baterias, para ser utilizada posteriormente no período noturno, quando não há produção de energia [5].

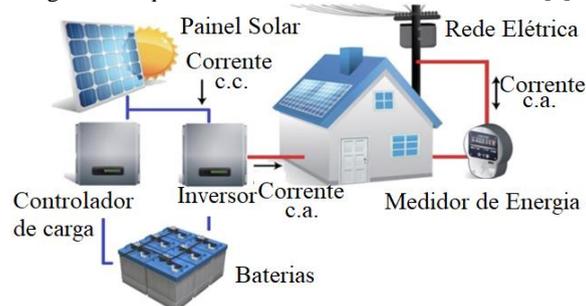
Figura 3: Esquemático Sistema Fotovoltaico *off-grid*. [5]



Na Figura 4, temos a representação do sistema fotovoltaico híbrido, onde tem-se um sistema conectado a rede que está integrado a um banco de baterias. Sendo assim, este é um sistema mais completo e de maior confiabilidade, uma vez que o consumo pode continuar,

mesmo quando há queda de energia, devido ao sistema de armazenamento. Em contra partida, é um sistema de maior custo[5].

Figura 4: Esquemático Sistema Fotovoltaico híbrido. [5]



Embora o sistema solar fotovoltaico seja uma das melhores fontes alternativas de energia, por se tratar de uma fonte de energia renovável, permanente, de alta disponibilidade, sem emissão de gases de efeito estufa e sem poluição sonora, são encontrados alguns fatores que atrapalham sua eficiência [6]. Alguns desses fatores sendo, a dependência da irradiação solar sobre as placas, a temperatura ambiente ao qual o sistema é submetido e o armazenamento da energia extraída [7]. Uma alternativa para alguns dos problemas apresentados, é a implementação de um algoritmo para melhoria no monitoramento e rastreamento do ponto de máxima potência – *Maximum Power Point* (MPP).

Tendo em vista o potencial solar no Brasil, este trabalho objetiva encontrar maneiras de corrigir possíveis falhas e/ou otimizar a produção de energia solar fotovoltaica através do desenvolvimento de um *software* para o rastreamento do ponto de máxima potência ideal de produção do módulo fotovoltaico.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme os estudos abordados pela revisão bibliográfica, foi desenvolvido uma proposta para implementação do software de rastreamento de máxima potência.

A. Módulos Fotovoltaicos

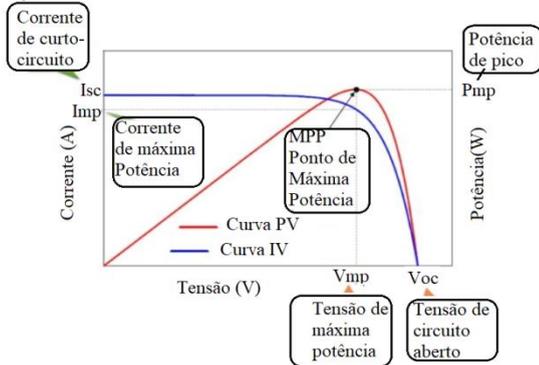
Energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão de energia solar em energia elétrica, por meio de materiais semicondutores encontrados em células fotovoltaicas, a associação dessas células, eletricamente conectadas e encapsuladas, produzindo corrente e tensão, é o que define a estrutura de um módulo fotovoltaico [8].

A utilização de células com as mesmas características elétricas na composição do módulo é aconselhável, para que não haja decaimento na eficiência global do sistema. Para traçar as características elétricas de modo mais completo, o módulo fotovoltaico é submetido a condições padrão de ensaio para se obter o gráfico da curva da corrente *versus* tensão (I-V) (Figura 5) [9].

A Figura 5 apresenta as curvas de tensão e corrente de um módulo fotovoltaico, variando os parâmetros faz com que a corrente do módulo chega no ponto de máxima potência, o qual é determinado pelo MPP - *Maximum Power Point*, localizado no pico da curva, fazendo o

produto entre I_{mp} e V_{mp} .

Figura 5: Curvas de um Módulo Fotovoltaico [9]



Para monitoramento dessas curvas deve-se fazer uso de algum método de Rastreamento de Ponto de Máxima Potência - *MaximumPowerPointTracking*(MPPT), devido ao fato de os módulos fotovoltaicos não conseguirem atingir um nível de eficiência de conversão de energia expressivo, sem que trabalhem em conjunto com dispositivos de controle.

O painel fotovoltaico utilizado neste trabalho será o modelo TSM-345DE14A(II) do fabricante Trina Solar, as características elétricas e os parâmetros estão presentes na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. Esses são valores apresentados no Datasheet do fabricante e calculados sob condições de ambiente de 1000 W/m^2 de irradiação e temperatura de 25°C [10].

Tabela 1: Características elétricas do painel fotovoltaico

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
$P_{MÁX}$	Potência Máxima	345,6	[W]
V_{MP}	Tensão em $P_{MÁX}$	38,4	[V]
I_{MP}	Corrente em $P_{MÁX}$	9	[A]
V_{OC}	Tensão de circuito Aberto	46,7	[V]
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	9,5	[A]
CV	Coefficiente de temperatura de tensão V_{oc}	-0,39	[%/°C]
CI	Coefficiente de temperatura de corrente I_{sc}	0,05	[%/°C]

Tabela 2: Parâmetros do Modelo

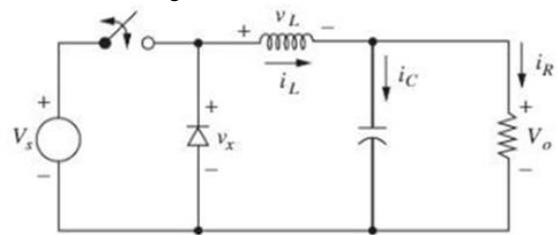
Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
I_{PV}	Corrente Gerada pela Luz	9,5648	[A]
I_0	Corrente de Saturação do Diodo	2,0447	[nA]
α	Fator de Idealidade do Diodo	-0,3474	
R_p	Resistencia Shunt Equivalente	79,1525	[V]
R_s	Resistencia Série Equivalente	0,9152	[A]

B. Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são utilizados quando há a necessidade de controlar com maior precisão as variações de corrente e tensão aplicadas, no caso deste projeto, as baterias. A especificidade no controle das variáveis está relacionada com a topologia do conversor utilizado, sendo eles: Conversor *Buck*, *Boost* ou *Buck-Boost* [11]. O conversor tipo *Buck*, Figura 5, escolhido para implementação deste projeto, é um conversor não isolado, CC-CC abaixador, ou seja a tensão de saída é sempre menor do que a de entrada, logo a corrente de entrada é maior que a corrente de saída. Esse é um conversor simples e de alta eficiência. Para um melhor entendimento desse, o circuito pode ser comparado ao de um

transformador CA [12] [13].

Figura 6: Conversor *Buck*. [15]



Ele é composto por um filtro passa baixa LC, onde o diodo concede um caminho para a corrente no indutor quando a chave é aberta, polarizando-o diretamente, e quando a chave é fechada ocorre a polarização reversa [13]. Tem-se que a variação de corrente no indutor para a chave fechada e aberta, conforme as equações 1 e 2 são:

$$(\Delta i_L)_{fechada} = \left(\frac{v_s - v_o}{L}\right) DT \quad (1)$$

$$(\Delta i_L)_{aberta} = \left(\frac{-v_o}{L}\right) (1 - DT) \quad (2)$$

Onde:

- Δi_L - Variação da corrente no indutor em ampères(A);
- V_o - Tensão na saída em volts (V);
- V_s - Tensão na entrada em volts (V);
- D - Ciclo de trabalho;
- T - Período de Chaveamento (rad/s);
- L - Indutância (H).

Para o funcionamento no estado estável exige-se que a corrente no início do ciclo do chaveamento no indutor seja igual a do final. Para isso exige-se que [13]:

$$(\Delta i_L)_{fechada} + (\Delta i_L)_{aberta} = 0 \quad (3)$$

Logo:

$$V_o = D.V_s \quad (4)$$

Onde a tensão de saída V_s depende somente do ciclo de trabalho D . Caso a tensão de entrada flutue, a tensão de saída poderá ser controlada apenas pelo ajuste do ciclo de trabalho. A tensão de saída será amostrada com o auxílio da malha de realimentação, essa tensão será comparada com uma referência, tornando possível o ajuste do ciclo de trabalho do chaveamento. A técnica utilizada para o chaveamento é a Modulação por Largura de Pulso (PWM), em que o ciclo de trabalho será gerado através da comparação de um sinal CC de referência com um sinal triangular da portadora. Os dispositivos de chaveamento podem ser representados por transistores: BJT, MOSFET ou IGBT de potência [11] [12] [13] [14].

Considerando que a dinâmica de funcionamento do módulo fotovoltaico é consideravelmente menor que a do conversor PWM, para efeitos de cálculo, pode-se considerar o circuito em modo de condução contínua de corrente, ou seja, o conversor operando em regime

permanente. Logo, utilizando-se a modelagem proposta por Vorpérian, a representação de um circuito não-linear através de uma função de transferência linear é possível. A partir dessa função, pode-se projetar as malhas de controle necessárias para a regulação automática do conversor. Assim então, diminuindo os possíveis erros de conversão por perdas no decorrer do circuito [15] [16]

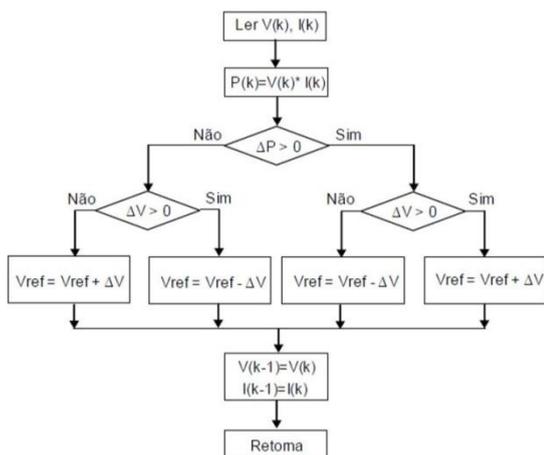
C. Algoritmo de Rastreamento

O estudo de rastreamento do ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico resultou em diferentes métodos aplicáveis, em vários níveis de complexibilidade e velocidade de convergência, sendo alguns deles o método da tensão constante, perturbação e observação, condutância incremental, lógica *fuzzy*, redes neurais, entre outros. Os algoritmos visam encontrar a tensão ou corrente ideal de funcionamento que o módulo fotovoltaico deve manter para alcançar a máxima potência de saída, dadas as condições de temperatura e irradiação solar as quais os módulos estão submetidos [17].

O algoritmo, após mapear o comportamento da curva de corrente *versus* tensão (I-V) e encontrar o ponto de tensão para a maior potência, deve tratar essa informação de modo a compensar as variações na curva, atuando como a parte de controle do sistema e agindo sobre o ciclo de trabalho, período de chaveamento, do conversor [18].

Foi realizado o estudo e aplicação do método Perturbação e Observação (P&O), que, devido à baixa complexibilidade de aplicação é um dos métodos mais utilizados no mercado. Na Figura 7, pode ser observado o esquemático lógico do algoritmo.

Figura 7: Diagrama do Algoritmo de P&O [18]



Seu princípio de funcionamento consiste em gerar uma pequena perturbação na tensão de operação do painel solar fotovoltaico em uma determinada direção, aumentando ou diminuindo seu valor, ocasionando uma mudança na potência. Se a variação for positiva, isso significa que a alteração no ponto de operação ocorreu no mesmo sentido do ponto de potência máxima (MPP) e a variação imposta deve ter o mesmo sentido. Se for negativa, a variação deve ter sentido inverso [21].

III. RESULTADO

A. Simulação das curvas de potência e corrente relativas à tensão

Considerando a modelagem matemática do arranjo de células fotovoltaicas apresentada nas seções anteriores, e então, a partir das equações apresentadas e sob condições de irradiação variadas e temperatura ambiente de 25°C, a simulação das curvas I-V e V-P do módulo fotovoltaico TSM-345DEG14(II) da fabricante TRINA® foi realizada pelo software Matlab/Simulink®. Os resultados obtidos, a partir dos dados do datasheet [10] e o equacionamento, podem ser encontrados nas Figuras 8, 9.

Figura 8: Curva P-V módulo fotovoltaico TSM 345DEG14(II).

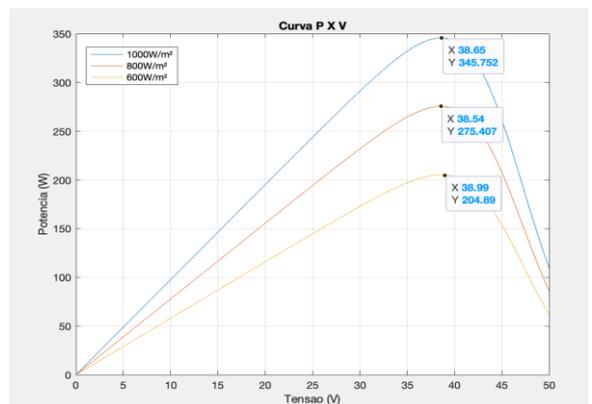
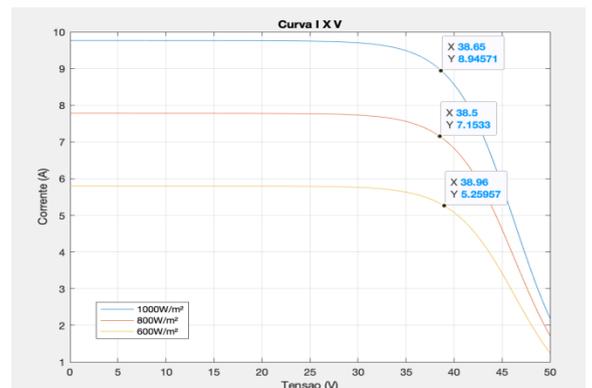


Figura 9: Curva I-V módulo fotovoltaico TSM- 45DEG14(II).

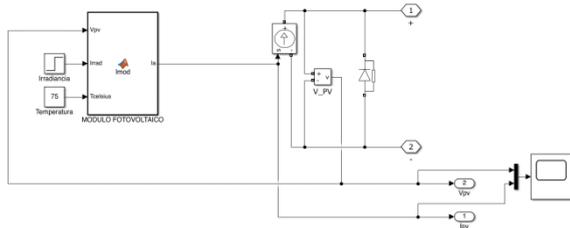


B. Modelagem Matemática e Computacional

Considerando que, tanto o sistema fotovoltaico, quanto os conversores por chaveamento possuem comportamento não-linear e variante no tempo, a modelagem de um sistema linearizado faz-se necessária para a definição da função de transferência do sistema e o projeto do controlador. A aproximação linear (Figura 11) das características elétricas de ambos os circuitos pode ser feita considerando o desempenho em torno de um ponto específico de operação, no caso deste trabalho o ponto máximo de potência (MPP), durante um intervalo de tempo [19]. Este presente trabalho mostra o controle direto do ciclo de trabalho do conversor para aplicação do algoritmo de rastreamento de máximo valor de potência de um sistema composto por um módulo fotovoltaico e um

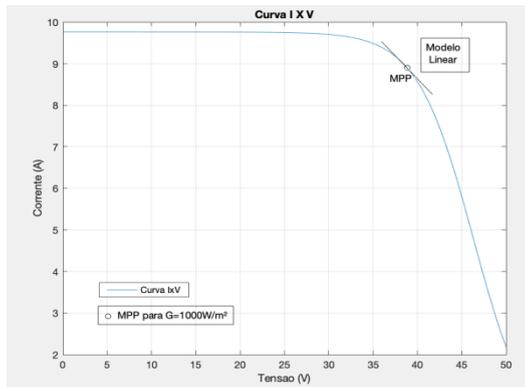
conversor Buck. Considerando as equações vistas anteriormente e os valores de parâmetro apresentados pelo fabricante no datasheet, um modelo de painel fotovoltaico foi projetado (Figura 10) na plataforma Matlab/Simulink® para fins de implementação do algoritmo no projeto proposto, a partir dos valores dispostos nas Tabelas 1, 2.

Figura 10: Subsistema Módulo Fotovoltaico.



A fim de primeiramente simular o conversor a ser utilizado, foi estudada a linearização do módulo fotovoltaico, proposta por [14]. Essa pode ser vista a partir do estudo da linha tangente ao MPP da curva I-V (Figura 11), ou seja, a partir do estudo de di/dv , portanto, temos:

Figura 11: Linearização do módulo FV em torno do MPP.



Segundo, o circuito equivalente do módulo fotovoltaico (Figura 12) pode ser expresso a partir da derivada no MPP, que pode ser expressa por:

$$g(V, I) = -\frac{I_0}{V_t N_s a} \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t N_s}\right) - \frac{1}{R_p} \quad (8)$$

$$i_{pv} = (-gV + I) + gv_{pv} \quad (9)$$

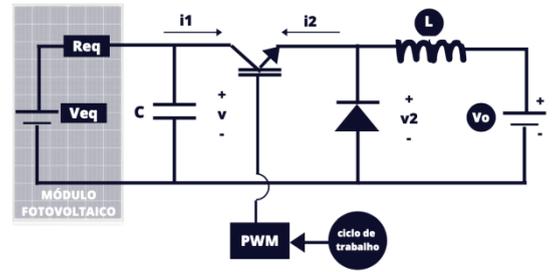
Então, temos que:

$$V_{eq} = V - \frac{1}{g} \quad (10)$$

$$R_{eq} = -\frac{1}{g} \quad (11)$$

Logo, para os valores do módulo utilizado neste trabalho, temos que: $V_{eq}=75,56[V]$ e $R_{eq}= 4,11[\Omega]$. Uma explicação mais detalhada sobre a obtenção da função de transferência a partir do modelo de pequenos sinais pode ser encontrada em [14], [19], [20] e [21]. O circuito equivalente do circuito linear do módulo conectado ao conversor Buck foi apresentado por [14] e é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Módulo PV conectado ao conversor Buck. Adaptado de [14]



Sendo assim, o modelo proposto por [14] foi implementado no software Matlab (Figura 13) conforme os parâmetros apresentados nas seções anteriores. O modelo foi projetado para que possa ser conectado a uma bateria estacionária de 12V. O controlador PI foi implementado no sistema a partir de tentativa e erro. Os parâmetros utilizados se encontram na Tabela 3.

Figura 13: Equivalente fotovoltaico e Conversor Buck.

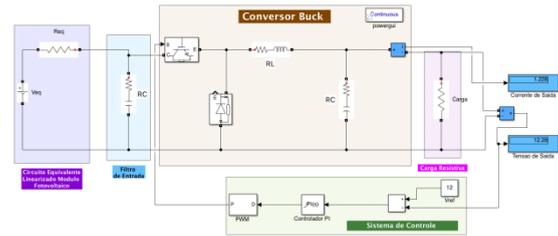


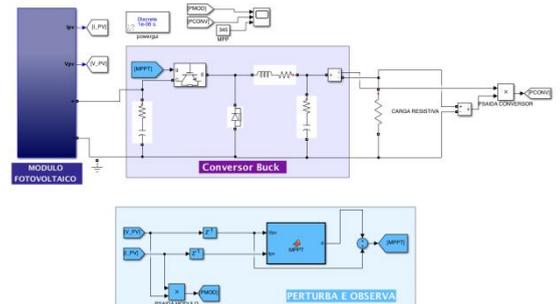
Tabela 3: Parâmetros do Conversor.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
L	Indutor	2	[mH]
C	Capacitor de Saída	500	[uF]
Vo	Tensão de Saída	12	[V]
D	Ciclo de Trabalho	0,33	

C. Implementação do Algoritmo Perturba e Observa

Aqui se encontra a simulação final (Figura 13), composta pelo subsistema do módulo fotovoltaico, o conversor Buck, conforme parâmetros da Tabela 3, conectado a uma carga resistiva.

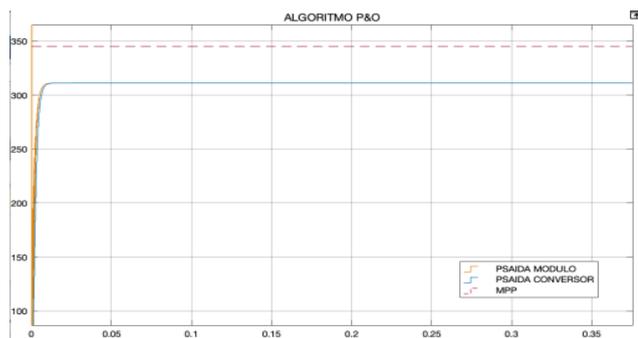
Figura 13: Simulação do Estudo de Caso Proposto.



O Algoritmo MPPT atua diretamente no ciclo de trabalho do conversor, fazendo com que obtenha-se a melhor potência, de acordo com os valores lidos de tensão e corrente no

módulo. Na Figura 14, podemos ver a potência na saída do módulo e do conversor em relação a potência máxima que o módulo pode alcançar.

Figura 14: Potência obtida com o Algoritmo P&O.



IV. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A importância do controle de variáveis no sistema fotovoltaico é de suma importância para melhor desempenho do sistema, tendo em vista que, a eficiência dos módulos é baixa, em torno de 18%. Após a implementação do método de rastreamento de máxima potência perturba e observa, pode-se observar que o erro em estado estacionário deste é alto, esse resultado era esperado, pois o algoritmo foi implementado como controle direto do ciclo de trabalho do conversor. O erro pode ser corrigido, projetando um controlador PI para compensar a flutuação do algoritmo em torno do ponto máximo de potência e fazendo com que o conversor trabalhe na região de operação com frequência de ressonância.

Sugestões para trabalhos futuros: Projeto do controlador PI para implementação no algoritmo de MPPT; Implementação em bancada do sistema proposto; Projeto da malha de controle do conversor Buck; Estudo de outros algoritmos de rastreamento de máxima potência; Implementação de algoritmos MPPT nos conversores Boost e Buck-Boost.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EPE, Matriz Energética e Elétrica, 2019. Acedido em 11 de março de 2020, em: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.
- [2] ABSOLAR. Infográfico Absolar São Paulo, 2020. Acedido em 15 de maio de 2020, em: <https://absolar.org.br/infografico-absolar.html>
- [3] Agência Câmara de Notícias, 2004. Acedido em 11 de março de 2020, em: <https://www.camara.leg.br/noticias/57317-o-que-e-prodeem/>
- [4] Resolução Normativa 687, Brasília, 2015. Acedido em 25 de abril de 2020, em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>
- [5] Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes. São Paulo, 2019. Acedido em Acesso em 20 de abril de 2020, em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>.
- [6] JÚNIOR, Aguinaldo. Recife, 2018. Contribuição à Modelagem de Módulos Fotovoltaicos e Proposta de uma Técnica Híbrida de Seguimento do Ponto de Máxima Potência com Estimador de Irradiância.
- [7] SILVA, Tiago de Lima e. Protótipo para um Sistema de Captação de Energia Solar Fotovoltaica com Controle PID e MPPT, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2018.
- [8] NASCIMENTO, Cássio. Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica. UFLA. Lavras. 2004.
- [9] PINHO, João. GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro. 2014.
- [10] TRINA SOLAR. Datasheet TSM-DE14H(II). 2018. Acedido em 14 de outubro de 2020, em : https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet_TSM-DE14H%28II%29_HC_1500V_May2019_NT.pdf
- [11] HART, Daniel W. Eletrônica de Potência. Porto Alegre. Editora McGraw Hill, Ed.1. 2011.
- [12] ERICKSON, Robert. MAKSIMOVIĆ, Dragan. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. 2000.
- [13] MUHAMMAD. H. Rashid. Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo. 1999.
- [14] VILLALVA, Marcelo. Analysis and Simulation of the P&O MPPT Algorithm Using a Linearized PV Array Model. Universidade de Campinas. Campinas. 2009.
- [15] Vorpérian, Vatché. Simplified Analysis of PWM Converters using Model of PWM Switch – Part I: Continuous Current Mode. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. 26, no. 3, May 1990.
- [16] AZIZ, M. M. Simplified Approaches for Controlling DC-DC Power Converter. International Journal of Engineering Science and Technology. Cairo. 2012.
- [17] SEGUEL, J. I. Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.
- [18] MOÇAMBIQUE, Nilton. Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.
- [19] XIAO, W. et al. Regulation of Photovoltaic Voltage. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, v.54, June. 2007.
- [20] RUPPERT, Ernesto. VILLALVA, Marcelo. GAZOLI, Jonas. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Array. Universidade de Campinas. Campinas. 2009.
- [21] RUPPERT, Ernesto. VILLALVA, Marcelo. SIQUEIRA, Thais. Voltage Regulation of Photovoltaic Arrays: Small-Signal Analysis and Control Design. IET Power Electronics. 2010.