# PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS Escola de Engenharia / Engenharia Elétrica Trabalho Final de Curso II

Fernanda Prudente Moraes Ingredy Gabriela Gomes Carmo

# Simulação de Algoritmo de Rastreamento de Potência com Uso do Conversor Buck

Trabalho Final de Curso como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

# **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Antônio Marcos de Melo Medeiros – Orientador. PUC Goiás. Prof. Me. Gustavo Siqueira Vinhal – Membro avaliador. PUC Goiás. Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – PUC Goiás.-Membro avaliador- PUC Goiás

Goiânia, 02 de dezembro de 2020.

# Simulação de Algoritmo de Rastreamento de Potência com Uso do Conversor Buck

CARMO, I. G. G.<sup>1</sup>; MORAES, F. P.<sup>1</sup>; MEDEIROS, A. M. M.<sup>1</sup>; VINHAL, G. S.<sup>1</sup> <sup>1</sup>Escola de Engenahria, PUC-Goiás

ABSTRACT - Considering the increasing interest in the use of clean and sustainable energy, the aim of this undergraduate final paper is to study the photovoltaic solar system. The model suggested is based on studies that concern the photovoltaic energy system efficiency. The temperature, ambient condition, and irradiation that the system is submitted to directly affect the amount of power transferred from the photovoltaic solar module(s) to the battery bank or utility grid. Taking these characteristics into account, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) is a way of optimizing the system by tracking the maximum current and voltage, and consequently the maximum power point (MPP), given certain irradiation. The studied algorithm is based on the Perturbation and Observation Method, which is going to be implemented on a system composed by a DC/DC converter and a PV cell array. This method is implemented accordingly to the solar panel characteristics of the current (I) and voltage(V) curve.

*Keywords*— DC/DC Converter, Perturbation and Observation, MPPT, Photovoltaic System.

**RESUMO** - Considerando o crescente interesse no uso de energia limpa e sustentável, este trabalho final de curso visa estudar o sistema solar fotovoltaico. O modelo de estudo sugerido é baseado em estudos que envolvem a eficiência desses sistemas. A temperatura, irradiância e as condições ambiente às quais o sistema está submetido afetam diretamente a quantidade de potência transferida do(s) módulo(s) fotovoltaico(s) para o banco de baterias ou rede de distribuição. Levando em conta essas características, o rastreamento de máxima potência (MPPT) é uma maneira de otimizar o sistema mapeando a máxima corrente e máxima tensão, e consequentemente a máxima potência (MPP), dada uma irradiação. O algoritmo estudado é baseado no método de Perturbação e Observação, e será implementado em um sistema composto por um conversor CC/CC e um arranjo de células fotovoltaicas. Esse método é implementado conforme as características da curva de tensão e corrente.

*Palavras-chave* — Conversor CC/CC, Perturbação e Observação, MPPT, Sistema Fotovoltaico.

# 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. 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 a dependência da produção energética do país nos recursos hídricos, a diversificação desse gráfico é de suma importância para que se evite futuras crises no setor elétrico. Atualmente, a energia solar fotovoltaica, uma das soluções para a substituição da energia produzida através de fontes não renováveis, possui 1,6% da potência instalada em operação no país, portanto possui grande potencial de crescimento nos próximos anos.

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). Neste trabalho será abordado o sistema fotovoltaico *off-grid*, esquematizado na Figura 2, este 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, como sistemas de comunicação, bombeamento de água e parquímetros [3]. A energia solar convertida pelos módulos é armazenada em um banco de baterias, para ser utilizada posteriormente no período noturno, quando não há produção de energia [4].



Figura 2 - Esquemático Sistema Fotovoltaico off-grid. [5]

Mesmo sendo um sistema com custo superior ao sistema *on-grid*, o sistema *off-grid* é independente da rede de distribuição de energia elétrica, ou seja, não está conectado à ela, portanto não está submetido às oscilações que a mesma possa ter, como queda de energia.

Os componentes básicos desse sistema são [5]:

- painéis solares: fazem a captação e transformação da energia solar em elétrica;
- controlador de carga: evita sobrecargas ou descargas exageradas nas baterias;
- baterias: fazem o armazenamento de energia elétrica, para que o sistema possa ser utilizado na ausência da incidência de raios solares;
- inversor DC/AC: transforma a corrente contínua proveniente da produção de energia pelos painéis, em corrente alternada (110V ou 220V).

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

elétrica da distribuidora de energia, como em propriedades rastreamento do ponto de máxima potência – *Maximum* rurais e ilhas, ou a cargas específicas, como sistemas de *PowerPoint* (MPP).

O presente trabalho tem como objetivo a análise e simulação de um sistema solar fotovoltaico não conectado à rede, composto por um módulo fotovoltaico e um conversor CC-CC abaixador de tensão (Buck). Com o desenvolvimento deste trabalho propõem-se o controle da tensão de saída fornecida pelo conversor CC-CC ao arranjo fotovoltaico, para que este opere no melhor ponto de potência possível.

**Objetivos Específicos:** 

- Modelagem matemática e simulação do arranjo de células fotovoltaicas;
- Modelagem matemática e simulação do conversor Buck para uso com bateria estacionária;
- Simulação do sistema com implementação do algoritmo de rastreamento Perturba e Observa (P&O);

# 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme os estudos abordados pela revisão bibliográfica, apresentada na primeira parte deste trabalho, a topologia proposta para implementação em software é mostrada na Figura 3:



# 2.1. Módulos fotovoltaicos

Descoberto por Edmond Becquerel e posteriormente explicado por Albert Einstein, o efeito fotovoltaico consiste na conversão de luz visível em energia elétrica. Este fenômeno se dá quando a junção dos materiais tipo P-N, criam um campo elétrico, gerado a partir da incidência de luz solar sobre a célula fotovoltaica, então, o silício se torna um condutor, devido a absorção dos fótons pelos elétrons, e ganham energia cinética e são acelerados pelo campo elétrico formado na junção P-N, com isso, os elétrons são orientados a irem da camada "P" para camada "N". Através de condutores elétricos as duas camadas são ligadas, e assim é gerada uma corrente elétrica,à medida que a intensidade da luz solar aumenta sobre a célula essa corrente também aumenta, se mantendo enquanto houver incidência de sol [8].

Atualmente, pode-se classificar as células fotovoltaicas em três grupos: as células de silício (monocristalino e policristalino) que monopolizam o mercado de placas de solares, as células filmes finos, raramente comercializadas, e as células que se encontram ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento [8].Com o objetivo de simular um modelo tradicional de módulo fotovoltaico, foi utilizado o software Matlab/Simulink com base na Figura 4, onde tem-se o circuito equivalente, composto por uma fonte de corrente, um diodo, uma resistência em paralelo e uma resistência em série. O resultado da simulação é apresentado na Figura 10 do item 4.2.



Figura 4 - Circuito equivalente básico de uma célula fotovoltaica [8]

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser obtida a partir da Equação 1, derivada da equação de Shockley (diodo ideal), onde,  $I_{ph}=0$ , uma vez que, quando não há luz a célula fotovoltaica tem o mesmo comportamento de um diodo; e da equação da corrente de saturação reversa do diodo(Equação 2), que é calculada com base nas propriedades do material e nos detalhes da construção da junção P-N.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] (1)$$

I<sub>ph</sub>- corrente fotogerada (A);

- I<sub>0</sub>- corrente de saturação reversa do diodo (A);
- n- fator de idealidade do diodo;
- q- carga do elétron;

k- constante de Boltzmann;

T- temperatura absoluta (K);

$$I_{0} = q \cdot A \cdot n_{i}^{2} \cdot \left(\frac{D_{p}}{L_{P} \cdot N_{d}} + \frac{D_{n}}{L_{n} \cdot N_{a}}\right) (2)$$

I<sub>0</sub>- corrente de saturação reversa do diodo (A);

A- área da seção reta da junção (área da célula);  $n_i$ - concentração de portadores intrínsecos no material;  $N_d$ ,  $N_a$ - concentração dos dopantes tipo n e tipo p;  $D_p$ ,  $D_n$ - coeficiente de difusão de lacunas e elétrons no material;

 $L_p$ ,  $L_n$ - comprimento de difusão de lacunas e de elétrons;

q- carga do elétron.

Considerando, portanto, o circuito equivalente da célula fotovoltaica e que a corrente elétrica na mesma é a soma da corrente de uma junção P-N no escuro (diodo semicondutor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar. Tem-se que a corrente de saída do painel é [9]:

$$I = I_{ph} - I_o \left[ exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{\alpha kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{-V+IR_s}{R_P}\right) (3)$$

Onde:

- I- Corrente de saída do painel fotovoltaico;
- I<sub>ph</sub>- Foto corrente;
- Io- Corrente de saturação reversa do diodo;
- $\alpha$  Fator de identidade do diodo
- V- Tensão de saída da célula;
- q- Carga do elétron;
- k- Constante de Boltzmann;
- R<sub>s</sub>- Resistência em série;
- R<sub>P</sub>- Resistência em paralelo.

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<sup>-2</sup>de irradiação e temperatura de 25°C [10].

Tabela 1 - Características	s elétricas o	do painel	fotovoltaico
----------------------------	---------------	-----------	--------------

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
P <sub>MÁX</sub>	Potência Máxima	345,6	[W]
V <sub>MP</sub>	Tensão em P <sub>MAX</sub>	38,4	[V]
I <sub>MP</sub>	Corrente em P <sub>MAX</sub>	9	[A]
Voc	Tensão de circuito Aberto	46,7	[V]
I <sub>SC</sub>	Corrente de curto-circuito	9,5	[A]
CV	Coeficiente de temperatura de tensão Voc	-0,39	[%/°C]
CI	Coeficiente de temperatura de corrente Isc	0,05	[%/°C]

Tabela 2 - Farametros do Modelo.			
Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{PV}$	Corrente Gerada pela Luz	9,5648	[A]
Io	Corrente de Saturação do Diodo	2,0447	[nA]
α	Fator de Idealidade do Diodo	1,3	-
R <sub>P</sub>	Resistencia Shunt Equivalente	79,1525	[V]
Rs	Resistencia Série Equivalente	0,9152	[A]

As variações das condições ambiente - irradiação e temperatura - as quais os módulos são submetidos influenciam diretamente na produção de energia, tão como na performance dos algoritmos implementados. Assim sendo, faz se necessário o uso de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) do módulo, a fim de ajustar o ciclo de trabalho do conversor.

## 2.2. Conversor CC-CC Buck

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 5 - 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. Tem-se as variações de corrente no indutor para a chave fechada e aberta representadas pelas equações 4 e 5 [13]:

$$(\Delta i_L)_{fechada} = (\frac{Vs - Vo}{L})DT$$
 (4)

$$(\Delta i_{\rm L})_{\rm aberta} = (\frac{-Vo}{L})(1-D)T$$
 (5)

Onde,

 $\Delta i_{L}$ - Variação da corrente no indutor em ampères [A];

Vo- Tensão na saída em volts [V];

Vs- Tensão naentrada 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 temos que [13]:

$$(\Delta i_{\rm L})_{\rm fechada} + (\Delta i_{\rm L})_{\rm aberta} = 0 \tag{6}$$

Logo, o ganho estático do conversor, em modo de condução contínua pode ser expresso por:

$$D = \frac{Vo}{Vs}$$
(7)

Onde, a tensão de saída depende somente do ciclo de trabalho. 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 PWM - Modulação por Largura de Pulso, 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].

Para o controle do ciclo de trabalho do conversor, visa-se obter uma tensão de saída constante, independentemente das perturbações na tensão de entrada e na corrente de carga, e das variações nos valores dos componentes do circuito. Logo, não há como simplesmente assumir um valor fixo para o ciclo de trabalho para obter-se um valor exato da tensão de saída sob variadas condições de aplicação. Considerando que a aplicação deste circuito eletrônico dá-se em um sistema fotovoltaico, alterações nos valores de tensão e corrente são esperadas, haja vista que as condições de temperatura e irradiação às quais o sistema está submetido sofrem mudancas constantes. Com isso, faz-se necessário o uso de um sistema de controle com realimentação negativa e

compensadores que ajustem automaticamente o valor do ciclo de trabalho conforme necessário, assim como demonstrado na Figura 6 [12][13].



Figura 6 - Esquemático do Conversor com Malha de Controle. Fonte: Adaptado de [14].

Haja vista que a dinâmica de funcionamento do módulo fotovoltaico é consideravelmente menor que a o 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].

#### 2.3. Rastreamento do ponto de Máxima Potência

Estudos sobre o rastreamento do ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico resultaram em diferentes métodos aplicáveis, em vários níveis de complexibilidade e velocidade de convergência, sendo alguns deles: 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 às 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]. Neste artigo, será 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]

O fluxograma (Figura 7), tem como variáveis de entrada os valores de tensão (V[k]) e corrente (I[k]), vindas dos módulos fotovoltaicos, os valores dessas variáveis são usados para obter o valor de potência (P[k]) atual do sistema. 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 esse 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.

Percebe-se que a partir desse método o ponto exato de máxima potência não é atingido, o que ocorre é a oscilação em torno desse, fazendo com que o sistema seja menos eficiente. A redução do passo de variação da tensão para solucionar esse problema, aumenta o período de convergência do algoritmo, fazendo que o erro aumente quando houverem mudanças bruscas de temperatura e irradiância. No algoritmo tradicional do Perturba e Observa apresentado na Figura 7, ocorre o controle direto do ciclo de trabalho do conversor, o que pode acarretar em erro no estado estacionário, o resultado dessa simulação é apresentado no seção 3.3 deste trabalho.

#### 3. RESULTADOS

# 3.1. 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

pelo software Matlab/Simulink®. Os resultados obtidos, a partir dos dados do datasheet [10] e os equacionamentos, podem ser encontrados nas Figuras 8, 9. O código para a obtenção das curvas pode ser encontrado no Apêndice C.



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



Figura 9 - Curva I-V módulo fotovoltaico TSM-345DEG14(II).

## 3.2. 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 10) 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]. Nesta seçãodo trabalho são exibidas as modelagens dos sistemas - módulo

TSM-345DEG14(II) da fabricante TRINA® foi realizada fotovoltaico e conversor buck - para a simulaçãodo algoritmo de rastreamento como controle direto do ciclo de trabalho do conversor.

> 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 e 3. O código desenvolvido para simulação encontra-se no Apêndice D.

Tabela 3 - Constantes e valores de referência			
Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
T <sub>ref</sub>	Temperatura ambiente de referência	25	[°C]
k	Constante de Boltzmann	1,3807x10 <sup>-23</sup>	[J/K]
q	Carga elementar do elétron	1,602x10 <sup>-19</sup>	[C]
E <sub>G</sub>	Energia de Gap	1,15	[eV]
G	Irradiância	1000	$[W/m^2]$



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  $\frac{di}{dv}$ , portanto, temos:



Figura 11 - Linearização do módulo TSM-345DE14A(II) em torno do MPP.

fotovoltaico (Figura 12) pode ser expresso a partir da conectado a uma bateria estacionária de 12V. derivada no MPP, que pode ser expressa por:

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

$$i_{pv} = (-gV + I) + gv_{pv}$$
<sup>(9)</sup>

O circuito pode ser visto como um equivalente de Thévenin (Figura 12) a partir do modelo de célula fotovoltaica mostrado na Figura 4.



Figura 12 - Circuito Linear Equivalente.

Então, temos que:

$$V_{eq} = V - \frac{I}{g}$$
(10)  
$$R_{eq} = -\frac{1}{g}$$
(11)

Logo, para os valores do módulo utilizado neste Veq = 75,56 [V]etrabalho. temos que: Req =4,11 [ $\Omega$ ].Uma explanação 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 linear do módulo conectado ao conversor Buck foi apresentado por [14] e é mostrado na Figura 13.



Figura 13 - Módulo PV conectado ao conversor Buck. Adaptado de [14]

Sendo assim, o modelo proposto por [14] foi implementado no software Matlab, conforme os parâmetros apresentados nas seções anteriores e pode ser encontrado no

Segundo [14], o circuito equivalente do modulo Apêndice A. O modelo foi projetado para que possa ser

O controlador PI foi implementado no sistema por tentativa e erro. Primeiramente, o foi atribuído o valor zero ao ganho do atuador integrativo. Então, incrementou-seo ganho do atuador proporcional até a oscilação do valor da tensão de saída do conversor. Posteriormente, o ganho do controlador integrador foi incrementado para atenuar as oscilações em estado estacionário do sistema. Sendo assim, obtivemos uma resposta rápida e sem grandes oscilações na ultrapassagem percentual. Ambos os valores foram obtidos limites de estabilidade respeitando os do sistema, melhorando a resposta transitória e o erro de regime permanente. Os parâmetros utilizados no conversor se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do Conversor.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
L	Indutor	2	[mH]
С	Capacitor de Saída	500	[uF]
Vo	Tensão de Saída	12	[V]
E <sub>G</sub>	Energia de Gap	0,33	-

# 3.3. Implementação do Algoritmo Perturba e Observa

A simulação final, queencontra-se em Apéndice B, é composta pelo subsistema do módulo fotovoltaico e o conversor Buck, conforme parâmetros da Tabela 4, conectado a uma carga resistiva. O Algoritmo MPPT atua diretamente no ciclo de trabalho do conversor, fazendo com que obtenha-se a melhor potência, conforme 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 do módulo obtida pela simulação da curva P-V(Figura 8). O código desenvolvido para implementação do algoritmo, encontra-se no Apêndice E.



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

Haja vista que o algoritmo foi implementado como ajuste direto do ciclo de trabalho do conversor e considerando valores constantes de condições padrão de ensaio: 1000  $W/m^2$  e 25 °C. O código conseguiu fazer com que o sistema fornecesse a maior potência, conforme os valores de corrente e tensão lidos na saída do subsistema da Figura 10 edadas as condições ambiente consideradas.

# **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%. Este trabalho apresenta uma das formas de atenuar a baixa conversão de energia dos painéis fotovoltaicos. O trabalho pode ser considerado em três partes: a simulação das curvas de tensão e pontência e simulação do subsistem do modulo fotovoltaico; a linearizão do circuito do painél fotovoltaico e projeto do conversor buck; e a simulação do sistema com a implementacao do algoritmo de rastreamento de máxima potência.

Após a implementação do método perturba e observa, pode-se notar que o sistema alcansou a máxima potência dada a irradiância ao qual esse foi submetido. O sistema é estável em regime permanente pois não foram consideradas mudanças nos valores de irradiância e temperatura, esse resultado era esperado, pois o algoritmo foi implementado como controle direto do ciclo de trabalho do conversor.

Atentando-se a crescente demanda do uso de energia limpa e sustentável, o crescimento do mercado de energia solar fotovoltaica, e a vertente deste trabalho de minimizar perdas de conversão de energia no sistema, sugere-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

- Considerando a baixa velocidade de convergência do algoritmo P&O, analisar o comportamento do sistema às mudanças de irradiância e temperatura e então projetaro controlador para compensar o erro em estado estacionário devido à essas oscilações, etambém compensara flutuação do algoritmo em torno do ponto máximo de potência;
- Implementação em bancada do sistema proposto;
- Estudo e implementação de outros métodos de rastreamento de máxima potência;

 Estudo e modelagem de outras topologias de conversores CC-CC aplicados à sistemas fotovoltaicos.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] EPE, Matriz Energética e Elétrica, 2019. Disponível em: <<u>http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-</u>eletrica.

> Acesso em 11 de março de 2020.

[2] ABSOLAR. Infográfico Absolar São Paulo. 2020. Disponível em: <a href="https://absolar.org.br/infografico-absolar.html">https://absolar.org.br/infografico-absolar.html</a> Acesso em 15 de maio de 2020.

[3] Portal Solar. Sistema Solar Off-Grid, São Paulo, 2019. Disponível em: <a href="https://www.portalsolar.com.br/sistema-energi">https://www.portalsolar.com.br/sistema-energi</a>

a-solar-off-grid> Acesso em 17 maio de 2020.

[4] Resolução Normativa 687, Brasília. 2015 Disponível em: <<u>https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf</u>> Acesso em 25 de abril de 2020.

[5] Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes. São Paulo, 2019.Disponível em: <a href="https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes">https://www.neosolar.com.br/aprenda/saibamais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seuscomponentes</a> Acesso em 20 de abril de 2020.

[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. Disponível em: <<u>https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet</u> DE14H%28II%29\_HC\_1500V\_May2019\_NT.pdf> Acesso em 14 de outubro de 2020. [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.

# APÊNDICE A

- Equivalente fotovoltaico e Conversor Buck:



# APÊNDICE B



- Simulação do Estudo de Caso Proposto:

# APÊNDICE C

#### %CURVAS CARACTERISTICAS I-V e P-V Clear clc close

## % CONDICOES PADRAO DE ENSAIO

 $\label{eq:Irradiancial = 1000;} Irradiancial = 1000; Irradiancial = 800; Irradiancial = 600; T = 25; Vpa = 0:0.01:50; Rs = 0.9152; Rp = 79.1525; Ms = 1.372; Mp = 1.05; \\ \end{tabular}$ 

# % VALORES CARACTERISTICOS DO DATASHEET Ns = 72;

Voc = 46.7/Ns; Isc = 9.55; a = 4.18e-3;

## % DEFINICAO DAS CONSTANTES

 $\label{eq:n} \begin{array}{l} n = 1.25; \\ k = 1.38e\text{-}23; \\ q = 1.60e\text{-}19; \\ EG = 1.15; \\ Tr = 273 + 25; \end{array}$ 

## % EQUACIONAMENTO

```
\label{eq:tau} \begin{split} T &= 273 + T; \\ Vt &= n*k*T/q; \\ V &= Vpa/Ns/Ms; \end{split}
```

# $\begin{array}{l} Iph1 = (Isc+a*(T-Tr))*Irradiancia1/1000; \\ Iph2 = (Isc+a*(T-Tr))*Irradiancia2/1000; \\ Iph3 = (Isc+a*(T-Tr))*Irradiancia3/1000; \end{array}$

```
Irr = (Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir = Irr^{(T/Tr)^{3}}exp(q^{EG/n/k^{(1/Tr-1/T)}});
I1 = zeros(size(V));
I2 = zeros(size(V));
I3 = zeros(size(V));
for j=1:5
  I1 = I1-(Iph1-I1-Ir.*(exp((V+I1.*Rs)/Vt)-1)-(V+I1.*Rs)/Rp)/(-1-Ir.*exp((V+I1.*Rs)/Vt).*Rs/Vt-Rs/Rp);
end
for j=1:5
  I2 = I2 - (Iph2 - I2 - Ir.*(exp((V+I2.*Rs)/Vt)-1) - (V+I2.*Rs)/Rp)/(-1 - Ir.*exp((V+I2.*Rs)/Vt).*Rs/Vt - Rs/Rp);
end
for j=1:5
  I3 = I3-(Iph3-I3-Ir.*(exp((V+I3.*Rs)./Vt)-1)-(V+I3.*Rs)./Rp)./(-1-Ir.*exp((V+I3.*Rs)./Vt).*Rs./Vt-Rs./Rp);
end
for j=1:length(I1)
if I1(j)<0
```

I1(j)=0;

```
end
end
for j=1:length(I2)
if I2(j)<0
     I2(j)=0;
end
end
for j=1:length(I3)
if I3(j)<0
     I3(j)=0;
end
end
Ipa1 = I1*Mp;
Ipa2 = I2*Mp;
Ipa3 = I3*Mp;
for j=1:length(I1)
  Ppa1(j)=Vpa(j)*Ipa1(j);
end
for j=1:length(I2)
  Ppa2(j)=Vpa(j)*Ipa2(j);
end
for j=1:length(I3)
  Ppa3(j)=Vpa(j)*Ipa3(j);
end
% CURVAS I-V E P-V;
plot(Vpa,Ipa1);
legend('1000W/mÂ<sup>2</sup>','800W/mÂ<sup>2</sup>','600W/mÂ<sup>2</sup>');
title('Curva I X V');
xlabel('Tensao (V)');
ylabel('Corrente (A)');
grid on;
hold on;
figure(2);
plot(Vpa,Ppa1,Vpa,Ppa2,Vpa,Ppa3);
legend('1000W/mÂ<sup>2</sup>','800W/mÂ<sup>2</sup>','600W/mÂ<sup>2</sup>');
title('Curva P X V');
xlabel('Tensao (V)');
ylabel('Potencia (W)');
grid on;
hold on;
```

# APÊNDICE D

% Equacoes modulo fotovoltaico % Parametros
% Saida: Ia = Corrente de operacao do modulo (A)
% Entrada:Vpv = Tensao de Operacao do modulo (V)%Irrad = Irradiancia 1000 W/m^2%Tcelsius = Temperatura do modulo (C)
function Ia=Imod(Vpv,Irrad,Tcelsius)
%% DEFINICAO DE CONSTANTES $k = 1.381e-23;$ % Constante de Boltzmann $q = 1.602e-19;$ % Carga do Eletron $n = 1.3;$ % Constante de idealidade do diodo (1 <n<2)< td="">Eg = 1.15;% Energia de Gap 1.15eV - Placa de Silicio</n<2)<>
%Quantidade de celulas por modulo: 72Ns = 12;% Quantidade de celulas no modulo (vertical)Np=6;% Quantidade de celulas no modulo (horizontal)
TrK = 298;% Temperatura ambiente em KelvinTaK = 273 + Tcelsius; % Temperatura de Referencia em Kelvin
Voc_TrK = 46.3 /Ns; % Tensao de Circuito Aberto por celula em serie Isc_TrK = 9.55/Np; % Corrente por celula em paralelo a = 1.33e-3;
Vc = Vpv / Ns; % Tensao por celula em serie
%% CALCULOS DE CORRENTE E TENSAO Isc = Isc_TrK*(1+(a*(TaK-TrK))); Iph = Irrad*Isc; % Fotocorrente Vt_TrK = n*k*TrK/q; b = Eg*q/(n*k); Ir_TrK = Isc_TrK/(exp(Voc_TrK/Vt_TrK)-1); Ir = Ir_TrK * (TaK / TrK)^(3/n) * exp(-b*(1/TaK-1/TrK)); dVdI_Voc = -2.0/Ns; Xv = Ir_TrK / Vt_TrK * exp(Voc_TrK/Vt_TrK); Rs = - dVdI_Voc - 1/Xv; Vt_Ta = n*k*TaK/q;
%% CALCULO DA CORRENTE DE OPERACAO
for j=1:5; Ia = Ia - (Iph - Ia - Ir .* ( exp((Vc + Ia .* Rs) ./ Vt_Ta) -1)) ./ (-1 - Ir * (Rs ./ Vt_Ta) .* exp((Vc + Ia .* Rs) ./ Vt_Ta)); end Ia=Ia*Np; out=Ia; end

APÊNDICE E

```
function d = MPPT(Vpv,Ipv)
persistent Vo Po do
if isempty(do)
  Vo = 10;
Po = 20;
do = 0.3;
end
Ppv = Vpv*Ipv;
PertubaD = 0.01;
if(Ppv > Po)
if(Vpv > Vo)
   d = do + PertubaD;
else
  d = do - PertubaD;
end
else
if(Vpv > Vo)
   d = do - PertubaD;
else
    d = do + PertubaD;
end
end
Vo = Vpv;
Po = Ppv;
do = d;
```



PONTIFICIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOLÁB PRÓ-REITORIA DE DESENVOLVIMENTO INSTITUCIONAL Av. Universitária, 1000 I Setor Universitário Calva Postal 86 I CEP 74005-010 Golánia I Golás I Bresal Pone: (62) 3946.3081 ou 3080 I Fax: (62) 3946.3080 inver, Eucoples.edu br I procing puoples.edu.br

# RESOLUÇÃO nº038/2020 - CEPE

# ANEXO I

# APENDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

A estudante Fernanda Prudente Moraes do Curso de Engenharia Elétrica, matricula 2014.2.0048.0119-6, telefone: (62) 98289-3919, e-mail fernandaprudentemoraes@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Simulação de Algoritmo de Rastreamento de Potência com Uso do Conversor Buck, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 10 de Dezembro de 2020.

Assinatura do(s) autor(es): Fernando- Prudente moraes

Nome completo do autor: Fernanda Prudente Moraes

Assinatura do professor-orientador:

Nome completo do professor-orientador: Antônio Marcos de Melo Medeiros

1



PONTIFICIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOLÁS PRÓ-REITORIA DE DESENVOLVIMENTO INSTITUCIONAL AL Universitária, 1000 I Setor Universitário Calua Postal 60 I CEP 74605-010 Golária I Golás I Bresil Parte: (62) 3045-303 I ou 3080 I Fax: (62) 3946-3080 www.pucpoles.edu.br | procin@pucpoles.edu.br

# RESOLUÇÃO nº038/2020 - CEPE

# ANEXO I

# APÊNDICE ao TCC

## Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

A estudante Ingredy Gabriela Gomes do Carmo do Curso de Engenharia Elétrica, matrícula 2017.1.0038.0055-0, telefone: (62) 98565-6406, e-mail ingredycarmo@icloud.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Simulação de Algoritmo de Rastreamento de Potência com Uso do Conversor Buck, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 10 de Dezembro de 2020.

Assinatura do(s) autor(es): Inquery Cyclour la Gomes Course Nome complete do autor: Ingredy Gabriela Gomes do Carmo

Assinatura do professor-orientador:

Nome completo do professor-orientador: Antônio Marcos de Melo Medeiros