UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

PEDRO HENRIQUE POMPERMAYER VETTORACI

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS MPPT PARA EMPREGO EM EMULADOR FOTOVOLTAICO

VITÓRIA
2022

PEDRO HENRIQUE POMPERMAYER VETTORACI

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS MPPT PARA EMPREGO EM EMULADOR FOTOVOLTAICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Pedro Henrique Pompermayer Vettoraci**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Msc. Netalianne M. F. Heringer
Coorientador: Dr. Paulo José Mello Menegáz

VITÓRIA
2022

PEDRO HENRIQUE POMPERMAYER VETTORACI

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS MPPT PARA EMPREGO EM EMULADOR FOTOVOLTAICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Pedro Henrique Pompermayer Vettoraci**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 16 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Msc. Netalianne M. F. Heringer
IFES - Guarapari
Orientadora

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz
UFES
Coorientador

Prof. Msc. Júlio César Madureira Silva
IFES
Examinador

Dannilo Peruch Alves Gama
Bacharel em Eng. Elétrica
Examinador

A Deus, minha família e aos amigos por todo apoio ao longo do curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da graduação e da realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, que me incentivaram nos momentos difíceis e sempre compreenderam a minha ausência enquanto dedicava esforço em busca de um futuro melhor.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram alcançar um melhor desempenho no processo de formação profissional.

Aos meus orientadores, que sempre conduziram o trabalho com extrema dedicação, sempre disponíveis a compartilhar todos seus vastos conhecimentos.

Aos meus colegas de curso, por compartilharem comigo tantos momentos de aprendizados e descobertas, e por toda amizade e companheirismo ao longo deste processo. Amizades estas que carregarei comigo sempre.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho e a todos que participaram, direta ou indiretamente da minha jornada, enriquecendo meu processo de aprendizado e me tornando uma pessoa melhor.

A todos vocês, meu muito obrigado!

RESUMO

Na última década a demanda de energia elétrica tem apresentado um elevado crescimento ao redor do mundo, que aliado à crise hídrica, tem mostrado que a utilização de energias alternativas e de gerações distribuídas tem se tornado cada dia mais necessária e urgente. Em relação às fontes de energia renováveis, a energia solar fotovoltaica apresenta destaque entre as diferentes alternativas, uma vez que detém vantagens no ponto de vista operacional. Sendo assim, nos últimos anos, é possível observar altos investimentos no Brasil e no mundo, empregados em gerações distribuída caracterizadas por parques de painéis fotovoltaicos e também em utilizações residenciais. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo simular um emulador de módulos fotovoltaicos, utilizando conversor *Buck* e um modelo matemático simplificado de primeira ordem, e ainda aplicar os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês, *Maximum Power Point Tracking*) Perturba e Observa e Vmax1Ord a fim de realizar estudos de validação do modelo. Para análise e validação de todos os modelos e métodos propostos, foram realizadas simulações e os resultados foram expostos e comparados com as metodologias consolidadas na literatura. A resposta do emulador obtida foi comparada com a resposta do modelo matemático utilizado, apresentando um bom funcionamento do conversor *Buck* projetado, entretanto, no ponto de máxima potência, é quando acontece o maior desvio dos valores de corrente e consequentemente de potência. A resposta das simulações dos métodos MPPT's implementadas foram comparadas. A técnica Vmax1ord apresentou maior eficiência quanto ao valor atingido e menor tempo de rastreamento para todos os casos de temperatura e irradiação. Além disso, para variações abruptas de valores de irradiância e para valores de irradiância muito pequenos, o método P&O apresenta baixo desempenho.

Palavras-chave: Matriz energética. Emulador fotovoltaico. Energia renovável. MPPT.

ABSTRACT

For the last decade, the demand for electricity has shown a high growth around the world, and in addition the water crisis has shown that the use of alternative energies and distributed generations has become increasingly necessary and urgent. In relation to renewable energy sources, photovoltaic solar energy stands out among the different alternatives, since it has advantages from an operational point of view. Thus, in recent years, it is possible to observe high investments in Brazil and in the world, employed in distributed generations characterized by photovoltaic panel parks and also in residential uses. In this context, this work aims to simulate a photovoltaic modules emulator, using a Buck converter and a simplified mathematical model of the first order, and also to apply the Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods. Disturbs and Observes and Vmax1Ord in order to carry out model validation studies. For analysis and validation of all models and methods proposed, simulations were performed and the results were exposed and compared with the methodologies consolidated in the literature. The emulator response obtained was compared with the response of the mathematical model used, showing a good operation of the designed Buck converter, however, at the point of maximum power, it is when the greatest deviation of current values and consequently of power occurs. The response of the implemented MPPT's simulations were compared. The Vmax1ord technique showed greater efficiency in terms of the reached value and shorter tracking time for all cases of temperature and irradiation. Furthermore, for abrupt variations in irradiance values and for very small irradiance values, the P&O method presents poor performance.

Keywords: Energy matrix. Photovoltaic emulator. Renewable energy. MPPT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética brasileira em setembro de 2021. 15
Figura 2 - Curva representando a elevação da demanda nos últimos anos devido à crise hídrica. 16
Figura 3 - Variação do ponto de máxima potência em função da variação de irradiância e temperatura. 20
Figura 4 - Comportamento da corrente em função da tensão 21
Figura 5 - Representação pelo modelo ideal. 21
Figura 6 - Representação pelo modelo com resistência em série. 21
Figura 7 - Representação pelo modelo com resistência em paralelo. 22
Figura 8 - Representação pelo modelo com dois diodos. 22
Figura 9 - Espelhamento da curva I-V pelo método de primeira ordem. 22
Figura 10 - Conversor *Buck*. 24
Figura 11 - Conversor *Boost*. 24
Figura 12 - Conversor Buck-Boost. 25
Figura 13 - Exemplo de método MPPT controlado pela corrente ou tensão. 26
Figura 14 - Exemplo de método MPPT controlado diretamente pela razão cíclica. 26
Figura 15 - Fluxograma do P&O com ajuste direto na razão cíclica. 27
Figura 16 - Representação do conversor *Buck* projetado. 33
Figura 17 - Circuito equivalente chave semicondutora em condução (*ton*). 35
Figura 18 - Circuito equivalente chave semicondutora bloqueada (*toff*). 37
Figura 19 - Diagrama de bode para função de transferência de malha aberta. 40
Figura 20 - Lógica do emulador fotovoltaico. 41
Figura 21 - Regiões de rastreamento para os conversores CC-CC. 43
Figura 22 - Conversor *Boost* e algoritmo de P&O. 44
Figura 23 - Simulação proposta para fins de comparações. 45
Figura 24 – Curvas PV com variação de irradiância e temperatura, sendo os valores referentes a 1000 W/m2 e 25ºC, 1000 W/m2 e 50º e 800 W/m2 e 25º respectivamente. 46
Figura 25 - Curvas IV com variação de irradiância e temperatura, sendo os valores referentes a 1000 W/m2 e 25ºC, 1000 W/m2 e 50º e 800 W/m2 e 25º respectivamente. 46
Figura 26 - Erro apresentado no ponto de máxima potência e característica oscilatória do emulador. 47
Figura 27 - P&O para 1000W/m2 de irradiância e 60ºC de temperatura. 48

Figura 28 - P&O para 400W/m2 de irradiância e 25ºC de temperatura. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Módulo KC50T- Kyocera 32
Tabela 2 - Parâmetros para projeto do conversor *Buck*. 34
Tabela 3 - Valores de tensão, corrente e resistência teóricos para ponto de máxima potência. 42
Tabela 4 - Valores de indutores e capacitores mínimos para as diferentes configurações. 44
Tabela 5 - Comparação entre P&O com módulo do *Simulink* e emulador. 48
Tabela 6 - Resumos dos valores obtidos para o método Vmax1Ord. 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CI	Condutância Incremental
dB	Decibéis
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
IV	Corrente por Tensão
MPPT	Maximum Power Point Tracking
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&O	Perturba e Observa
PI	Proporcional e Integral
pTEG	Gerador Termelétrico Portátil
PV	Potência por Tensão
PWM	Pulse Width Modulation
toff	Tempo bloqueada
ton	Tempo de condução

LISTA DE SÍMBOLOS

V’	Tensão Espelhada (V)
Vca	Tensão de Circuito Aberto (V)
V	Tensão do Módulo Fotovoltaico (V)
IL	Corrente do Modelo de Primeira Ordem (A)
K	Ganho de Corrente
τ	Constante de Tensão
Im	Irradiância do Módulo (W/m2)
Ir	Irradiância de Referência (1000W/m2)
Tr	Temperatura de Referência (278K)
T	Temperatura do Módulo (ºC)
d	Razão Cíclica
Vm	Tensão para o Máximo Ponto de Potência (V)
Vg	Tensão de Entrada do Conversor (V)
Vo	Tensão de Saída do Conversor (V)
Δ_{IL}	Ondulação da Corrente no Indutor
f	Frequência de Chaveamento (Hz)
L	Indutância (H)
Δ_{VC}	Ondulação da Tensão no capacitor (V)
C	Capacitância (F)
Io	Corrente na Saída (A)
x	Vetor de Estado
y	Vetor de Saída
i_L	Corrente no Indutor (A)
v_C	Tensão no Capacitor (V)
R	Resistência (Ω)
$\bar{X}$	Ponto Quiescente do Vetor de Estado
$\tilde{x}$	Perturbação de Pequeno Sinal no Vetor de Estado
$\bar{U}$	Ponto Quiescente do Vetor de Entrada
$\tilde{u}$	Perturbação de Pequeno Sinal no Vetor de Entrada
$\bar{D}$	Ponto Quiescente do Ciclo de Trabalho
$\tilde{d}$	Perturbação de Pequeno Sinal no Ciclo de Trabalho

$\bar{Y}$	Ponto Quiescente do Vetor de Saída
$\tilde{y}$	Perturbação de Pequeno Sinal no Vetor de Saída
G_{id}	Função de Transferência
Fc	Frequência de Corte (Hz)
Kp	Ganho do Controlador Proporcional
Ki	Ganho do Controlador Integral
Vmpp	Tensão Para Máxima Potência (V)
Impp	Corrente Para Máxima Potência (A)
Rmpp	Resistência Para Máxima Potência (Ω)
Pmpp	Potência Para Máxima Potência (W)
Rcarga	Resistência da Carga (Ω)
Lmin	Indutância Mínima (H)
Cmin	Condutância Mínima (F)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **15**

2 JUSTIFICATIVA **18**

3 OBJETIVOS **19**

3.1 Objetivo Geral **19**

3.2 Objetivos Específicos **19**

4 REFERENCIAL TEÓRICO **20**

4.1 Características e Representação dos Painéis Fotovoltaicos **20**

4.2 Conversores CC-CC **23**

4.3 Métodos MPPT **25**

4.3.1 Método Perturba e Observa (P&O) 26

4.3.2 Método Vmax1Ord 27

4.4 Trabalhos Correlatos **28**

5 METODOLOGIA **31**

5.1 Metodologia **31**

5.2 Etapas de Desenvolvimento **31**

5.3 Emulador de Módulo Fotovoltaico **32**

5.3.1 Projeto do conversor Buck 32

5.3.2 Projeto conversor PI 34

5.3.3 Avaliação do emulador de arranjo fotovoltaico. 40

5.4 Métodos MPPT **41**

5.4.1 Método do Perturba e Observa (P&O) 41

5.4.1.1 Projeto do Conversor *Boost* 41

5.4.1.2 Simulação do Perturba e Observa 44

5.4.1.3 Simulação com módulo do *Simulink* 45

5.4.2 Método Vmax1Ord 45

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES **46**

6.1 Avaliação do Emulador de Arranjo Fotovoltaico **46**

6.2 Avaliação dos métodos MPPT **47**

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 52

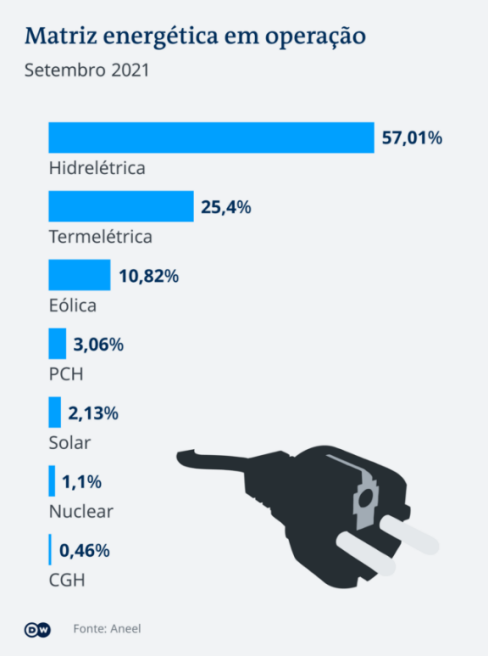
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica é crescente no Brasil e no mundo, tornando realidade o replanejamento das matrizes energéticas. E para minimizar o impacto ambiental causado pela geração de energia, é de extrema importância que haja investimento em meios alternativos de geração (COSTA, 2010).

O Brasil apresenta uma matriz energética majoritariamente hídrica, conforme ilustra a Figura 1, o que traz ao país vantagens em aspectos ambientais, uma vez que a energia gerada por meio de usinas hidrelétricas é considerada essencialmente renovável e limpa (emitem menos gases de efeito estufa). Além disso, por meio do desenvolvimento constante de tecnologias voltadas para a melhoria e eficiência do sistema de transmissão e distribuição de energia, cada vez mais é possível visualizar regiões remotas transformando-se em grandes centros urbanos e polos industriais. No entanto, deve-se considerar que as instalações de hidroelétricas envolvem altos impactos à fauna e flora e às demais características demográficas e naturais da região onde são instaladas, o que somado aos altos custos de manutenibilidade e investimento num sistema de transmissão extenso, apresentam ainda pontos negativos consideráveis quanto à geração de energia no Brasil (HERINGER, 2016).

Figura 1 - Matriz energética brasileira em setembro de 2021.

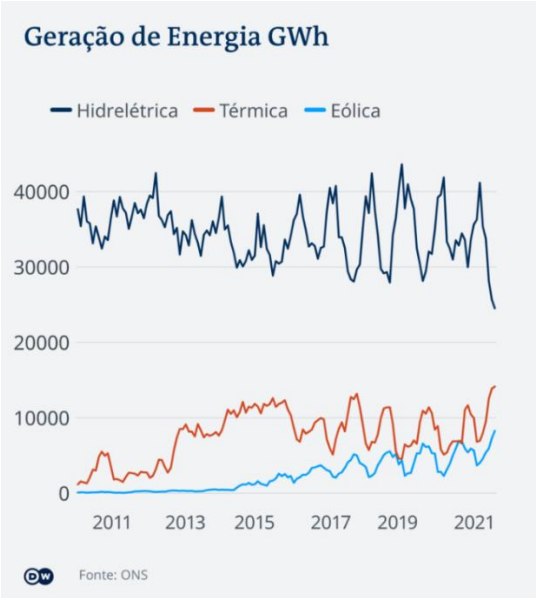


Fonte: Aneel, 2021

Além de tudo, atualmente o Brasil apresenta um cenário de crise hídrica, que é resultado dos baixos níveis de água nos reservatórios. A falta de água tornou-se mais grave a partir do ano de 2014, sendo a região Sudeste a mais afetada. Entretanto, o atual momento da crise é considerado o pior da história, e alguns estudos indicam que os episódios de falta de recursos hídricos devem se repetir nos próximos anos. Não obstante, a água não é igualmente distribuída no território brasileiro. Por exemplo, a região Norte concentra a maior parte das reservas hídricas do país, ao mesmo tempo em que é a região com a menor densidade demográfica (EXAME, 2022).

O Brasil apresentou geração recorde em centrais termelétricas em agosto do ano de 2021, conforme mostra a Figura 2. Dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) mostram que 14.143 GWh foram produzidos no período, 12% a mais que o total registrado no auge da última crise hídrica, em 2015 (ONS, 2021).

Figura 2 - Curva representando a elevação da demanda nos últimos anos devido à crise hídrica.



Fonte: ONS, 2022

Um monitoramento feito pelo Banco Mundial mostra que o quilowatt-hora (kWh) no Brasil já estava acima da média mundial em 2019. Uma nova bandeira tarifária, chamada de “escassez hídrica”, criada pela Aneel, deve vigorar até 2022, o que vai praticamente dobrar a conta de luz dos brasileiros (GOV, 2021). Das 3.099 usinas termelétricas em operação, a maioria (cerca de 65,5%) queima fontes fósseis, que também são mais poluentes.

Neste contexto, a utilização de fontes de energia alternativas limpas tem se mostrado cada vez mais necessárias e urgentes. Exemplos que pertencem a este grupo, as quais são consideradas renováveis ou inesgotáveis são: eólica (energia do vento), biomassa (energia de matéria orgânica), geotérmica (energia do interior da Terra), oceânica (energia das marés e das ondas) e a fotovoltaica.

A energia solar fotovoltaica apresenta destaque entre as diferentes alternativas, uma vez que, seu aspecto operacional se mostra com diversos benefícios como: menor poluição de diferentes naturezas, além de apresentar ausência de ruídos, manutenção simples e baixo impacto ambiental, podendo também gerar eletricidade junto às construções, sem necessidade de longas linhas de transmissão (COSTA, 2010). Reflexo disso, é o grande aumento da demanda de energia oriunda nos últimos anos.

O Brasil ficou na quarta posição do ranking de países que mais investiu em capacidade solar fotovoltaica em 2021 no mundo, com novos 5,7 GW no último ano, segundo levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2022) com base em dados atualizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a recente publicação da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2020). A energia solar fotovoltaica apresentou um ano histórico em 2021, com recordes na expansão da fonte por todo o Brasil. Foram mais de 3,5 GW de potência instalada em residências, fachadas e pequenos terrenos, segundo dados da ANEEL (ANEEL, 2021).

Percebe-se então que cada vez mais a energia solar fotovoltaica tem crescido, representando maior percentual da demanda gerada no Brasil, o que torna notória a importância do desenvolvimento das tecnologias que dizem respeito a esse tipo de geração. Entretanto, avaliar e validar pesquisas que envolvem a implementação de módulos fotovoltaicos se tornam difíceis e custosas, por conta das características inerentes à tecnologia, como a dependência climática e a necessidade de controle de temperatura e irradiação. Há ainda alguns fenômenos que influenciam a geração fotovoltaica, como o sombreamento parcial de módulos, que são difíceis de serem implementados em laboratório e merecem atenção e estudo. Por isso, a implementação de emuladores de módulos fotovoltaicos, que sejam capazes de realizar rastreamento do ponto de máxima potência de operação se faz necessária para facilitar pesquisas laboratoriais e consequentemente o avanço da tecnologia em questão.

2 JUSTIFICATIVA

O replanejamento da matriz energética para atender o consumo da população continua sendo um grande desafio. Buscando superar o problema, mas considerando um menor impacto ambiental, os estudos em fontes renováveis vêm crescendo em todo o mundo. No Brasil, devido ao seu alto potencial, a geração solar fotovoltaica tem ganhado bastante enfoque. Com esse aumento de aplicações, se torna necessário a redução de custos, melhoria da eficiência e confiabilidade.

A implementação de um emulador para representar o comportamento de módulos fotovoltaicos, em conjunto com a aplicação dos métodos para busca do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*, MPPT) será interessante para facilitar o acesso das universidades na realização de testes acadêmicos, além de reduzir a complexidade por não depender de ambientes controlados específicos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é simular um emulador de painel fotovoltaico, utilizando conversor *Buck*, um modelo matemático simplificado de primeira ordem, e aplicar os métodos de MPPT para estudo de validação do modelo.

3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, os quais indicarão o caminho a seguir em busca do objetivo geral, estão listados a seguir:

- Estudo da modelagem de painel fotovoltaico, bem como de conversores de conversores CC-CC*;*
- Implementação em *software* de um modelo matemático que emule as características elétricas dos módulos fotovoltaicos;
- Projeto e simulação de um conversor *Buck;*
- Estudo de métodos MPPT e suas aplicações;
- Simulação do modelo completo com aplicação dos métodos estudados.

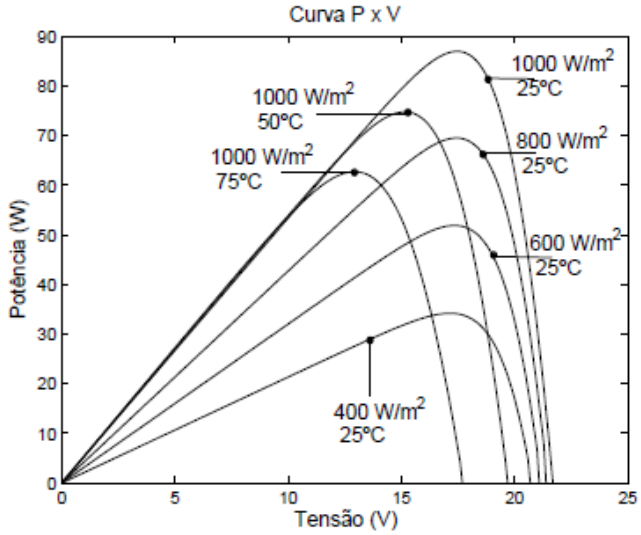
4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Características e Representação dos Painéis Fotovoltaicos

Um sistema de geração que utiliza painéis fotovoltaicos é formado, quando isolados, pelos seguintes componentes: módulo fotovoltaico, controlador de carga, baterias e inversor de frequência (quando a carga exigir corrente alternada) (COSTA, 2010). Já em sistemas conectados à rede, há a utilização de inversores solares, que reúnem as funções do controlador de carga, indicando ao conjunto de módulos o ponto de operação do sistema e também do inversor, entregando à saída do sistema energia em características elétricas alternadas.

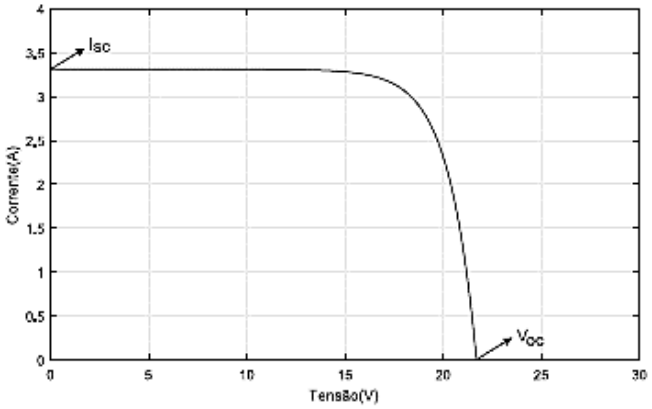
Os fótons provenientes da radiação solar, ao incidirem sobre o painel fotovoltaico, possuindo energia suficiente para que os elétrons passem da banda de valência para a banca de condução, geram um movimento ordenado de partículas gerado pela célula fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014). A corrente gerada nos módulos aumenta com o aumento da irradiação, todavia, a eficiência do módulo diminui com o aumento da temperatura, ou seja, o aumento da irradiância aumenta o ponto de operação da máxima potência e o aumento da temperatura faz com que o valor da máxima potência sofra um decréscimo (COSTA, 2010). A Figura 3 ilustra essa variação do ponto de máxima potência em função da variação de irradiância e temperatura e a Figura 4 mostra o comportamento da corrente em função da tensão (Curva I-V).

Figura 3 - Variação do ponto de máxima potência em função da variação de irradiância e temperatura.



Fonte: Costa (2010).

Figura 4 - Comportamento da corrente em função da tensão

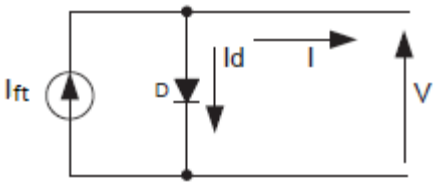


Fonte: Heringer (2016).

Segundo Neto (2006), os modelos elétricos fotovoltaicos podem ser representados basicamente por quatro circuitos elétricos equivalentes, os quais são brevemente descritos a seguir:

A. Modelo ideal, no qual somente é considerada a corrente fotogerada e a corrente do diodo de difusão e sua representação é mostrada na Figura 5;

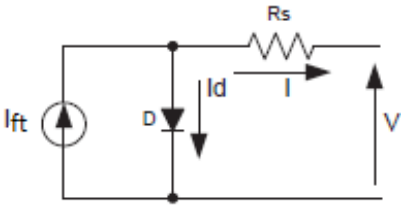
Figura 5 - Representação pelo modelo ideal.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

B. Modelo com resistência em série, no qual representa as perdas dos contatos metálicos do módulo e sua representação é mostrada na Figura 6;

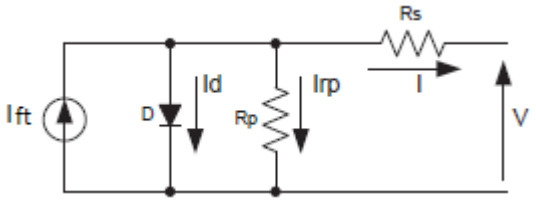
Figura 6 - Representação pelo modelo com resistência em série.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

C. Modelo com resistência em paralelo, no qual representa as perdas por correntes parasitas e sua representação é mostrada na Figura 7;

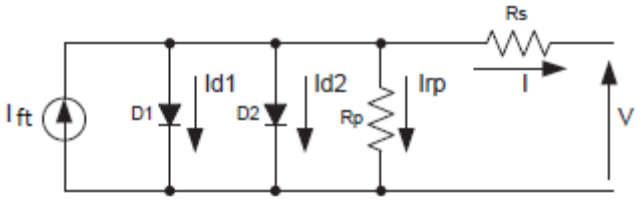
Figura 7 - Representação pelo modelo com resistência em paralelo.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

D. Modelo com dois diodos, no qual, além do diodo de difusão, é inserido um diodo de recombinação e sua representação é mostrada na Figura 8.

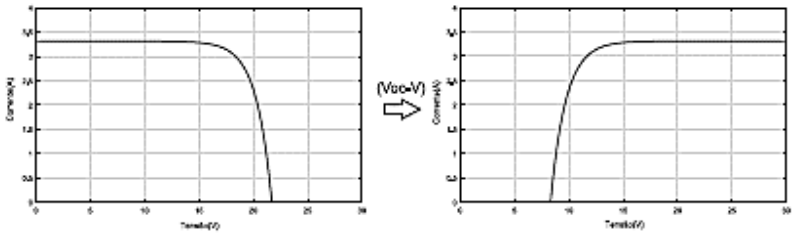
Figura 8 - Representação pelo modelo com dois diodos.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Um outro modelo foi desenvolvido e testado por Wagner Teixeira da Costa em 2010 (COSTA, 2010), o qual será utilizado na simulação deste trabalho, utiliza um modelo matemático de equações lineares de primeira ordem ao invés dos modelos citados anteriormente. Seu desenvolvimento é embasado na resposta de um sistema de primeira ordem à entrada ao degrau. Sua resposta é semelhante ao perfil I-V, todavia espelhado, conforme Figura 9. Para realizar o espelhamento pode-se valer da Equação 1 (COSTA, 2010).

Figura 9 - Espelhamento da curva I-V pelo método de primeira ordem.



Fonte: Costa (2010).

$$V' = Voc - V, \tag{1}$$

Onde:

V’ é a tensão espelhada, Voc é a tensão de circuito aberto e V é a tensão do módulo.

A corrente fornecida pelo modelo de primeira ordem (IL) é dada pela Equação 2, onde K é o ganho de corrente e τ é a constante de tensão. (COSTA, 2010)

$$IL = K\{1 - \exp\left(\frac{V'}{\tau}\right)\} \tag{2}$$

De acordo com Costa (2010), a constante de tensão pode ser calculada pela Equação 3. Nela, as constantes c1, c2, c3 e c4 variam de acordo com o módulo e podem ser calculadas. Im é a irradiância do módulo (W/m2), Ir é a irradiância de referência (1000W/m2), Tr é a temperatura de referência (278K) e T é a temperatura do módulo.

$$\tau = c1\frac{Im}{Ir} + \ c2\frac{T}{Tr} + \ c3\frac{Im}{Ir}\frac{T}{Tr} + c4 \tag{3}$$

Além disso, como indicado anteriormente, os painéis fotovoltaicos podem ser entendidos como uma fonte de corrente, entretanto, a tensão de saída em seus terminais não é constante e a corrente de saída depende da tensão, da mesma forma que a tensão depende da corrente, dessa forma, o ponto de operação também depende da carga conectada em seus terminais (HERINGER, 2016).

Naturalmente os módulos fotovoltaicos possuem limitações de potência, tensão e corrente. Sendo assim, a fim de se obter diferentes valores de tensão e corrente de saída, faz-se diferentes configurações de arranjos dos painéis fotovoltaicos, utilizando associações em série e paralelo para obtenção do conjunto equivalente (UMINHO, 2010).

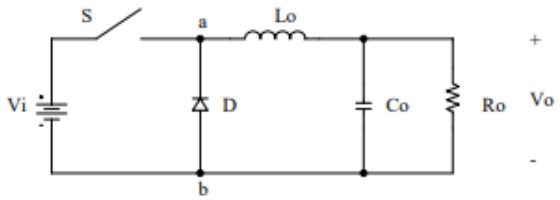
4.2 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são circuitos lineares ou chaveados. Sua aplicabilidade nos sistemas fotovoltaicos está relacionada à possibilidade de se ajustar os níveis de tensão de entrada ao nível de tensão desejada na saída por meio do controle do seu ciclo de trabalho. Os conversores

aplicados neste trabalho são considerados em regime de condução contínua de corrente pelo fato da sua dinâmica ser muito mais rápida do que a dinâmica de um painel fotovoltaico. (COSTA, 2010)

O conversor *Buck* é caracterizado pela tensão de saída ser menor que a tensão de entrada, ou seja, é um conversor abaixador de tensão. A Figura 10 ilustra um exemplo do conversor em questão. Para o modo de condução contínuo, a corrente no indutor (Lo) permanece maior que zero ao longo de todo período de comutação. Além disso, o ganho de tensão do conversor é igual a sua razão cíclica (d, do inglês, *duty cycle*).

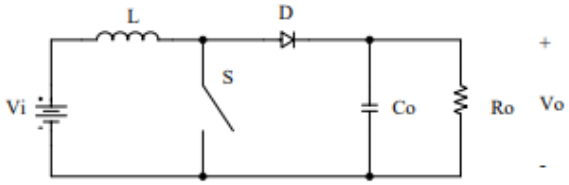
Figura 10 - Conversor *Buck*.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O conversor *Boost* é caracterizado pela tensão de saída ser maior que a tensão de entrada, ou seja, é um conversor elevador de tensão. A Figura 11 ilustra um exemplo do conversor em questão. O ganho de tensão será dado pelo inverso de um menos a razão cíclica.

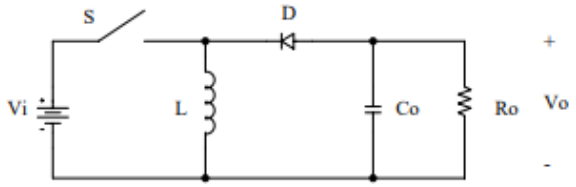
Figura 11 - Conversor *Boost*.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Um outro conversor largamente utilizado é o conversor *Buck-Boost*¸ o qual pode operar tanto como elevador quanto como abaixador de tensão. O ganho de tensão é dado pela razão cíclica dividido por um menos a razão cíclica. A Figura 12 ilustra um exemplo do conversor em questão.

Figura 12 - Conversor *Buck-Boost*.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

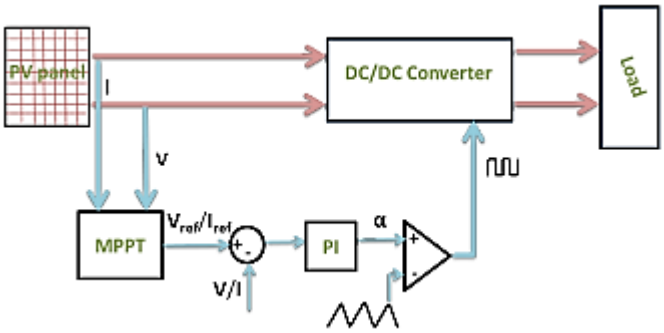
Como citado anteriormente, a relação entre a tensão de entrada e saída está diretamente relacionada à razão cíclica, sendo assim, considerando o objetivo proposto pelo trabalho, a aplicabilidade desses conversores torna-se imprescindível, tendo em vista que é possível fazer um ajuste no ponto de operação do emulador fotovoltaico por meio de alterações na razão cíclica utilizando os métodos MPPT.

4.3 Métodos MPPT

Como iniciado na subseção anterior, os métodos MPPT consistem, basicamente, em um conversor CC-CC com um ajuste dinâmico que garanta que o ponto de operação seja o de maior potência, independente das condições climáticas (MAGNO et al., 2020). As formas de se ajustar o chaveamento do conversor CC-CC são divididas em dois principais grupos: (MOTAHHIR; HAMMOUMI; GHZIZAL, 2019)

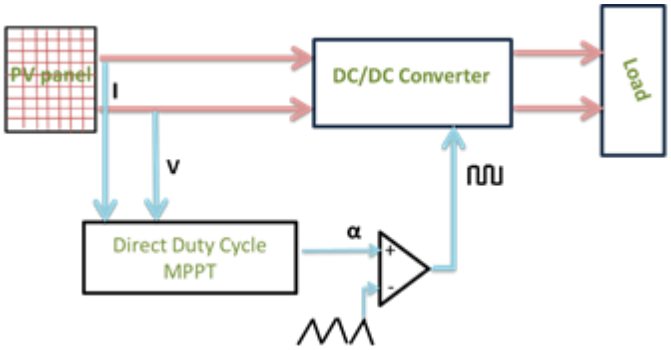
A. Controle baseado em corrente ou tensão de referência, o qual consiste em comparar a tensão ou corrente de referência (ponto de máxima potência) com o valor entregue pelo painel. Esse erro é computado e ajustado por um controlador PI. A saída do controlador será comparada com uma função dente de serra a fim de se obter a razão cíclica do conversor CC-CC que garanta a operação no ponto de máxima potência. A Figura 13 ilustra o circuito explicado.
B. Controle direto da razão cíclica. Nesse modelo, diferentemente do anterior, não há necessidade de um controlador PI para ajuste dos erros uma vez que o controle é realizado direto na razão cíclica do conversor. Segundo Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019), as principais vantagens de se utilizar esse método é a simplificação do modelo (ausência de controlador PI), além de uma redução no custo computacional, sendo assim, este foi o método utilizado neste trabalho. A Figura 14 ilustra o circuito explicado.

Figura 13 - Exemplo de método MPPT controlado pela corrente ou tensão.



Fonte: Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019).

Figura 14 - Exemplo de método MPPT controlado diretamente pela razão cíclica.



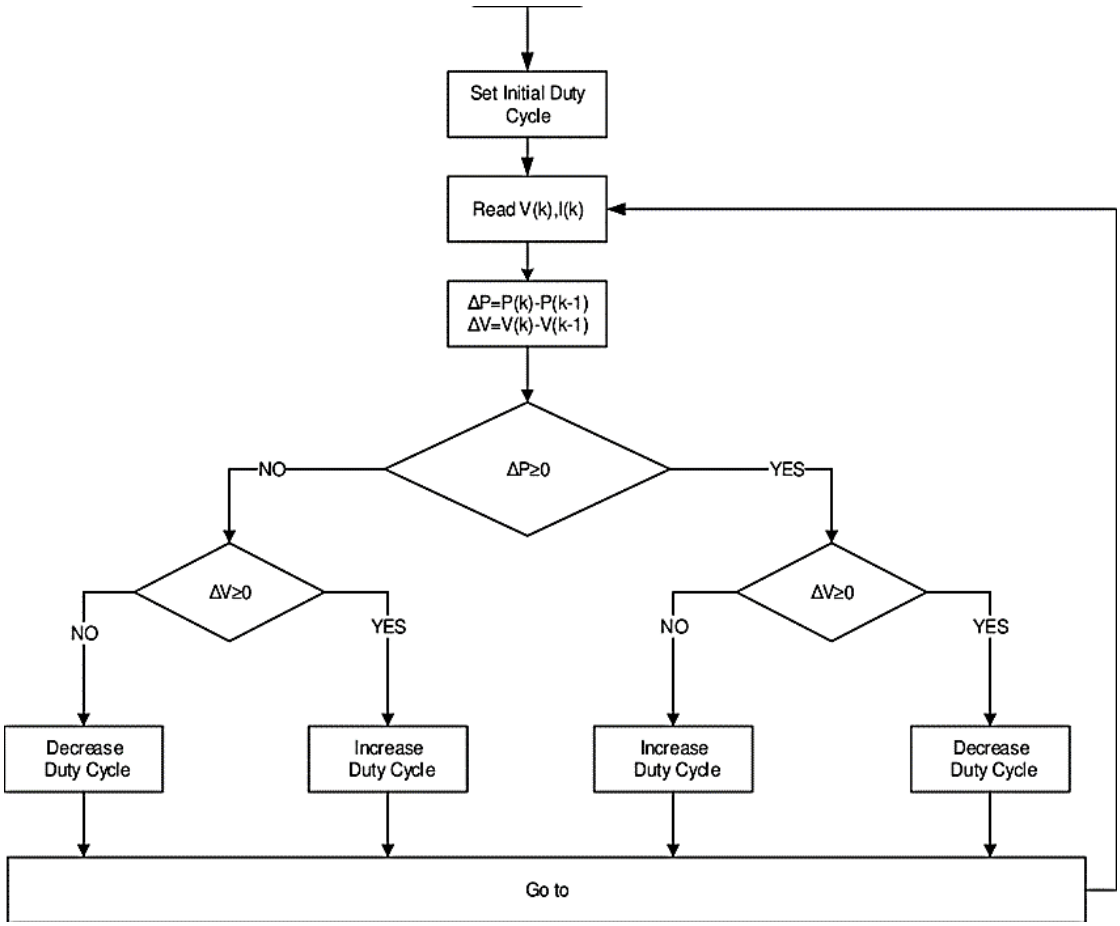
Fonte: Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019).

De acordo com Lobato (2015), Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019), os métodos MPPT mais utilizados são o Perturba e Observa (P&O) e o de Condutância Incremental (CI) por apresentarem baixa complexidade durante a implementação e boa eficiência.

4.3.1 Método Perturba e Observa (P&O)

Como o próprio nome sugere, o princípio fundamental desse método consiste em inserir uma perturbação (*offset*) no sistema a fim de verificar o comportamento da potência (ISHAQUE et al., 2014). Caso ocorra um incremento na potência a perturbação continua no mesmo sentido, caso contrário, ocorre inversão (LOBATO, 2015). A Figura 15 mostra do fluxograma para esse método por meio do ajuste direto na razão cíclica.

Figura 15 - Fluxograma do P&O com ajuste direto na razão cíclica.



Fonte: Dayaramani, Bharadwaj e Gawre (2017).

Como mostrado na Figura 15, todo o controle é realizado por meio do incremento ou decremento da razão cíclica. Sendo assim, segundo Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019) ainda há duas possíveis formas de se realizar tais modificações. A primeira consiste em inserir uma perturbação constante independente do ponto de operação em que o sistema se encontra. Apesar de possuir uma certa limitação por depender do tamanho da perturbação a ser inserida, ainda possui boa eficiência. A outra forma possui um entendimento análogo, com a diferença de que é utilizada a derivada da potência em função da tensão ou corrente como forma de ajustar o valor da perturbação a ser inserida (SOLODOVNIK; DOUGAL; LIU, 2004). Diante do exposto, optou-se pela utilização do método da perturbação constante.

4.3.2 Método Vmax1Ord

Esse método foi desenvolvido e validado por Costa (2010), o qual calcula diretamente o valor da tensão para o ponto de máxima potência. Sua principal vantagem é não depender dos

intervalos de amostragem, uma vez que determina o ponto de máxima potência utilizando os valores de temperatura e irradiância, sendo assim, não ocorrem oscilações em torno no ponto de máxima potência. Todavia, uma desvantagem é a necessidade de sensores para fornecerem tais valores. Os valores são obtidos matematicamente segundo a potência fornecida pelo modelo matemático descrito na subseção 4.1. Matematicamente, Costa (2010) mostra que o cálculo é realizado pelas Equações 4, 5 e 6. Onde Vm indica a tensão para o ponto de máxima potência, τ é descrito na Equação 3 e Vca é a tensão de circuito aberto.

$$Vm(n+1) = Vm(n) - \frac{f(Vm)}{f'(Vm)} \tag{4}$$

$$f(Vm) = \frac{\tau}{\tau + Vm} - \exp\left(-\frac{Vca - Vm}{\tau}\right) \tag{5}$$

$$f'(Vm) = -\frac{\tau}{(\tau + Vm)^2} - \frac{1}{\tau}\exp\left(-\frac{Vca - Vm}{\tau}\right) \tag{6}$$

4.4 Trabalhos Correlatos

Ao longo dos anos, vários algoritmos MPPT foram propostos para obter o ponto de máxima potência de painéis fotovoltaicos. Concomitantemente, diversos estudos foram realizados de forma a revisar o desempenho dos algoritmos MPPT previamente propostos.

A partir do estudo de trabalhos correlatos, verificou-se que Mamur e Ahiska (2015) propuseram um impulso DC-DC conversor com rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT), baseado em microcontrolador embutido em Perturbe e Observe (P&O), algoritmo para obter potência máxima de um recém-projetado gerador termoelétrico portátil (pTEG) em um sistema TEG real. A carga de condição combinada para o pTEG foi investigada experimentalmente, obtendo resultados satisfatórios.

Nayak, Mohapatra e Mohanty (2017) propuseram um conversor baseado no teorema de transferência de potência máxima que é dependente da resistência da carga. A resistência de carga diferente é considerada para busca do ponto de máxima potência (MPPT), com diferentes topologias de conversores. Observou-se que o conversor *buck-boost* é adequado para qualquer resistência de carga conectada no sistema fotovoltaico. Foi realizado um esforço para escolher adequadamente a variável de controle que é o sinal de saída do rastreador do MPPT, sendo a variável de controle que depende de entradas do rastreador MPP é decidida com base na estabilidade do sistema.

Rasheed, Shihab e Rashid (2021) propõe um método para estimar parâmetros baseado no modelo de diodo único (do inglês, *single diode model*) referente à equação de célula solar com base em dados algorítmicos implícitos. Os valores adquiridos a partir da implementação do método proposto foram considerados suficientes e os valores para célula solar de diodo único foram determinados com convergência rápida, a qual foi mais capaz de determinar esses parâmetros para estabelecer os valores finais.

Motahhir, Hammoumi e Ghzizal (2019) fizeram um levantamento e revisão estratégica abrangente dos métodos MPPT que têm sido mais utilizados em sistemas fotovoltaicos, de forma a buscarem retratar o estado atual da arte referente a esse contexto. Durante o desenvolvimento do trabalho buscaram descrever os princípios de atuação destacando suas vantagens e limitações. Uma de suas conclusões, é referente a métodos classificados como simples como o de célula piloto que são fáceis de implementar, mas mostram resultados menos precisos. O método apontado como o mais utilizado é o P&O devido à simplicidade de sua implementação em hardware, porém apresentando um alto nível de oscilações de estado estacionário. A fim de superar este problema, o método de condutância incremental foi proposto, entretanto o mesmo requer um controlador com alta capacidade para executar os cálculos pelo nível de complexidade do modelo, o que leva a um alto custo do sistema.

Dessa forma a partir de todo o estudo referencial exposto, para implementação deste trabalho foi utilizado do conversor *Buck*, uma vez que o mesmo é amplamente utilizado no contexto de emulação de painéis fotovoltaicos. Além disso, optou-se pela implementação do modelo matemático de primeira ordem, visto que possui baixa complexidade e resultados satisfatórios. Para os métodos MPPT, utilizou-se da técnica Perturba e Observa, posto que é o método mais

implantado pela sua simplicidade (MOTAHHIR; HAMMOUMI; GHZIZAL, 2019) e resultados eficazes para o contexto proposto. Outro método utilizado foi o Vmax1Ord (COSTA, 2010), o qual foi desenvolvido de forma otimizada para o modelo matemático empregado para o emulador, sua principal vantagem é calcular a tensão responsável por entregar a máxima potência, sendo assim, não há oscilação em torno de um ponto.

5 METODOLOGIA

5.1 Metodologia

No que diz respeito à classificação deste trabalho, quanto à sua natureza, conclui-se ser uma pesquisa aplicada, posto que é esperado o uso dos resultados referentes ao referencial teórico levantado, além de ser um estudo de caso. Em relação aos objetivos deste trabalho, trata-se de uma pesquisa descritiva, tendo em vista que estabelece relação entre as variáveis. Ademais, em relação aos procedimentos técnicos, o presente trabalho pode ser enquadrado como uma pesquisa experimental com objeto de estudo e variáveis de influência definidos. Não obstante, o problema apresentado será analisado sob uma perspectiva quantitativa (PRODANOV; FREITAS, 2013).

5.2 Etapas de Desenvolvimento

Em primeira instância, foi realizada uma abordagem exploratória para revisão do estado da arte. Nesta etapa foi elaborada uma avaliação profunda sobre o modelo matemático a ser utilizado, além da topologia do conversor CC-CC, e dos algoritmos de Seguimento de Ponto de Máxima Potência.

A próxima etapa foi composta pela implementação do modelo matemático para emulação de um conjunto de módulos, sendo possível, através de software específico a simulação do modelo matemático escolhido, realizando testes e comparações com as curvas levantas por modelo padrão no *Simulink*.

Nesta etapa, foi realizada a implementação do projeto de conversor e controlador para chaveamento, considerando as condições de funcionamento identificadas a partir das etapas anteriores. O projeto foi testado por meio de simulação em software. A partir da simulação do projeto do emulador de módulos fotovoltaicos, foram implementados alguns métodos de Seguimento de Ponto de Máxima Potência.

A partir da simulação e teste, e dos dados obtidos nas etapas anteriores, foi realizada análise e discussão dos resultados obtidos, comparando com o objetivo da proposta.

5.3 Emulador de Módulo Fotovoltaico

5.3.1 Projeto do conversor *Buck*

Para desenvolvimento do emulador, tomou-se como base as informações de um módulo fotovoltaico real, o Kyocera KC-50T. Este módulo foi escolhido por haver Costa (2010) já apresentado os parâmetros estimados necessários para simular o modelo de primeira ordem. As características contidas na folha de dados deste módulo é apresentada na Tabela 1. (KYOCERA, 2008).

Tabela 1 - Características do Módulo KC50T- Kyocera

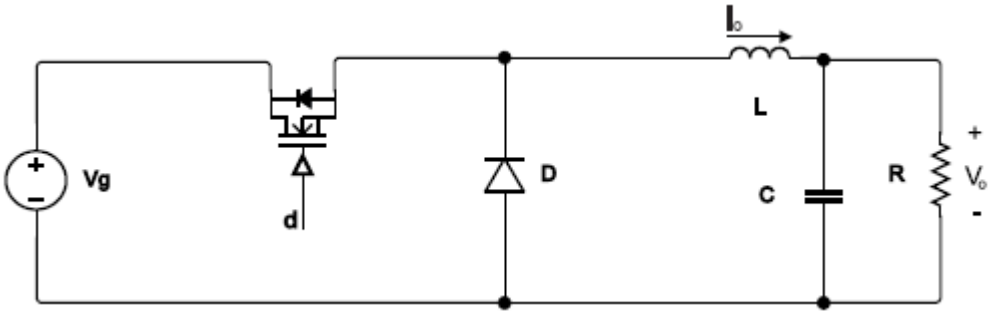
Parâmetros	Condição Teste Padrão	Condição Operação Nominal
Máxima Potência -Pm(W)	54	38
Tensão de MPPT -VMP P T (V)	17,4	15, 3
Tensão de MPPT -IMP P T (A)	3,11	2, 49
Tensão de Circuito Aberto- Voc(V)	21,7	19, 7
Corrente de Curto Circuito- Isc(A)	3,31	2, 67
Coeficiente de Temperatura de Voc- α(V/◦C)	$-8,21 \cdot 10-2$	-
Coeficiente de Temperatura de Isc- β(A/◦C)	$-1,33 \cdot 10-3$	-

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Inicialmente, para projeto de um conversos *Buck* é preciso escolher as tensões de entrada e saída, a corrente de saída para operação do conversor e um ciclo de trabalho. Dessa forma, foi considerada a utilização de uma fonte de alimentação contínua. Na

Figura 16 é possível visualizar a representação da configuração a ser projetado, sendo Vg referente à tensão de entrada do conversor e Vo a tensão de saída.

Figura 16 - Representação do conversor *Buck* projetado.



Fonte: Heringer (2016).

Para encontrar o valor de um ciclo de trabalho, basta valer-se da Equação 6.

$$d = \frac{V_o}{V_g} \tag{6}$$

Deve-se então considerar a condição de máxima ondulação de corrente no indutor e tensão no capacitor para encontrar o valor de d referente a essas situações. Sendo assim, utiliza-se das Equações 7 e 8, representadas abaixo.

$$\Delta_{IL} = \frac{V_g d(1 - d)}{f \cdot L} \tag{7}$$

$$\Delta_{VC} = \frac{\Delta_{IL}}{2 . \pi . f . C} \tag{8}$$

Sendo:

Δ_{IL} A ondulação da corrente no indutor;

f Frequência de chaveamento;

L Indutância (H);

Δ_{VC} A ondulação da tensão no capacitor (V);

C Capacitância (F).

A partir das equações representadas, pode-se concluir que o valor de d para máximas ondulações de corrente e tensão para o indutor e capacitor é $d = 0{,}5$. Após isso, foram realizadas algumas considerações de valores, os quais são representados na Tabela 2. Foi considerado Vo como a tensão de circuito aberto para o módulo emulado sob irradiância de 1000W/m2 e temperatura de 25ºC e Io como a corrente de curto-circuito do módulo em condições de teste padrão. Além disso a variação igual a 5% de Io e 1% de Vo.

Tabela 2 - Parâmetros para projeto do conversor *Buck*.

Parâmetros	Valor
Vo	21,7V
Vg	43,4 V
Io	3,31A
f	20kHz
d	0,5
ΔIL	0,1655A
ΔVc	0,174V

Fonte: Kyocera (2008).

Após a definição dos valores do conversor, os valores de C e L são então dimensionados através das Equações 7 e 8. Dessa forma, chega-se então aos valores de $L = 3{,}21mH\ (máximo)$ e $C = 7{,}57\mu F$.

5.3.2 Projeto conversor PI

Inicialmente no projeto do controlador PI, é preciso encontrar a função de transferência em malha aberta de corrente do conversor. Assim como apontou Erickson e Mankimovic (2006), é necessário adotar um método de linearização, assim como um critério de estabilidade para estudo do controlador por não apresentarem comportamento linear no estágio de potência.

A técnica de linearização denominada Modelo de Pequenos Sinais, desenvolvida por Middlebrook e Slobodan (1977) pode ser utilizado para perturbações pequenas na tensão do capacitor e corrente do indutor, sendo realizado um cálculo média a cada período de comutação do conversor, por variáveis médias no espaço de estado, sendo a linearização obtida em torno do ponto de operação.

Deve-se então considerar duas situações:

- Chave semicondutora em condução (*ton*);
- Chave bloqueada (*toff*).

Além disso, é preciso conhecer as variáveis de interesse para cada estado do conversor: $\dot{x} = Ax + B$ e $y = Cx$, onde:

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$y = \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} \tag{10}$$

Onde:

x Vetor de estado;

y Vetor de saída;

i_L Corrente no indutor (A);

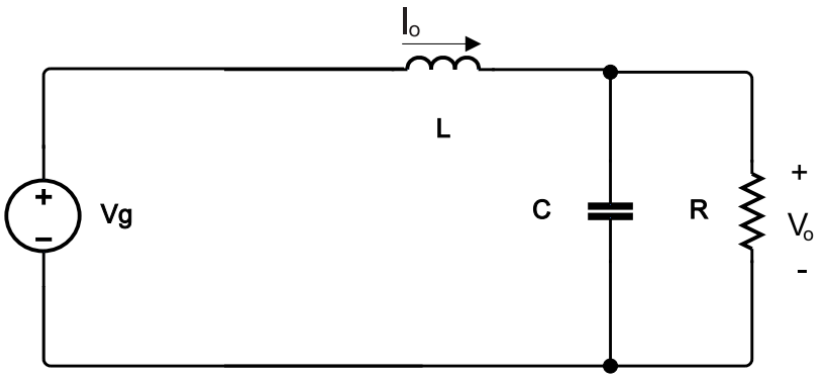
v_C Tensão no capacitor (V).

Considerando ideias a chave e o diodo do conversor, para o período *ton*, aplica-se as leis de Kirchhoff ao circuito equivalente (Equações 11 e 12), conforme mostrado na Figura 17.

$$V_g = L\dot{i}_L + v_C \tag{11}$$

$$i_L = C\dot{v}_C + \frac{v_C}{R} \tag{12}$$

Figura 17 - Circuito equivalente chave semicondutora em condução (*ton*).



Fonte: Heringer (2016)

Dessa forma, pode-se escrever as equações de estados e saídas:

$$\dot{i_L} = -\frac{1}{L}\ v_C + \frac{1}{L}\ V_g \tag{13}$$

$$v_C = \frac{1}{C}\ i_L - \frac{1}{RC}\ v_C \tag{14}$$

$$v_C = v_o \tag{15}$$

As matrizes A, B e C são descritas abaixo para o período *ton*:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}$$

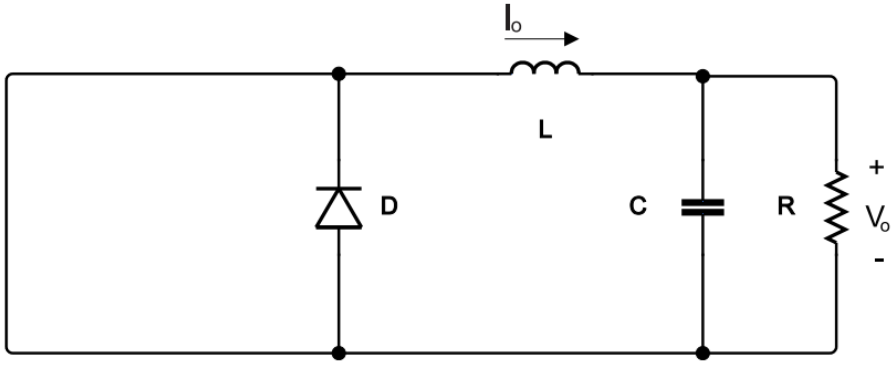
$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

De forma análoga, aplicando as leis de Kirchhoff para o circuito equivalente na Figura 18 durante o período *toff* obtém-se as Equações 16 e 17.

$$0 = L\dot{i_L} + v_C \tag{16}$$

$$i_L = C\dot{v_C} + \frac{v_C}{R} \tag{17}$$

Figura 18 - Circuito equivalente chave semicondutora bloqueada (*toff*).



Fonte: Heringer (2016)

Obtém-se as equações de estado de estados e de saída:

$$\dot{i_L} = -\frac{1}{L}\ v_C \tag{18}$$

$$v_C = \frac{1}{C}\ i_L - \frac{1}{RC}\ v_C \tag{19}$$

$$v_C = v_o \tag{20}$$

E tem-se as matrizes A, B e C para o período *toff*:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = [0]$$

$$C_2 = [1 \quad 0]$$

O próximo passo é escrever os períodos *ton* e *toff* em função da razão cíclica, indicado nas Equações 21 e 22:

$$ton = d \tag{21}$$

$$toff = (1 - d) \tag{22}$$

A partir das Equações 21 e 22 apresentadas e das matrizes escritas, obtém-se as matrizes medianas A, B e C.

$$A = A_1 d + A_2(1-d) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B = B_1 d + B_2(1-d) = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C_1 d + C_2(1-d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Conforme Erickson e Maksimovic (2006), observa-se agora o comportamento para perturbações de pequenos sinais em torno do ponto de operação, utilizando-se das Equações 23, 24, 25 e 26 que demonstram onde ocorrem as perturbações.

$$x = \bar{X} + \tilde{x} \tag{23}$$

$$u = \bar{U} + \tilde{u} \tag{24}$$

$$d = \bar{D} + \tilde{d} \tag{25}$$

$$y = \bar{Y} + \tilde{y} \tag{26}$$

Onde:

$\bar{X}$ Ponto quiescente do vetor de estado;

$\tilde{x}$ Perturbação de pequeno sinal no vetor de estado;

$\bar{U}$ Ponto quiescente do vetor de entrada;

$\tilde{u}$ Perturbação de pequeno sinal no vetor de entrada;

$\bar{D}$ Ponto quiescente do ciclo de trabalho;

$\tilde{d}$ Perturbação de pequeno sinal no ciclo de trabalho;

$\bar{Y}$ Ponto quiescente do vetor de saída;

$\tilde{y}$ Perturbação de pequeno sinal no vetor de saída.

É possível obter um conjunto de equações onde se deve calcular os pontos quiescentes (valores em regime do conversor) e as pequenas variações em torno desse ponto (valores de transitório do conversor). Sendo a derivada de todos os elementos nula, tem-se:

$$0 = A\bar{X} + B\bar{U}$$

$$Y = C\bar{X}$$

E considerando as equações médias do sistema em equilíbrio, sua solução é

$$\bar{X} = -A^{-1}B\bar{U}$$
$$Y = -CA^{-1}B\bar{U}$$

Por meio do desenvolvimento das equações é possível chegar ao ponto de quiescente para i_L e V_o, conforme Equações 27 e 28.

$$\overline{i_L} = \frac{\bar{d}\overline{V_g}}{R} \; v_C \tag{27}$$

$$\overline{v_C} = \bar{d}\overline{V_g} \tag{28}$$

Para considerar as pequenas variações em torno do ponto quiescente, é substituído o modelo médio em espaço de estados. Além disso, assumindo que a hipótese de pequenos sinais é satisfeita, os termos não-lineares de 2ª ordem são pequenos se comparado aos de primeira ordem, podendo ser desprezados (HERINGER, 2016). Dessa forma, encontra-se a função de transferências da corrente de saída indicada na Equação 29.

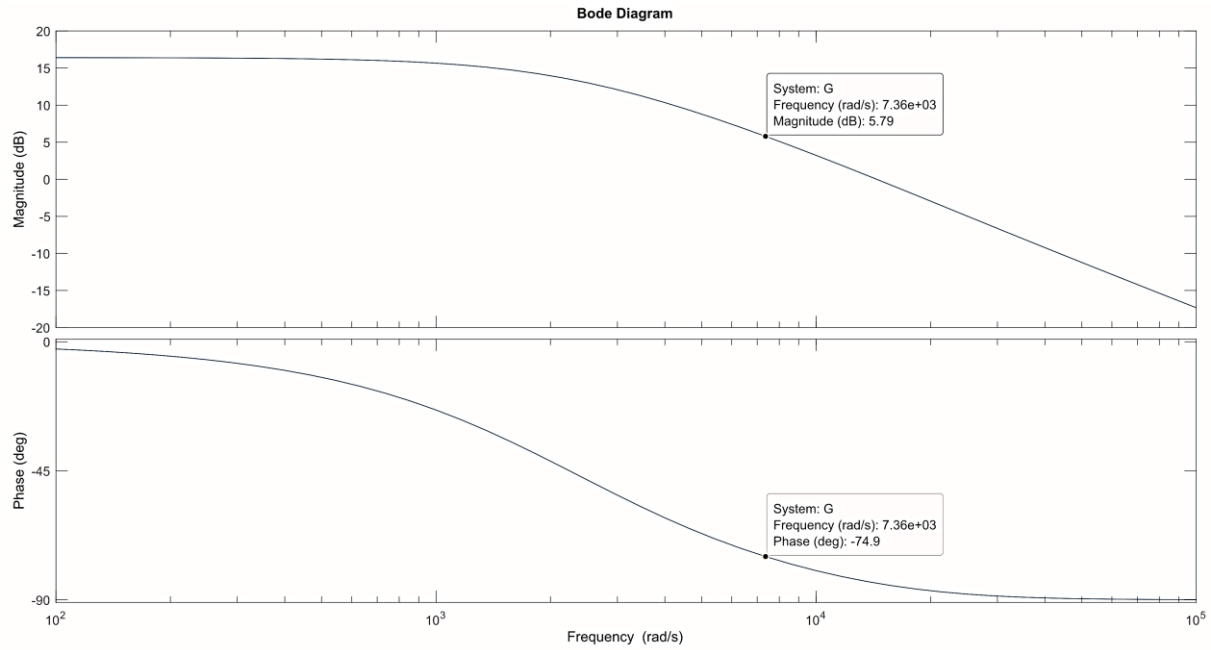
$$G_{id} = \frac{i(s)}{d(d)} = V_g \frac{1 + RCs}{RLCs^2 + L_s + R} \tag{29}$$

Sendo R é a carga na saída do emulador de modo a extrair a máxima potência do conversor. Considerando os valores obtidos no projeto do conversor Buck Vo = 21,7 V, R = Vo/Isc = 6, 56Ω, e substituindo na Equação 29 pode-se obter a função de transferência de malha aberta dada na Equação 30.

$$G_{id} = \frac{i(s)}{d(d)} = \frac{43{,}4 + 0{,}002155s}{1{,}59e - 7s^2 + 3{,}21e - 3s + 6{,}56} \tag{30}$$

A partir da função de transferência em malha aberta G_{id}, é realizada uma análise por meio da resposta em frequência por meio do diagrama de Bode para sintonia do controlador PI. São adotados os critérios de margem de fase de 60º e frequência de corte Fc de 1171Hz, ωC de 7360rad/S. Sendo assim, para os valores escolhidos, pode-se visualizar no diagrama de Bode na Figura 19.

Figura 19 - Diagrama de bode para função de transferência de malha aberta.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Dessa forma, a fase correspondente encontra-se em Φ = −74, 9, e a contribuição do controlador deve ser de: (−180º + 60º + 74, 9 = - 45, 1). Ou seja, a magnitude nessa frequência deve ser nula. Como na frequência de ωc = 7360 a magnitude do ganho é de 5, 79dB, o controlador deve prover uma atenuação de −5,79dB. Considerando então $s = j\omega_c$ e os critérios considerados, tem-se:

$$G_c(s) = 20 \log K_p \left(\frac{s + \omega_z}{s}\right) \tag{31}$$

Como o ângulo que o compilador deve adicionar é de 45,1, tg (45,1 = 1). Desta forma, ωC = ωz. Encontra-se os ganhos Kp= 5,34 e Ki = 9391. Os valores foram ajustados empiricamente a fim de se obter uma melhor resposta.

5.3.3 Avaliação do emulador de arranjo fotovoltaico.

Conforme Heringer (2016), foi realizada a simulação a fim de avaliar o controle projetado, operando como emulador de um arranjo PV série. A lógica de implementação do emulador é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Lógica do emulador fotovoltaico.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A partir dos valores de irradiância e temperatura o modelo matemático de primeira ordem fornece como saída um valor para a corrente. Esse valor serve como entrada para o controlador PI, o qual atua para zerar o erro entre a corrente na saída do conversor *Buck* e a corrente fornecida pelo modelo. Ao final desse controle, há uma comparação com uma função dente de serra a fim de se obter a razão cíclica que irá ajustar o chaveamento do conversor *Buck* para que a resposta final do conversor seja satisfatória quando a emulação de um painel.

5.4 Métodos MPPT

5.4.1 Método do Perturba e Observa (P&O)

Como ilustrado na Figura 15, o rastreamento no ponto de máxima potência ocorre por meio do ajuste na razão cíclica de um conversor CC-CC. Segundo Hussein, Mahdi e Wahhab (2021), o conversor mais utilizado para essa finalidade é o conversor *Boost*.

5.4.1.1 Projeto do Conversor *Boost*

O primeiro passo para definição dos parâmetros do conversor é determinar quais são os pontos de máxima transferência de potência. Para tanto, Hussein, Mahdi e Wahhab (2021) mostra que os cálculos podem ser realizados matematicamente a partir dos valores de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto. Kjær (2005) mostra que a tensão do ponto de máxima potência é equivalente a 80% da tensão de circuito aberta e que a corrente corresponde a 90% da corrente de curto circuito, conforme ilustra as Equações 32 e 33.

$$Ffv = \frac{Vmpp}{Voc} = 0{,}8 \tag{32}$$

$$Ffi = \frac{Impp}{Isc} = 0{,}9 \tag{33}$$

Sendo assim, a partir dos valores obtidos para $Vmpp$ e $Impp$, é possível calcular os valores de resistência e potência equivalente para este ponto de operação, conforme mostra as Equações 34 e 35.

$$Rmpp = \frac{Vmpp}{Impp} \tag{34}$$

$$Pmpp = Vmpp * Impp \tag{35}$$

Considerando diferentes combinações de irradiância e temperatura foi possível levantar os valores teóricos para $Vmpp$, $Impp$ e $Rmpp$. Esses dados são resumidos pela Tabela 3

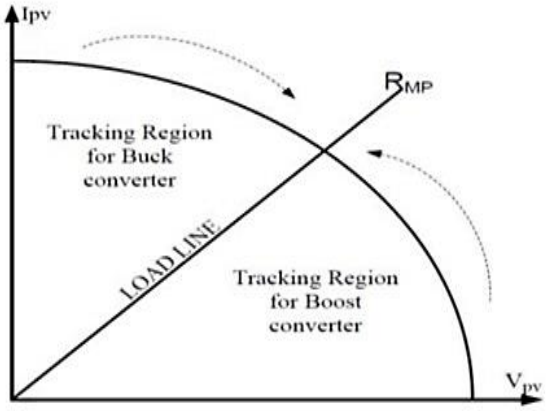
Tabela 3 - Valores de tensão, corrente e resistência teóricos para ponto de máxima potência.

Irradiância (W/m2)	Temperatura (ºC)	Vca (V)	Icc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Rmpp (Ω)
1000	25	21,7	3,31	17,36	2,98	5,83
1000	50	19,6	3,36	15,72	3,03	5,19
1000	60	18,8	3,38	15,06	3,05	4,94
800	25	21,6	2,65	17,28	2,38	7,25
800	50	19,6	2,69	15,64	2,42	6,46
800	60	18,7	2,71	14,98	2,44	6,15
600	25	21,5	1,99	17,18	1,79	9,61
600	50	19,4	2,02	15,54	1,82	8,56
600	60	18,6	2,03	14,88	1,83	8,14
400	25	21,3	1,32	17,04	1,19	14,3
400	50	19,2	1,35	15,40	1,21	12,72
400	60	18,4	1,35	14,74	1,22	12,10

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Com base na Figura 21, para o conversor *Boost*, a região de rastreamento é para região onde a tensão é maior e a corrente é menor que os valores para o ponto de máxima potência, sendo assim, a resistência da carga precisa ser maior que a $Rmpp$. Sendo assim, adotou-se um valor de 16Ω.

Figura 21 - Regiões de rastreamento para os conversores CC-CC.



Fonte: Hussein, Mahdi e Wahhab (2021).

De acordo com Mahela e Shaik (2017), a razão cíclica para essas condições é descrita pela Equação 36.

$$d = 1 - \sqrt{\frac{Rmpp}{Rcarga}} \tag{36}$$

O valor do indutor mínimo que garanta uma operação no modo de condução contínua é descrita pela Equação 37, onde fs representa a frequência de chaveamento (FAHAD et al., 2018) (CHAN; MASRI, 2010).

$$Lmin = \frac{d(1-d)^2 Rcarga}{2fs} \tag{37}$$

Além disso, o valor do capacitor mínimo para garantir a saída de tensão desejada é dada pela Equação 38, onde Vr representa a tensão de *ripple* (KAZIMIERCZUK, 2015).

$$Cmin = \frac{d}{fsVrRcarga} \tag{38}$$

A Tabela 4 resume os valores obtidos para as mesmas condições impostas na Tabela 3.

Tabela 4 - Valores de indutores e capacitores mínimos para as diferentes configurações.

Irradiância (W/m2)	Temperatura (ºC)	fs(kHz)	Vr (%)	Lmin (H)	Cmin (F)
1000	25	20	2	8,35e-5	4,48e-7
1000	50	20	2	7,75e-5	4,67e-7
1000	60	20	2	5,49e-5	6,94e-7
800	25	20	2	9,50e-5	4,09e-7
800	50	20	2	8,89e-5	4,30e-7
800	60	20	2	5,84e-5	5,94e-7
600	25	20	2	1,19e-4	2,59e-7
600	50	20	2	1,18e-4	2,89e-7
600	60	20	2	5,83e-5	4,48e-7
400	25	20	2	1,02e-4	3,84e-7
400	50	20	2	9,58e-5	4,07e-7
400	60	20	2	3,94e-5	2,04e-7

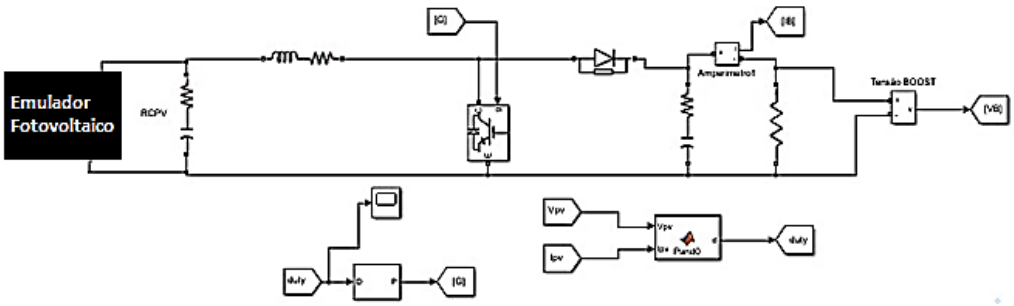
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Sendo assim, como os valores calculados são referentes ao mínimo a ser adotado, os componentes escolhidos devem ser maiores do que o maior valor obtido dentre as diferentes configurações. Foi atribuído um valor de 5mH e 3µF para o indutor e capacitor, respectivamente.

5.4.1.2 Simulação do Perturba e Observa

Com o projeto do conversor *Boost* implementado, vide Figura 22, o mesmo foi conectado à saída do conversor *Buck*.

Figura 22 - Conversor *Boost* e algoritmo de P&O.



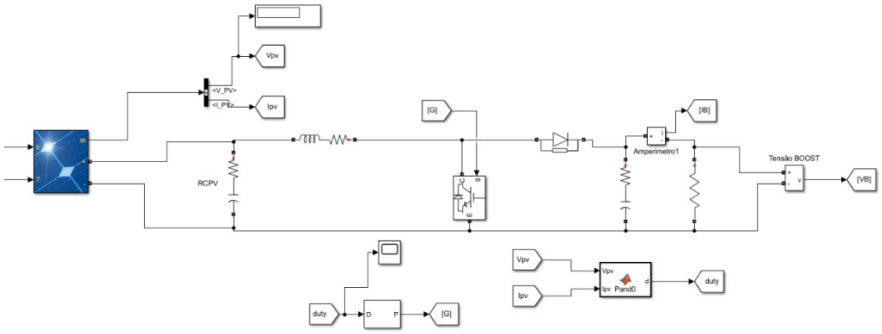
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Foi implementado o algoritmo de P&O ilustrado na Figura 15, utilizando como parâmetros de entrada a tensão e corrente na saída do conversor *Buck* a fim de se obter a razão cíclica necessária para garantir o ponto de máxima potência. Após encontrar o valor, utiliza-se um bloco do *Simulink* denominado *PWM Generator* para que o sinal PWM fosse gerado ajustando-se a frequência de chaveamento.

5.4.1.3 Simulação com módulo do *Simulink*

Como forma de comparação dos métodos propostos foi elaborada uma simulação com o módulo PV presente no próprio *Simulink*. A simulação é mostrada na Figura 23. O conversor *Boost* e o método P&O são os mesmos apresentados anteriormente.

Figura 23 - Simulação proposta para fins de comparações.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

5.4.2 Método Vmax1Ord

O método proposto por Costa (2010) foi desenvolvido para ser utilizado em conjunto com a representação do painel fotovoltaico pelo modelo matemático de primeira ordem. Sendo assim, os parâmetros de configuração do bloco são os próprios parâmetros do modelo de primeira ordem citado anteriormente.

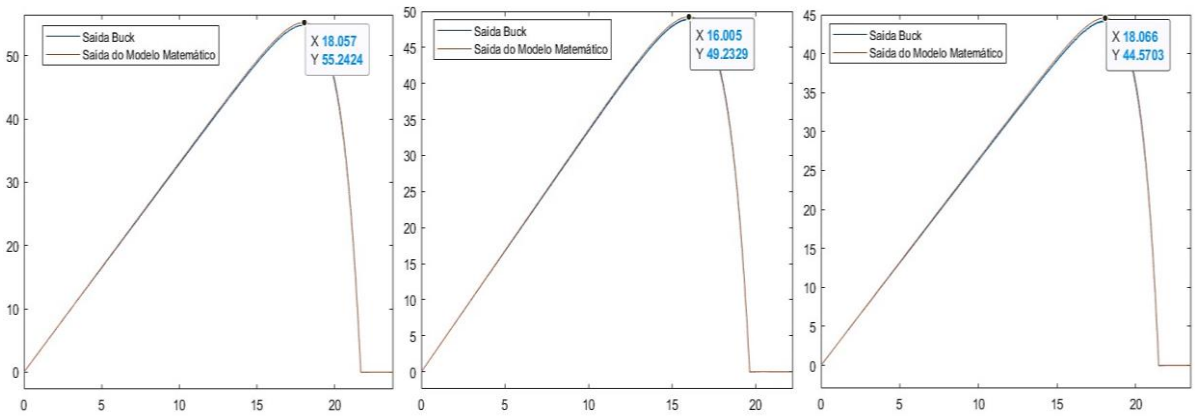
O modelo possui duas entradas e uma saída. A saída é o valor da tensão para a qual se obtém a máxima potência e as duas entradas são os valores de irradiância e temperatura. O valor da tensão Vm indicada na Equação 4 é inicializada como 75% do valor de tensão de circuito aberto, uma vez que Costa (2010) indica que, desta forma, o sistema consegue encontrar a solução em cinco iterações, comparando sempre o valor da iteração anterior com a atual e salvando a de maior valor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Avaliação do Emulador de Arranjo Fotovoltaico

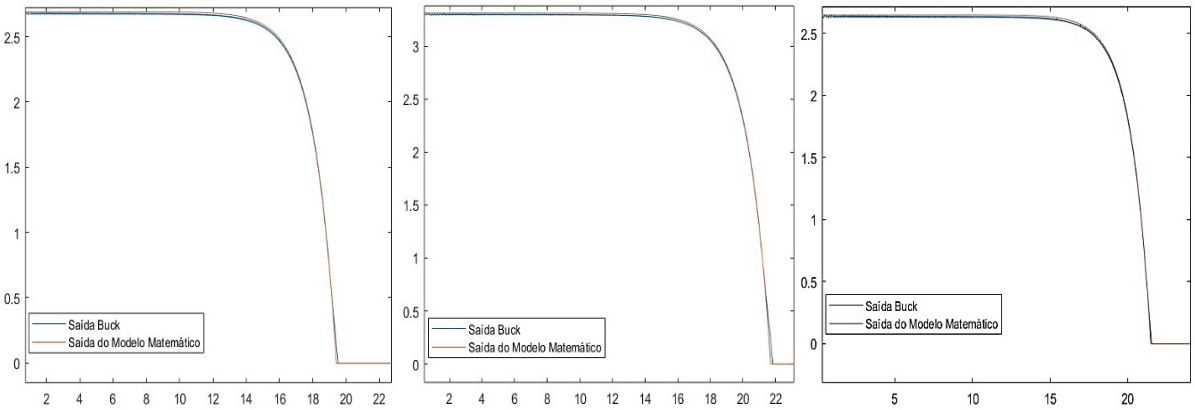
Inicialmente foram levantadas curvas de potência por tensão (PV) e curvas de corrente por tensão (IV) para as diferentes combinações de irradiâncias e temperaturas a fim de garantir que o emulador implementado apresentava a saída desejada. Para tal, foram comparadas as saídas do conversor *Buck* com a saída do modelo matemático de primeira ordem desenvolvido por Costa (2010). As Figuras 24 e 25 ilustram as curvas PV e IV e os respectivos impactos da temperatura e irradiância, respectivamente.

Figura 24 – Curvas PV com variação de irradiância e temperatura, sendo os valores referentes a 1000 W/m2 e 25ºC, 1000 W/m2 e 50º e 800 W/m2 e 25º respectivamente.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

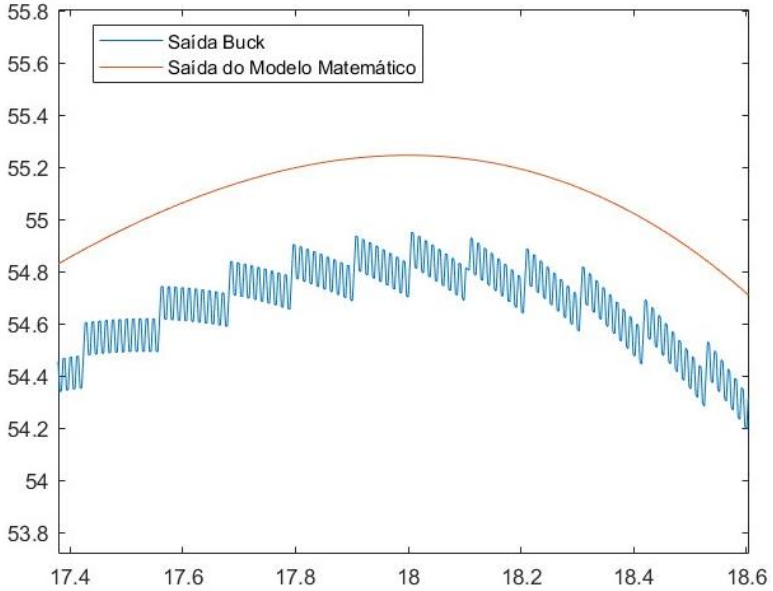
Figura 25 - Curvas IV com variação de irradiância e temperatura, sendo os valores referentes a 1000 W/m2 e 25ºC, 1000 W/m2 e 50º e 800 W/m2 e 25º respectivamente.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Figura 26 apresenta a curva PV comparando ainda a resposta do modelo matemático com a de saída do conversor *Buck*, porém em uma porção ampliada do ponto de maior potência, considerando valores de irradiãncia e temperatura como 1000W/m2 e 25ºC, respectivamente.

Figura 26 - Erro apresentado no ponto de máxima potência e característica oscilatória do emulador.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

É possível perceber que a característica de corrente do arranjo é emulada de forma satisfatória. Durante a maior parte do período de avaliação, o conversor consegue excursionar a curva, considerando a variação nos valores de tensão. Entretanto, no ponto de máxima potência, chamado de “joelho da curva” é quando acontece o maior desvio dos valores de corrente e consequentemente de potência.

6.2 Avaliação dos métodos MPPT

Para avaliar os métodos MPPT e o funcionamento destes com o emulador proposto, foi analisado inicialmente o método P&O fazendo uso da resposta de um módulo fotovoltaico disponível na biblioteca do *Simulink* e também da resposta do emulador. Ambas foram comparadas considerando variações típicas de temperatura e irradiância ao longo do dia. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

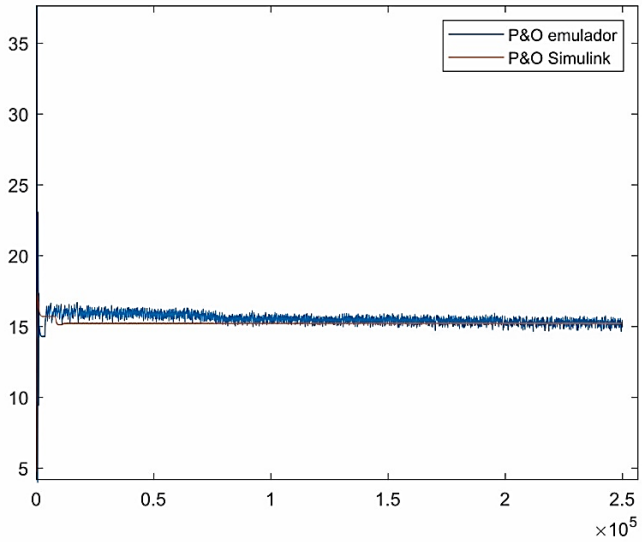
Tabela 5 - Comparação entre P&O com módulo do *Simulink* e emulador.

Irradiância (W/m2)	Temperatura (ºC)	Vmpp Simulink (V)	Vmpp Emulador (V)
1000	25	17,9	18,3
1000	50	16,1	16,8
1000	60	15,1	15,7
800	25	18,2	18,5
800	50	15,9	16,3
800	60	15,3	15,4
600	25	18,2	18
600	50	16,2	16,5
600	60	15	15,7
400	25	20,3	20,6
400	50	16	16,4
400	60	15,6	16

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

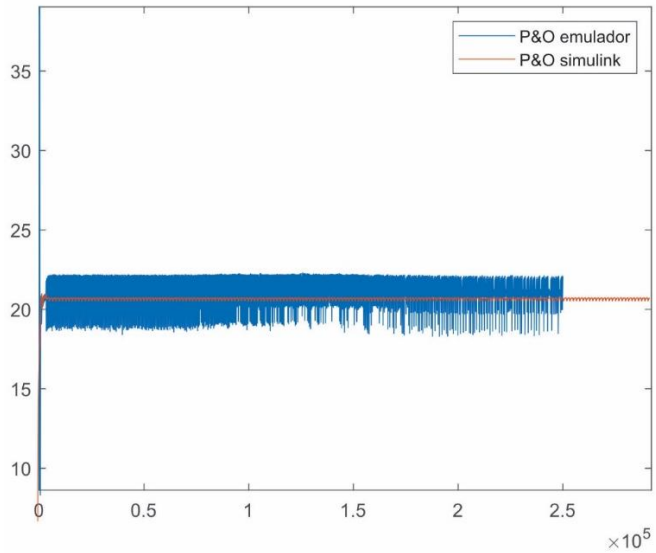
As respostas para condições de operações mais críticas (menor irradiância e maior temperatura) são apresentadas nas Figuras 27 e 28, que ilustram exemplos para irradiância de 1000W/m2 e 60ºC e irradiância de 400W/m2 e 25ºC, respectivamente.

Figura 27 - P&O para 1000W/m2 de irradiância e 60ºC de temperatura.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 28 - P&O para 400W/m2 de irradiância e 25ºC de temperatura.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Foi possível constatar altos valores oscilatórios a partir do método P&O, tendo em vista que, para se obter o ponto de máxima potência, foi realizado o controle da razão cíclica de um conversor *Boost*, o que provoca oscilação no sistema, não havendo um controle em malha fechada mais específico. Além disso, o funcionamento do emulador consiste na dependência da tensão de saída do mesmo, o que também irá influenciar o ajuste da corrente de saída e por consequência da própria tensão. O controlador PI presente no emulador minimiza os impactos das variações de pontos de operação, porém ainda há divergências. A própria característica oscilatória da curva de saída típica de conversores CC-CC (como apresentado na Figura 26) é outro contribuinte. Apesar das observações, foi possível identificar que a simulação considerando o emulador, teve êxito nos padrões apresentados de busca de métodos MPPT.

Considerando os pontos de operação críticos e as Figuras 27 e 28, considerando ainda o que observou Coelho (2008), o método P&O, apesar de ser eficiente, apresenta limitações para situações de baixa irradiância. Isso pode ser explicado pela Figura 21, mostrando que o conversor *Boost* possui uma região de rastreamento limitada.

É necessário também considerar as limitações de funcionamento do conversor *Boost*, que eleva a tensão de saída ao passo que reduz a corrente. Como para baixas irradiâncias a corrente máxima do emulador cai, nestas situações, o sistema atinge um limiar abaixo da queda de corrente possível para o conversor, considerando a carga ajustada. Para tanto, uma solução para

este problema seria a utilização de um conversor *Buck-Boost*, o qual garantiria o rastreamento de todas as regiões, conforme indicado por Nayak, Mohapatra e Mohanty (2017).

Considerando por fim o modelo Vmax1Ord, a Tabela 6 apresenta os valores de tensão na busca pelo MPPT, valendo do método em questão.

Tabela 6 - Resumos dos valores obtidos para o método Vmax1Ord.

Irradiância (W/m2)	Temperatura (ºC)	Vmppt (V)	Erro (%)
1000	25	18	3,6
1000	50	15,99	1,71
1000	60	15,2	0,93
800	25	18,02	4,28
800	50	16,01	2,37
800	60	15,21	1,54
600	25	18,01	4,83
600	50	15,97	2,77
600	60	15,17	1,95
400	25	18,27	7,22
400	50	15,84	2,86
400	60	15,04	2,04

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Comparando os valores da Tabela 6 com os valores teóricos indicados na Tabela 3 é possível identificar um pequeno erro entre os valores, menores que 7,3%. Tais diferenças também podem ser justificadas pela forma funcional do emulador, como já citado anteriormente, a fonte chaveada apresenta características ondulatórias que podem alterar a percepção de ponto máximo, além de que como discutido na sessão 6.1, para o ponto de máxima potência é onde ocorre maior diferença entre o conversor *Buck* e o modelo matemático, contribuindo ainda mais para um pequeno erro nos valores encontrados.

Para tanto, como forma de se obter um resultado mais fidedigno com o modelo implementado, das curvas P-V apresentadas no item 6.1 foram extraídos os pontos de máxima potência para

fim de comparações nos valores de tensões obtidos, conforme Figura 24. Nesta comparação, todos os valores apresentaram erro menor que 3% considerando o método Vmax1Ord.

Para fins de comparação dos métodos P&O e Vmax1Ord, utilizou-se de todos os resultados dos pontos de máxima potência obtidos anteriormente, para obter a potência de saída dos módulos (ou do emulador) nas situações consideradas. Ao comparar com a potência teórica o método Vmax1Ord apresentou resultados com erro máximo de 5%. Para os métodos de P&O, o erro máximo foi de 8%, exceto para condições de baixa irradiância, onde o erro obtido chegou próximo a 11% para irradiância de 400W/m2 e 60ºC de temperatura.

Sendo assim, diante do que foi discutido nesta seção, é possível afirmar que o método P&O apresenta resultados satisfatórios para condições em que não envolva baixa irradiância, principalmente se for levado em considerações sua baixa complexidade de implementação. Todavia, o método Vmax1Ord obteve resultados mais satisfatórios, se mostrando uma solução mais robusta. Apesar de depender de uma medição que informe o valor de irradiância e temperatura, sua implementação é ainda mais simples que a do P&O, uma vez que não depende necessariamente de outro conversor para ajuste de ponto de operação, ou do tempo de simulação. Como o objetivo do trabalho é avaliar as técnicas MPPT para uso em conjunto com um emulador, os valores necessários como entrada para o método são facilmente obtidos.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentada uma comparação entre técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos, utilizando de simulações computacionais que emula um sistema de geração fotovoltaica.

A fim de alcançar os objetivos propostos, durante o desenvolvimento do trabalho, foi projetado um conversor *Buck* em conjunto com um modelo matemático de primeira ordem a fim de emular a saída de um painel fotovoltaico. Após isso, foram analisados e simulados computacionalmente os métodos de MPPT: P&O e Vmax1ord. Os resultados foram analisados de modo a obter uma comparação entre eles nos quesitos tempo para rastreamento e potência atingida.

Para implementação do Perturba e Observa foi projetado o conversor *Boost* chaveado a fim de que a razão cíclica de saída do P&O ajustasse a frequência de chaveamento do conversor para se obter o ponto de máxima potência. Já o Vmax1ord consiste em um modelo matemático que calcula qual valor de tensão é capaz de garantir a máxima potência.

A técnica Vmax1ord apresentou maior eficiência quanto ao valor atingido e menor tempo de rastreamento para todos os casos de temperatura e irradiação. Além disso, para variações abruptas o método P&O apresenta baixo desempenho por depender do tempo de simulação para encontro da razão cíclica correta.

Posto que os sistemas de geração fotovoltaica apresentam baixa eficiência se comparadas a outras formas de geração, é importante que se garanta o fornecimento de máxima potência para cada condição de operação. Dessa forma, o rastreamento do ponto de máxima potência se faz fortemente necessário nesse contexto. A comparação da eficiência de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência pode contribuir significativamente para a escolha do método utilizado em um sistema solar real.

Dessa forma, através da realização de estudos e trabalhos voltados para a evolução de técnicas que podem contribuir com a eficiência em painéis fotovoltaicos, a utilização e expansão de geração fotovoltaica será capaz de se tornar mais favorável em termos de rendimento e custo-

benefício, possibilitando a substituição de forma gradativa de outras fontes não renováveis de geração de energia elétrica, ou que apresentem efeitos superiores no meio ambiente.

Como sugestão para possíveis trabalhos futuros na mesma área de pesquisa abordada, pode-se citar: realizar a implementação física do projeto; utilizar o Perturba e Observa pelo controle de tensão; utilizar outras técnicas de MPPT; implementar a emulação de característica de sombreamento para avaliação do ponto de máxima potência local e global; realizar análise de outras topologias de conversores CC-CC para rastreamento do ponto de máxima potência em um sistema fotovoltaico, como por exemplo o conversor *Buck-Boost*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL. **Energia Renovável e Empregos:** Revisão Anual 2020. IRENA, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/Key_Findings_Jobs_Review_2020_PT.pdf?la=en&hash=AFF67A19AD9C477A47FCFEC4AC3F37E60E421C01. Acesso em: 29 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relação de empreendimentos de Geração Distribuída**. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida/resource/3fabb9e8-668a-4f94-8f0e-ed9cd2682979. Acesso em: 20 maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **ABSOLAR aponta crescimento de fonte solar e subida de posições no ranking internacional**. São Paulo, SP: ABSOLAR, 2022. Disponível em: https://www.absolar.org.br/noticia/absolar-aponta-crescimento-de-fonte-solar-e-subida-de-posicoes-no-ranking-internacional/. Acesso em: 26 maio 2022.

CHAN, P. W.; MASRI, S. DC-DC boost converter with constant output voltage for grid connected photovoltaic application system. *In*: Industrial Electronic Seminar. ***Proceedings* [...].** 2010. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/12342408.pdf. Acesso em: 01 ago. 2022.

COELHO, R. F. Estudos dos conversores *Buck* e *Boost* aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COSTA, W. T. da. **Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

DAYARAMANI, R.; BHARADWAJ, S. K.; GAWRE, S. K. **Simulation and Designing of MPPT Based Solar PV System with DC-DC Boost Converter**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320258427_Simulation_and_Designing_of_MPPT_Based_Solar_PV_System_with_DC-DC_Boost_Converter/citation/download. Acesso em: 02 ago. 2022.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Eletronics**. [S.l.: s.n.], 2006. ISSN 1098-6596. ISBN 9789350245262.

EXAME. **Energia solar fotovoltaica: Brasil é o 4º país que mais cresceu em 2021.** São Paulo, SP: EXAME, 2022. Disponível em: https://exame.com/esg/energia-solar-fotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/. Acesso em: 25 maio 2022.

FAHAD, S.; MAHDI, A. J.; TANG, W. H.; HUANG, K.; LIU, Y. Particle swarm optimization based dc-link voltage control for two stage grid connected pv inverter. *In*: 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). ***Proceedings* [...]**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330595605_Particle_Swarm_Optimization_Based_DC-Link_Voltage_Control_for_Two_Stage_Grid_Connected_PV_Inverter. Acesso em: 25 jul. 2022.

GOVERNO DO BRASIL. **Bandeira verde na conta de luz deve permanecer até o final do ano**. Brasília, DF: GOV, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/04/bandeira-verde-na-conta-de-luz-deve-permanecer-ate-o-final-do-ano#:~:text=A%20bandeira%20Escassez%20H%C3%ADdrica%20tem,%C3%A9%20preciso%20acionar%20as%20termel%C3%A9tricas. Acesso em: 22 maio 2022.

HERINGER, N. M. F. **Modelagem de arranjo fotovoltaico com sombreamento parcial para referência de emuladores estáticos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

HUSSEIN, A. H.; MAHDI, J. A.; WAHHAB, T. M. **Design of a Boost Converter with MPPT Algorithm for a PV Generator Under Extreme Operating Conditions**. 2021. *Engineering and Technology Journal*, 1473-1480. doi: 10.30684/etj.v39i10.1888

ISHAQUE, K.; SALAM, Z.; LAUSS, G.; **The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions**. 2014. Appl. Energy 119. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.054. Acesso em: 20 jul. 2022.

KAZIMIERCZUK, M. K. **Pulse-width modulated DC-DC power converters**. John Wiley & Sons, 2015.

KYOCERA. KC50T -Módulo Policristalino de Alta Eficiência. 2008.

KJÆR, S. B. **Design and control of an inverter for photovoltaic applications**. Institute of Energy Technology, Aalborg University, 2005. Disponível em: https://etj.uotechnology.edu.iq/pdf_169765_a1eeee6c72218877297ed98131b219ee.html. Acesso em: 10 jul. 2022.

LOBATO, S. D. C. **Análise comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental**. Trabalho de Conclusão de Curso (Título de bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

MAGNO, L. C. C.; DA SILVA, T. M. F.; SILVA, P. L. C.; CRUZ, F. C.; FREITAS, R. R. Q.; GOMES, A. C. **Emulador fotovoltaico de baixo custo, a partir de um conversor buck, empregando regulador linear quadrático com MPPT e P&O**. Congresso Brasileiro de Automática. 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/253/217. Acesso em: 15 jul. 2022.

MAHELA, O. P.; SHAIK, A. G**. Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems**, Renew. Sustain. Energy Rev., 68, 2017.

MAMUR, H.; AHISKA, R**. Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoeletric generators**, *Energy convers*. 2015.

MIDDLEBROOK, R. D.; SLOBODAN, C. **A general unified approach to modelling switching-converter power stages**. International Journal of Electronics, v. 42, n. 6, p. 521–550, 1977. ISSN 0020-7217.

MOTAHHIR, S.; HAMMOUMI, A.; GHZIZAL, A. **The Most Used MPPT Algorithms: Review and the Suitable Low-cost Embedded Board for Each Algorithm**. Journal of Cleaner Production, 118983. 2019. Disponível em: https://doi:10.1016/j.jclepro.2019.118983. Acesso em: 10 jul. 2022.

NAYAK, B.; MOHAPATRA, A.; MOHANTY, K. B**. Selection criteria of dc-dc converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking application**, *Cogent Eng.* 2017.

NETO, L. V. B. M. **Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de potência máxima para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica**. Rio de Janeiro, RJ: ONS, 2021. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim%20Mensal%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Solar%202021-08.pdf. Acesso em: 20 maio 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Carga e Geração**. Rio de Janeiro, RJ: ONS, 2022. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao. Acesso em: 22 maio 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CEPEL – CRESESB, Edição Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro, 2015.

POMILIO, J. A. **Topologias básicas de conversores CC-CC não-isolados**. Fontes Chaveadas. FEEC – UNICAMP. Rio de Janeiro, 2014.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, C. E. **Metodologia Do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RASHEED, M.; SHIHAB, S.; RASHID, T. **Estimation of Single-Diode Model Parameters of PV Cell**. *Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics.* 2021.

SOLODOVNIK, E.; LIU, S.; DOUGAL, R. **Power Controller Design for Maximum Power Tracking in Solar Installations**. 2004. Power Electronics, IEEE Transactions on. 19. 1295 - 1304. 10.1109/TPEL.2004.833457. Acesso em: 25 jul. 2022.

Emitido em 24/08/2022

FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC Nº 1/2022 - GUA-CCTE (11.02.22.01.08.01.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 24/08/2022 21:16)
JULIO CESAR MADUREIRA SILVA
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
CAI-CCTE (11.02.18.01.08.02.09)
Matrícula: 1685247

(Assinado digitalmente em 24/08/2022 21:07)
NETALIANNE MITCHELLE FAGUNDES HERINGER
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
GUA-CCTE (11.02.22.01.08.01.04)
Matrícula: 2399211

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ifes.edu.br/documentos/ informando seu número: **1**, ano: **2022**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC**, data de emissão: **24/08/2022** e o código de verificação: **54376d1f30**