



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

ENGENHARIA DE ENERGIAS

INESSA GUILHERME MONTEIRO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MPPT PERTURBE
E OBSERVE APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UM
CONVERSOR *BOOST* DE ALTO GANHO**

REDENÇÃO

2021

INESSA GUILHERME MONTEIRO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MPPT PERTURBE E
OBSERVE APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UM
CONVERSOR *BOOST* DE ALTO GANHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
coordenação do curso de Engenharia de Energias da
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira como requisito parcial à obtenção do
título de graduação em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn

REDENÇÃO

2021

INESSA GUILHERME MONTEIRO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MPPT PERTURBE E
OBSERVE APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UM
CONVERSOR *BOOST* DE ALTO GANHO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

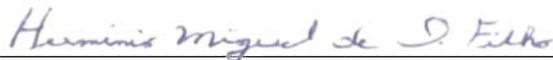
Aprovada em: 16 / 04 / 2021 .

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Profª Dra. Ranoyca Nayana Alencar Leão e Silva Aquino

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Monteiro, Inessa Guilherme.

M774d

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MPPT PERTURBE E OBSERVE APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UM CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO / Inessa Guilherme Monteiro. - Redenção, 2021. 57f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Gustavo Alves de Lima Henn.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Conversor boost de alto ganho. 3. Algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking). 4. Método perturbe e observe. I. Título

CE/UF/Dsibiuni

CDD 620.91

A Deus.

Aos meus pais, Tereza Maria e Antônio Jaime.

A todos os familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Gustavo Alves de Lima Henn pela exímia orientação, desempenhada com dedicação e paciência. Obrigada pelos esclarecimentos e incentivo durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao corpo docente e equipe do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Unilab, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação e conhecimento compartilhado ao longo dos anos do curso.

A todos os meus amigos e colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, por todas as trocas de experiências que me permitiram crescer não apenas como pessoa, mas também como formanda.

Ao meu amigo de vida pessoal e acadêmica Rodrigo do Nascimento Silva, pela ajuda e pelo incentivo em todos os momentos, que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado, pela amizade e pelo apoio que me foi dado ao longo tempo em que me dediquei a este trabalho.

À minha família, em especial à minha mãe, que não mede esforços para que eu me torne uma pessoa melhor a cada dia, pela referência de mulher forte e amor incondicional.

A Deus, pelo dom da vida, e por não ter deixado faltar saúde e determinação durante a realização deste trabalho. A Ele toda glória.

*“Sinto menos curiosidade pelas pessoas e
mais curiosidade pelas ideias.”*

(Marie Curie)

RESUMO

A investigação por ações que possibilitem a diversificação da matriz energética brasileira vem se tornando cada vez maior e as principais razões que ocasionam essa busca são a perspectiva do cenário de energia do país e a necessidade em explorar recursos renováveis para tornar o processo de geração de energia cada vez mais sustentável. Dessa forma, pode-se afirmar que a energia solar fotovoltaica surge como uma opção bastante atrativa e que sua utilização já vem crescendo nos últimos anos. Diante disso, o presente trabalho busca apresentar a avaliação do algoritmo MPPT P&O aplicado a um conversor CC-CC *boost* de alto ganho conectado a um sistema fotovoltaico. É realizado o dimensionamento do conversor e o desenvolvimento do algoritmo, que visa maximizar a produção do sistema por meio do rastreamento do ponto de máxima potência de operação. Como principais vantagens, tem-se a obtenção do alto ganho de tensão com o conversor utilizado e a simples implementação do algoritmo P&O no rastreamento do MPP. São apresentados o princípio de funcionamento do conversor e do método P&O, bem como equações e formas de ondas obtidas por meio de simulação para que possam ser analisados os desempenhos estáticos e dinâmicos das variáveis do sistema e, por conseguinte, validada a abordagem teórica realizada ao longo do trabalho. Foi avaliado o comportamento dinâmico do sistema para diferentes valores de incremento ou decréscimo aplicados à tensão de referência a fim de comparar a variação de potência no painel e o tempo de estabilização do algoritmo MPPT para variações de radiação, temperatura e carga, onde verificou-se um melhor desempenho para o valor de 0,075V, com resultados mais satisfatórios em relação aos demais valores estudados.

Palavras-chave: conversor *boost* de alto ganho. algoritmo MPPT. método perturbe e observe. sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

The investigation for actions that make possible the diversification of the Brazilian energy matrix is becoming more often and the main reasons that cause this search are the perspective of the country's energy scenario and the need to explore renewable resources to make the generation energy process every time more sustainable. Thus, it can be said that photovoltaic solar energy appears as an option contemplated and that its use has been growing in recent years. Therefore, the present work seeks to present an evaluation of the MPPT P&O algorithm applied to a high gain CC-CC boost converter connected to a photovoltaic system. The dimensioning of the converter and the development of the algorithm are carried out, which aims to maximize the production of the system by tracking the point of maximum operating power. As main advantages, there is the obtaining of high voltage gain with the converter used and a simple implementation of the P&O algorithm in the tracking of the MPP. The working principle of the converter and the P&O method are a principle, as well as equations and waveforms overcome by means of simulation to result in the static and dynamic performances of the system variables and, consequently, the theoretical approach carried out is validated. throughout work. The dynamic behavior of the system was evaluated for different values of increase or decrease relative to the reference voltage in order to compare the power variation in the panel and the stabilization time of the MPPT algorithm for variations in radiation, temperature and load, where there was a better performance for the value of 0.075V, with more satisfactory results compared to the other studied values.

Keywords: high gain boost converter. MPPT algorithm. method disturb and observe. photovoltaic system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Célula de acoplamento magnético	19
Figura 2.2	– Topologia do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	19
Figura 2.3	– Primeira etapa de operação do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	20
Figura 2.4	– Segunda etapa de operação do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	20
Figura 2.5	– Terceira etapa de operação do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	21
Figura 2.6	– Quarta etapa de operação do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	21
Figura 2.7	– Variação do ganho estático G em função da razão cíclica D	23
Figura 3.1	– Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do MPPT.....	24
Figura 3.2	– Possíveis casos para a potência em um painel fotovoltaico.....	25
Figura 3.3	– Fluxograma de funcionamento do algoritmo P&O.....	26
Figura 3.4	– Janela da ferramenta <i>Simplified C Block</i>	27
Figura 3.5	– Declaração das variáveis do algoritmo P&O.....	28
Figura 3.6	– Atuação das variáveis n e Z do algoritmo P&O.....	29
Figura 3.7	– Algoritmo P&O.....	30
Figura 3.8	– Análise dos valores de potência de saída antigo e atual – situação 1.....	31
Figura 3.9	– Análise dos valores de potência de saída antigo e atual – situação 2.....	31
Figura 3.10	– Conclusão do algoritmo P&O.....	32
Figura 4.1	– Conversor <i>boost</i> de alto ganho ligado a um sistema fotovoltaico.....	33
Figura 4.2	– Ferramenta <i>Solar Module (physical model)</i>	34
Figura 4.3	– Janela da ferramenta <i>Solar Module (physical model)</i>	34
Figura 4.4	– Circuito de controle.....	35
Figura 4.5	– Formas de onda de tensão e corrente de entrada e de tensão de saída.....	38

Figura 4.6	– Formas de onda das tensões das portadoras e de referência e pulsos nas chaves S_1 e S_2 e formas de onda da corrente no enrolamento primário dos indutores L_{B1} e L_{B2}	40
Figura 4.7	– Formas de onda de tensão sobre os capacitores C_F , C_{F1} e C_{F2}	41
Figura 4.8	– Operação do <i>soft-start</i>	42
Figura 4.9	– Visão geral da forma de onda da tensão de referência.....	42
Figura 4.10	– Forma de onda da tensão de referência em regime permanente.....	43
Figura 4.11	– Forma de onda da potência de saída do conversor.....	43
Figura 4.12	– Formas de onda da tensão de referência com temperatura constante e radiação inicial em 1000W/m^2 e <i>step</i> em 800W/m^2	45
Figura 4.13	– Formas de onda da tensão de referência com temperatura constante e radiação inicial em 1000W/m^2 e <i>step</i> em 600W/m^2	46
Figura 4.14	– Formas de onda da tensão de referência com radiação constante e temperatura inicial em 25°C e <i>step</i> em 0°C	47
Figura 4.15	– Formas de onda da tensão de referência com radiação constante e temperatura inicial em 25°C e <i>step</i> em 50°C	48
Figura 4.16	– Formas de onda da tensão de referência com variação de carga.....	49
Figura 4.17	– Formas de onda da potência no painel com degrau de carga.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações para o projeto do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	37
Tabela 4.2 – Parâmetros do conversor <i>boost</i> de alto ganho.....	37
Tabela 4.3 – Análise comparativa dos valores teóricos e de simulação.....	41
Tabela 4.4 – Variações de potência em relação com a variação aplicada à tensão de referência.....	44
Tabela 4.5 – Tempo de estabilização para os ensaios de variação de radiação (temperatura constante).....	44
Tabela 4.6 – Tempo de estabilização para os ensaios de variação de temperatura (radiação constante).....	46
Tabela 4.7 – Tempo de estabilização para os ensaios de degrau de carga.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	Perturbe e Observe
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{MPP}	Tensão no ponto de máxima potência	Volt
I_{MPP}	Corrente no ponto de máxima potência	Àmpere
P_{MPP}	Potência no ponto de máxima potência	Watt
P_i	Potência de entrada	Watt
η	Rendimento	
ΔV_C	Ondulação de tensão no capacitor	Volt
Δi_L	Ondulação de corrente no indutor	Àmpere
V_o	Tensão de saída	Volt
I_o	Corrente de saída	Àmpere
P_o	Potência de saída	Watt
f_s	Frequência de chaveamento	Hertz
n	Relação de transformação	
L_{B1}	Valor da indutância primária do indutor L1	Henry
L_{B2}	Valor da indutância primária do indutor L2	Henry
L_1	Valor da indutância secundária do indutor L1	Henry
L_2	Valor da indutância secundária do indutor L2	Henry
I_{LB1}	Valor da corrente no indutor L1	Àmpere
I_{LB2}	Valor da corrente no indutor L2	Àmpere
C_F	Valor de capacitância do capacitor CF	Farad
C_{F1}	Valor de capacitância do capacitor CF1	Farad
C_{F2}	Valor de capacitância do capacitor CF2	Farad
V_{CF}	Tensão sobre o capacitor CF	Volt
V_{CF1}	Tensão sobre o capacitor CF1	Volt
V_{CF2}	Tensão sobre o capacitor CF2	Volt
R	Valor da resistência de carga	Ohm
D	Razão Cíclica	
ΔP	Varição de potência	Watt
ΔV	Varição de tensão	Volt
ΔT	Varição de tempo	Segundos

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2 CONVERSOR <i>BOOST</i> DE ALTO GANHO	18
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 TOPOLOGIA	18
2.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO	19
2.3.1 Primeira etapa	20
2.3.2 Segunda etapa	20
2.3.3 Terceira etapa	21
2.3.4 Quarta etapa	21
2.4 GANHO ESTÁTICO DO CONVERSOR	21
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
3 MPPT PERTURBE E OBSERVE (P&O) E IMPLEMENTAÇÃO NO PSIM	24
3.1 MPPT PERTURBE E OBSERVE (P&O).....	24
3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO P&O	26
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
4 PROJETO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	33
4.1 INTRODUÇÃO.....	33
4.2 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BOOST</i> DE ALTO GANHO.....	35
4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO CONVERSOR <i>BOOST</i> DE ALTO GANHO ...	38
4.4 DESEMPENHO ESTÁTICO DO ALGORITMO PROJETADO	41
4.5 DESEMPENHO DINÂMICO DO ALGORITMO PROJETADO	43
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5 CONCLUSÃO GERAL	53
REFERÊNCIAS	55

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

A energia é considerada uma variável capaz de apontar o desenvolvimento de um país, visto que está ligada diretamente ao crescimento econômico e social através do suporte mecânico, térmico e elétrico fornecido às atividades humanas. Esse atributo torna o setor energético bastante complexo, sendo necessário que haja desenvolvimento tecnológico com o objetivo de tornar o sistema cada vez mais eficiente e de qualidade, mas que também exista uma ação de caráter social com o objetivo de ampliar o acesso às fontes de energia (ANEEL, 2008). Além disso, o cenário atual dispõe de fatores que torna indispensável a busca pelo desenvolvimento e utilização de novas fontes de energia que sejam menos poluentes, renováveis e causem pouco impacto ambiental, tais como o aumento da demanda energética e a crescente preocupação com preservação do meio ambiente. Dentre as fontes renováveis, tem-se a radiação solar, estabelecendo uma opção limpa e renovável de produção de energia (MARTINS et al, 2004).

Extraída da conversão da radiação solar em energia elétrica por meio de materiais semicondutores, a energia solar fotovoltaica é considerada uma tecnologia com um futuro promissor (KEMERICH et al., 2016) e sua utilização apresenta inúmeras vantagens. Dentre elas tem-se a necessidade mínima de manutenção do sistema, viabilidade de aplicação em lugares remotos, ou de difícil acesso, e o processo de conversão de energia totalmente limpo, além dos painéis fotovoltaicos com potencialidade cada vez mais elevada e custos menores. É possível também que a energia solar fotovoltaica colabore na diminuição da perda energética durante a etapa de transmissão, visto que pode contribuir para a demanda de energia em localidades distantes dos centros de produção (COUTINHO, 2015).

Em contrapartida, também existem algumas desvantagens. O fato de não haver produção de energia no período da noite faz com que seja necessária a existência de um sistema auxiliar de energia estabelecido para suprir a demanda do local ou de meios de armazenamento de energia, sendo esses de custo elevado. Por depender diretamente da radiação incidente do Sol, locais que apresentam um grau considerável de nebulosidade ou que se encontram em latitudes médias e altas tendem a apresentar variações abruptas na produção de energia no decorrer do dia ou durante os meses de inverno, respectivamente. Ademais, ainda que estejam em declínio, os preços desse meio ainda são considerados elevados (COUTINHO, 2015).

Segundo dados da ABSOLAR, a energia solar fotovoltaica apresentou uma evolução de mais de 800% desde 2012, apresentando atualmente 8,4 GW de potência operacional instalada no país. No que diz respeito à geração centralizada, o Brasil possui um

montante previsto em 25,8 bilhões de reais em investimentos nos próximos cinco anos referentes aos projetos já contratados em leilão, estimando o aditamento de uma potência operacional de 4,6 GW ao fim desse período. Já no segmento da geração distribuída, a energia solar fotovoltaica lidera com 94,7% da potência instalada, com mais de 267 mil de sistemas solares fotovoltaicos de microgeração e minigeração distribuída implantados e conectados à rede (ANEEL/ABSOLAR, 2021).

A nível global, a participação da energia solar fotovoltaica na geração de eletricidade é de quase 3%, após atingir a marca de 720TWh no ano de 2019. Com isso, a fonte tornou-se a terceira maior tecnologia de eletricidade renovável, ultrapassando a bioenergia (IEA, 2020).

Diante de números tão expressivos, é notável que o uso da energia solar exibe muitos atrativos. Todavia, ainda existem alguns elementos que devem ser considerados para que uma residência, por exemplo, receba alimentação de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico. Devido à baixa tensão produzida nos terminais dos painéis, é comum que a tensão fornecida por esses equipamentos necessite ser elevada com o intuito de gerar um barramento CC entre 200V e 400V, para promover a alimentação dos inversores. Em vista dessa demanda de um alto ganho de tensão, o conversor *boost* convencional ainda é inapropriado, pois possui uma limitação quanto ao ciclo de trabalho, apresentando instabilidade para o circuito em valores acima de 90%. Uma solução para esse problema seria a utilização de um conversor *boost* de alto ganho. Assim, neste trabalho será utilizada a topologia do conversor *boost* de alto ganho desenvolvida por Henn (2008), com o circuito controlado por meio de um MPPT (*Maximum Power Point Tracking*, ou Rastreamento de Ponto Máxima Potência) (HENN, 2008) e (PRACA et al., 2013).

Os métodos de MPPT são divididos em duas categorias: indiretos e diretos. Os métodos indiretos necessitam que haja um conhecimento preliminar de características físicas do módulo. Essa particularidade faz com que tais métodos sejam mais limitados, já que a determinação do MPP (*Maximum Power Point* - Ponto de Máxima Potência) não pode ser executada para diferentes condições de operação. Aproximação da curva de potência, análise de tabela de pesquisa, observação de circuito aberto e observação de curto-circuito são alguns dos principais métodos indiretos.

Já nos métodos diretos, o seguimento da máxima potência é efetuado por meio da medição das variáveis de controle (tensão e corrente, e em alguns casos temperatura e irradiação), tornando dispensável a ciência das particularidades físicas do módulo, diferentemente dos métodos indiretos. Dessa forma, esses sistemas de seguidores da máxima

potência apresentam um maior grau de eficiência, admitindo uma maior aproximação do rendimento máximo do módulo fotovoltaico. Dentre os principais métodos, tem-se: condutância incremental, realimentação de tensão, realimentação de corrente, e perturbação e observação, sendo este o último uma das técnicas mais utilizadas por ser de fácil implementação e desempenhar seu papel de modo efetivo (BARRETO, 2014).

Nesta perspectiva, o presente trabalho tem como finalidade analisar a atuação do método de MPPT direto do tipo “perturbe e observe” no conversor *boost* de alto ganho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o funcionamento do método de MPPT “perturbe e observe” aplicado a um sistema fotovoltaico ligado a um conversor *boost* de alto ganho, além de verificar o desempenho desse sistema em termos estáticos e dinâmicos.

1.1.2 Objetivos específicos

- I. Projetar e desenvolver um conversor *boost* de alto ganho;
- II. Simular o conversor de alto ganho utilizando o *software PSIM*;
- III. Desenvolver um algoritmo para o rastreamento do ponto de máxima potência do conversor;
- IV. Aplicar, no *software PSIM*, o algoritmo MPPT desenvolvido a um sistema fotovoltaico ligado ao conversor *boost* de alto ganho;
- V. Realizar ensaios estáticos do sistema;
- VI. Realizar ensaios dinâmicos com variações de temperatura e radiação.

2 CONVERSOR *BOOST* DE ALTO GANHO

2.1 INTRODUÇÃO

O estudo de conversores CC-CC com capacidade de fornecer ganhos estáticos elevados tornou-se bastante popular nos últimos anos, uma vez que é presente a necessidade de tais conversores nas mais diversas aplicações envolvendo fontes renováveis de energia. Os módulos fotovoltaicos, por exemplo, são caracterizados por oferecerem baixas tensões em seus terminais, o que exige o emprego de conversores CC-CC elevadores como uma das formas de atender as condições de barramento de tensão dos conversores CC-CA monofásicos comumente empregados na interligação com a rede elétrica comercial (SCHMITZ et al., 2019).

O conversor *boost* convencional, na teoria, possui ganho estático ilimitado quando a razão cíclica se aproxima do valor unitário. Na prática, entretanto, o ganho de tensão e a eficiência desse conversor são abruptamente reduzidos quando o mesmo opera com altos valores de razão cíclica. Essa redução deve-se principalmente ao aumento das perdas de condução nos componentes, causado pelo alto valor de pico das correntes. Nos últimos anos, como forma de solucionar esses problemas, a literatura vem apresentando diferentes propostas de conversores CC-CC baseadas no conversor *boost*, utilizando técnicas como cascadeamento, multiplicação de tensão e/ou acoplamento de indutores. Tais técnicas buscam, além de elevar o ganho estático do *boost* convencional, evitar a operação desses dispositivos na zona de razão cíclica elevada e diminuir o estresse de tensão nos semicondutores (SCHMITZ, 2015).

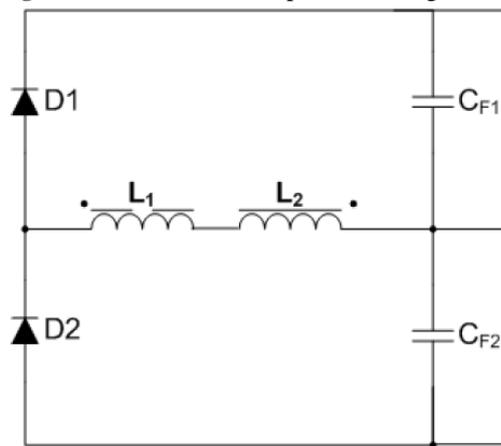
O aumento do ganho estático de tensão por meio do uso de indutores acoplados é realizado através do ajuste adequado da relação de transformação entre os enrolamentos. Apesar da semelhança superficial com os transformadores, que são utilizados para a transferência de potência e isolamento galvânico, esses elementos são aplicados, principalmente, para o armazenamento de energia durante uma parcela do ciclo de chaveamento (D) e liberação dessa energia no intervalo complementar ($1 - D$) (CARVALHO, 2018).

Desse modo, como forma de produzir um barramento de alta tensão por meio de painéis fotovoltaicos, no presente trabalho será utilizado um conversor *boost* de alto ganho, o qual será discutido com mais detalhes neste capítulo.

2.2 TOPOLOGIA

A partir de Henn et al. (2008) surge a topologia do conversor *boost* de alto ganho utilizada no presente trabalho. Todavia, com o objetivo de tornar o ganho ainda mais elevado, Henn (2008) adicionou uma célula de acoplamento magnético ao circuito citado anteriormente.

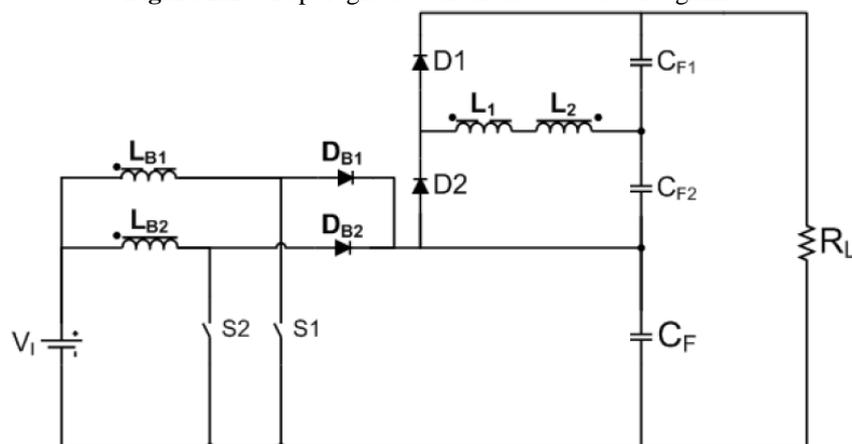
Figura 2.1 – Célula de acoplamento magnético.



Fonte: Henn (2008).

Desse modo, neste capítulo será apresentado o conversor de alto ganho com a topologia ilustrada na figura 2.2. Por meio dessa figura é possível reconhecer que o conversor dispõe de um arranjo com dois conversores *boost* entrelaçados – denominado *interleaved boost* – e de uma célula magnética mostrada na figura 2.1, resultando em uma tensão de saída mais alta. Vale ressaltar que os indutores L_1 e L_2 estão magneticamente acoplados a L_{B1} e L_{B2} , respectivamente.

Figura 2.2 – Topologia do conversor boost de alto ganho.



Fonte: Henn (2008).

2.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO

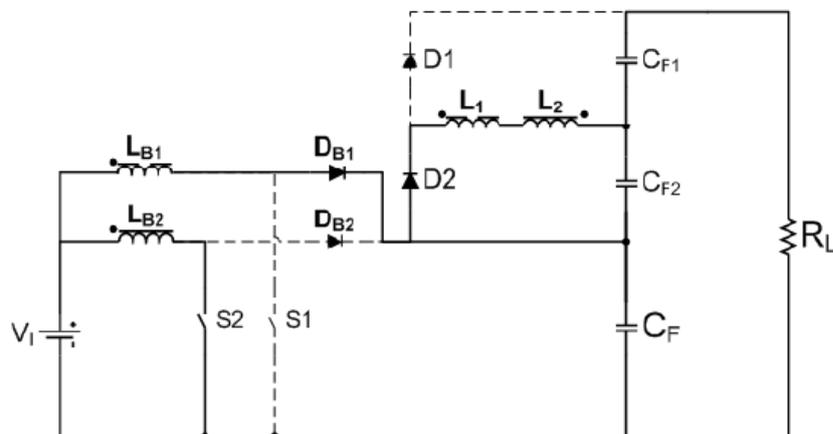
Nesse tópico do capítulo serão analisadas as etapas de operação do conversor em questão e, para isso, é essencial que sejam feitas algumas considerações prévias. Todos os elementos do circuito serão considerados ideais e o efeito da dispersão entre os dispositivos magneticamente acoplados será desprezado. É necessário também assumir que o conversor atua com valores de razão cíclica elevados, maiores que 50%, em cada uma de suas chaves, que se encontram defasadas em 180° elétricos, e que essas, anteriormente à primeira fase de operação,

estavam ligadas. Além disso, a relação de espiras entre os indutores L_{B1} e L_1 é equivalente à de L_{B2} e L_2 , evitando o desequilíbrio no conversor.

2.3.1 Primeira etapa

O início da primeira etapa se dá no instante t_0 e as chaves S_1 e S_2 encontram-se desligada e ligada, respectivamente. O indutor L_{B1} , carregado previamente, transfere a energia armazenada para o capacitor C_{F2} , como pode ser observado no circuito ilustrado na figura 2.3. Encerra-se essa etapa no instante t_1 com o acionamento da chave S_1 .

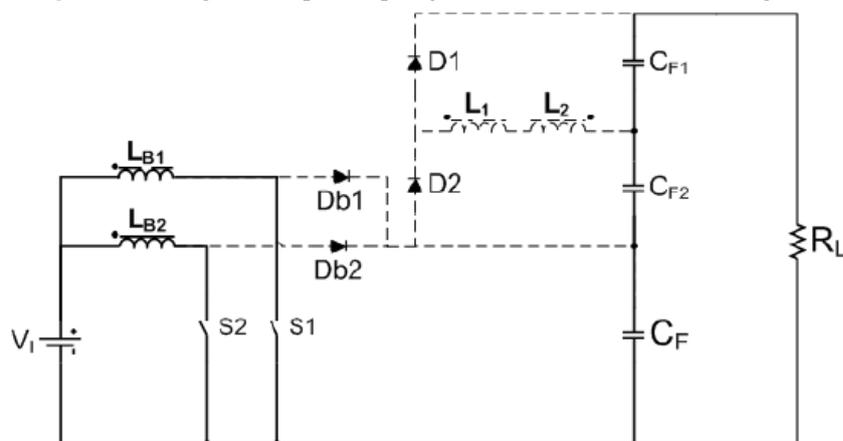
Figura 2.3 – Primeira etapa de operação do conversor *boost* de alto ganho.



Fonte: Henn (2008).

2.3.2 Segunda etapa

Figura 2.4 – Segunda etapa de operação do conversor *boost* de alto ganho.



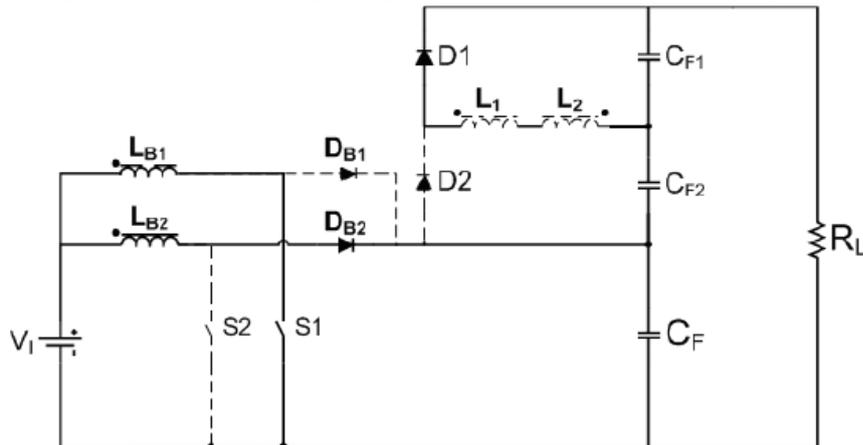
Fonte: Henn (2008).

A segunda etapa é iniciada no instante em que a chave S_1 é ligada no circuito (t_1). Nessa fase, o indutor L_{B1} será novamente alimentado e o indutor L_{B2} se mantém na disposição de armazenamento e não transferência de energia para a carga. O estágio é finalizado em t_2 com o desligamento de S_2 .

2.3.3 Terceira etapa

Iniciada no instante t_2 , com o desligamento da chave S_2 , a terceira etapa de operação do conversor conta com a transferência da energia armazenada no indutor L_{B2} para o capacitor C_{F1} . A etapa é finalizada no momento em que a chave S_2 é ligada novamente.

Figura 2.5 – Terceira etapa de operação do conversor *boost* de alto ganho.

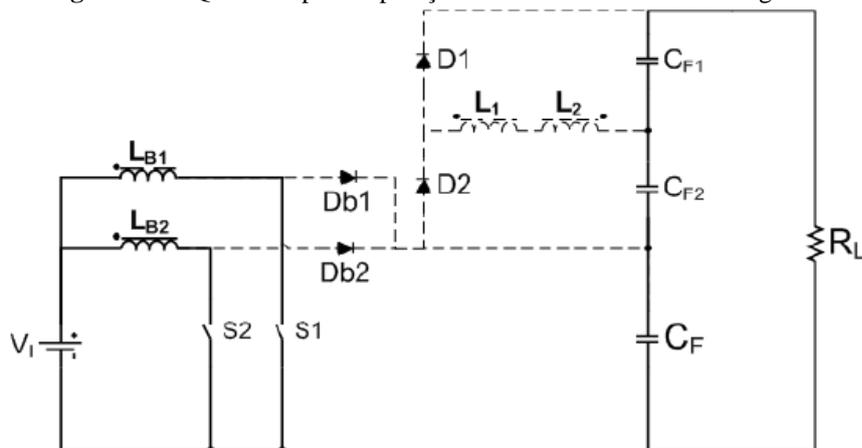


Fonte: Henn (2008).

2.3.4 Quarta etapa

A quarta etapa de operação se dá de forma análoga à segunda devido ao modo de condução em que as chaves S_1 e S_2 se encontram. Finalizado esse estágio, o acionamento da chave S_1 é realizado novamente, iniciando um novo ciclo de chaveamento no conversor.

Figura 2.6 – Quarta etapa de operação do conversor *boost* de alto ganho.



Fonte: Henn (2008).

2.4 GANHO ESTÁTICO DO CONVERSOR

O ganho estático de um conversor é dado pela relação entre a tensão de saída e a tensão entrada. A tensão de saída pode ser determinada por meio do somatório das tensões nos capacitores de saída C_F , C_{F1} e C_{F2} , como descrito na equação 2.1.

$$V_O = V_{CF} + V_{CF1} + V_{CF2} \quad (2.1)$$

Além disso, sabe-se que os indutores L_{B1} e L_{B2} devem apresentar tensão média nula durante um período de chaveamento, sendo assim estabelecida a tensão no capacitor C_F através da equação 2.3.

$$D \times V_i = (1 - D) \times (V_i - V_{CF}) \quad (2.2)$$

$$V_{CF} = V_i \times \frac{1}{(1-D)} \quad (2.3)$$

É possível obter a tensão no capacitor C_{F2} , que analogamente equivale a tensão no capacitor C_{F1} , por meio da análise da malha constituída pelos elementos L_1 , L_2 , D_2 e C_{F2} durante a primeira etapa de operação do conversor.

$$V_{CF2} = n \times [V_i - (V_i - V_{CF})] \quad (2.4)$$

$$V_{CF1} = V_{CF2} = V_i \times \frac{n}{(1-D)} \quad (2.5)$$

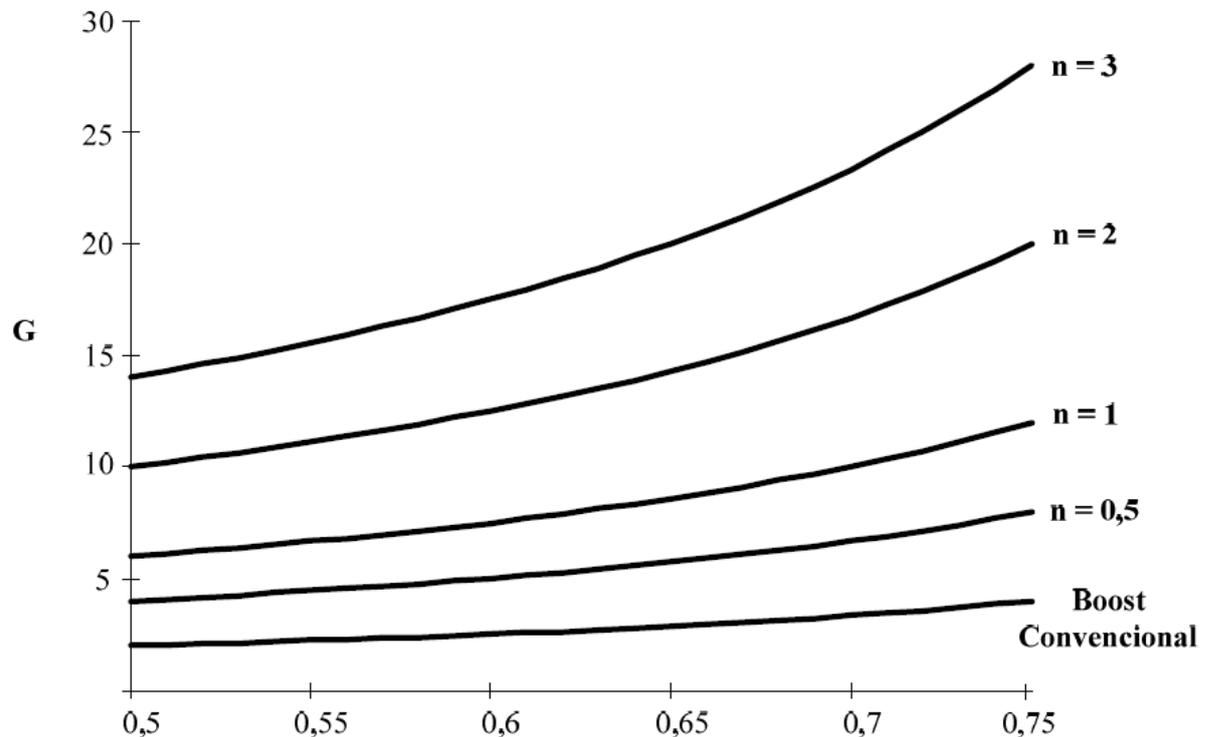
Desse modo, realizando as manipulações algébricas necessárias, Henn (2008) encontrou a equação do ganho estático do conversor, dada por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(2 \times n) + 1}{(1-D)} \quad (2.6)$$

O ganho estático depende da razão cíclica (D) e da relação de transformação (n), exibindo uma relação de proporcionalidade direta entre ambas as variáveis. É possível observar que o fato do ganho estático poder ser adequado através da relação de transformação entre os enrolamentos anula a necessidade de componentes adicionais ao circuito, mas também demanda que esse ajuste seja feito com prudência para evitar problemas físicos ou elétricos.

Na figura 2.7 pode-se observar o gráfico que descreve a comparação do ganho estático do conversor pela razão cíclica para diferentes valores da relação de transformação. O gráfico também indica o comportamento do ganho estático do conversor *boost* convencional, sendo esse indicado pela curva inferior na figura.

Figura 2.7 – Variação do ganho estático G em função da razão cíclica D .



Fonte: Henn (2008).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foi abordado o funcionamento do conversor *boost* de alto ganho, sendo analisados alguns pontos principais como topologia e etapas de operação.

Pode-se constatar que a principal vantagem na aplicação de indutores acoplados no conversor CC-CC é o alcance no aumento do ganho estático de tensão estabelecido em um valor adequado de razão cíclica, sendo essa elevação de tensão obtida por meio do ajuste na relação de transformação entre os enrolamentos.

Em contrapartida, a topologia apresentada exhibe desvantagens que devem ser levadas em consideração, como a operação da estrutura que deve apresentar um valor de razão cíclica superior a 50%. Além disso, utilização dos elementos magnéticos pode sujeitar a estrutura do equipamento a algum tipo de impasse em relação ao peso ou volume. Entretanto, esse não é o caso, pois os indutores possuem um tamanho relativamente pequeno, trabalhando em uma frequência de chaveamento bastante elevada quando comparada com a frequência de chaveamento do conversor.

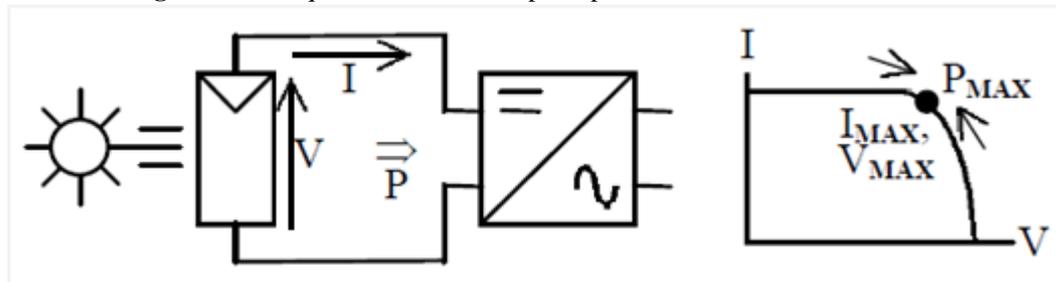
É possível considerar, dessa forma, que o conversor *boost* de alto ganho dispõe de atributos para tornar-se um recurso adequado e benéfico na elevação de tensão de sistemas que possam vir a ser compostos de painéis fotovoltaicos, por exemplo.

3 MPPT PERTUBE E OBSERVE (P&O) E IMPLEMENTAÇÃO NO PSIM

3.1 MPPT PERTUBE E OBSERVE (P&O)

O MPPT é realizado pela maioria das redes ligadas aos inversores fotovoltaicos e o seu princípio de funcionamento é baseado no ajuste da razão cíclica de operação do conversor conectado ao painel fotovoltaico, de modo que a potência a ser gerada seja a mais próxima possível do valor de potência máxima do sistema. O método Perturbe e Observe – P&O é um algoritmo direto, ou seja, utiliza as medições de tensão e corrente realizadas continuamente durante a operação do módulo para o cálculo do MPP – *Maximum Power Point*, reagindo às alterações nas condições operacionais do equipamento (JANTSCH et al, 1997).

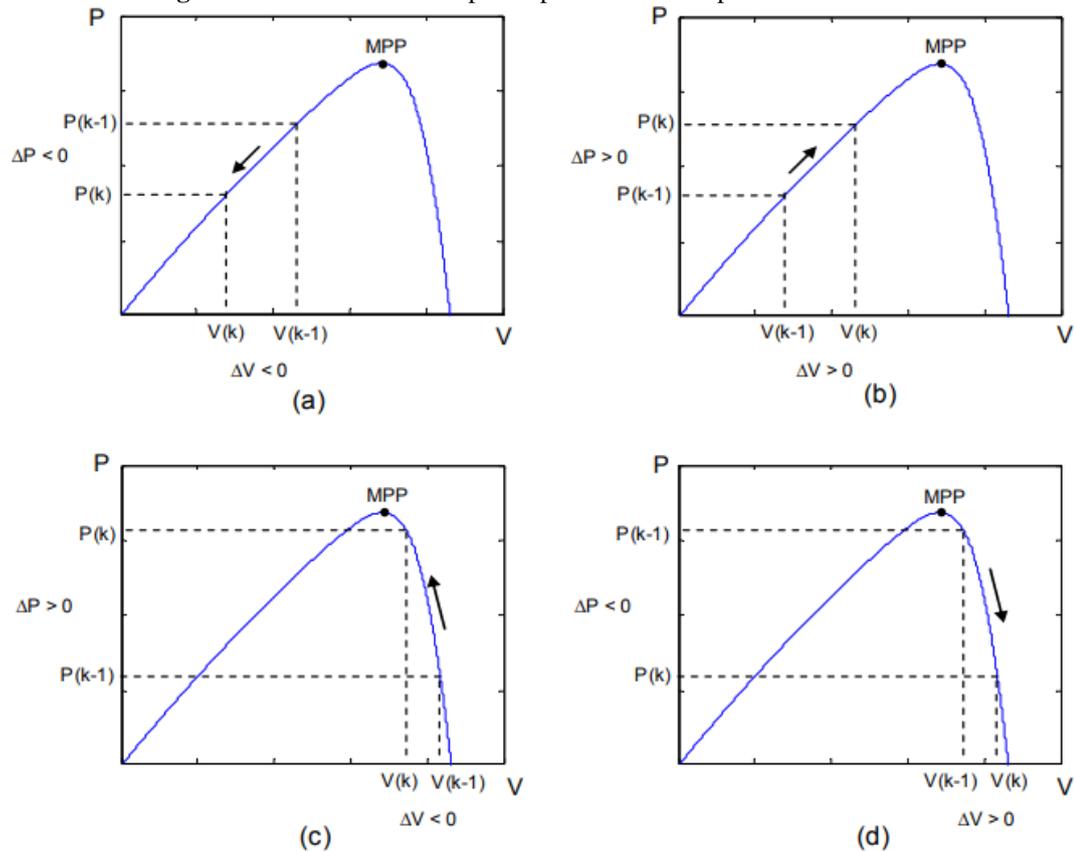
Figura 3.1 – Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do MPPT.



Fonte: JANTSCH et al (1997).

Como o próprio nome indica, esse algoritmo atua causando perturbações na tensão do sistema fotovoltaico (tensão de referência) em uma determinada direção para que possa ser observado o comportamento da potência de saída, visto que esse parâmetro será submetido a uma variação ocasionada por essa perturbação inicial. Com isso, por meio da análise do sinal da variação da potência de saída, é possível estabelecer se a variação na tensão de referência será mantida na mesma direção ($\Delta P > 0$) ou se terá a direção desse mecanismo invertida ($\Delta P < 0$). Esse processo é repetido constantemente, ou seja, a tensão do arranjo fotovoltaico é submetida a perturbações a todo instante, sendo possível notar que o sistema irá oscilar em pontos próximos do MPP. O fato é que essas oscilações não são atrativas devido à ocorrência do desperdício de energia disponibilizada pelos painéis. Todavia, tal fenômeno pode ser diminuído por meio da redução da magnitude da perturbação, sendo também importante atentar-se a essa redução, visto que perturbações muito pequenas podem acarretar em uma lentidão no rastreamento do MPP. (GOMES et al., 2016). A figura 3.2 mostra quatro casos possíveis de como pode ocorrer o andamento da potência em um arranjo fotovoltaico.

Figura 3.2 – Possíveis casos para a potência em um painel fotovoltaico.



Fonte: SEGUEL (2009).

Vale salientar também que, para a execução correta da técnica P&O, é necessário que os seguintes parâmetros sejam definidos: o período de amostragem e o tamanho da perturbação. O período de amostragem indica o instante de tempo em que a amostragem da tensão e corrente do módulo fotovoltaico é realizada e o tamanho da perturbação é o valor que será aplicado sobre a tensão de referência (ΔV) (SEGUEL, 2009).

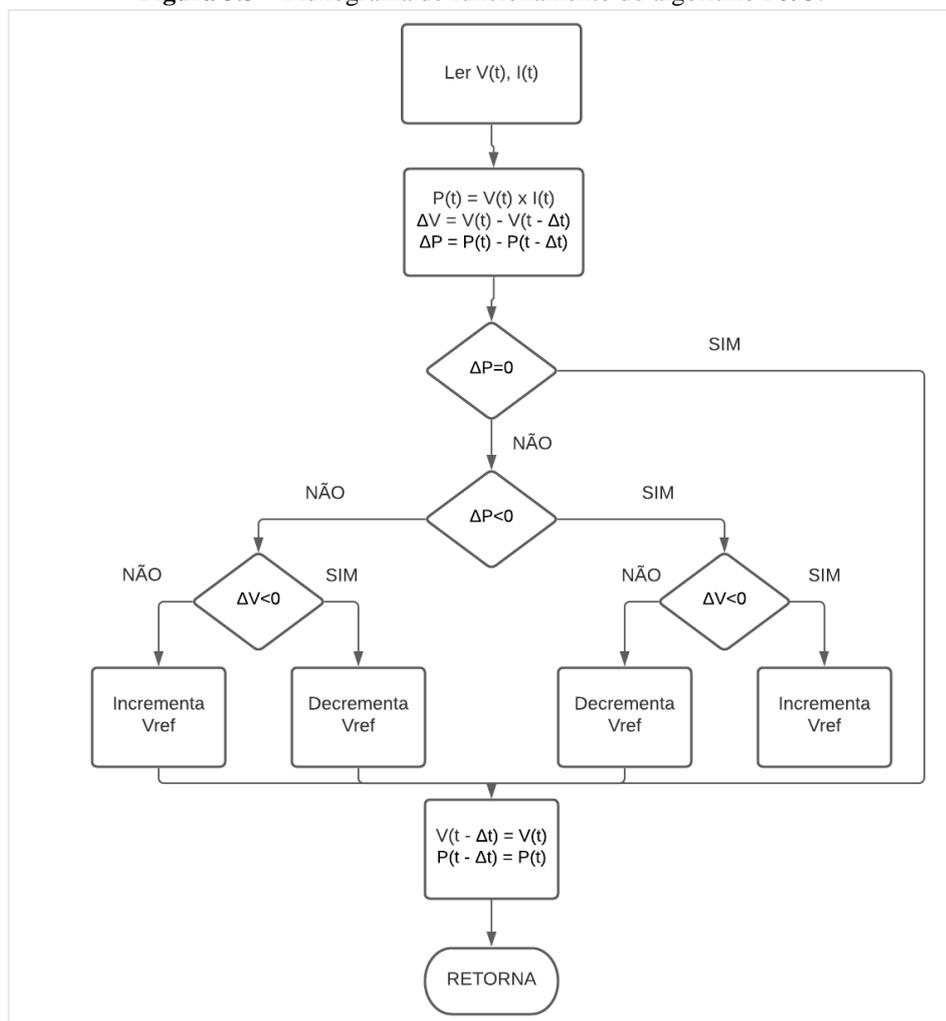
A determinação de um período de amostragem pequeno seria ideal, já que a detecção de modificações ambientais seria realizada de forma imediata pelo método, sendo possível rastrear o novo MPP em um tempo mais curto. Entretanto, há uma limitação para o valor mínimo que é estabelecida pela dinâmica do controle de tensão. Esse período deve ser superior ao tempo de estabilização da tensão do barramento para evitar questões de instabilidade da técnica MPPT (AZEVEDO, 2007).

Como desvantagens da técnica P&O destacam-se a difícil localização do MPP em baixos níveis de irradiação e a impossibilidade de determinação do momento em que esse ponto foi realmente atingido. Além disso, existe também a presença do erro em regime permanente, lenta resposta dinâmica e operação fora do MPP, na ocorrência de mudanças bruscas nas condições climáticas (GOMES et al., 2016).

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO P&O

Na seção anterior foi apresentado o funcionamento convencional do método P&O que, resumidamente, consiste no estímulo de variações na tensão terminal do módulo fotovoltaico com o objetivo de encontrar o ponto de máxima potência por meio da análise comparativa entre a potência final registrada ao fim do ciclo anterior com a do ciclo atual de operação (RICCI et al., 2015). A figura 3.3 ilustra o fluxograma do algoritmo P&O, onde $V(t)$ e $I(t)$ são as variáveis obtidas na iteração atual do algoritmo e $V(t-\Delta t)$ e $P(t-\Delta t)$ são os valores medidos na iteração anterior.

Figura 3.3 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo P&O.

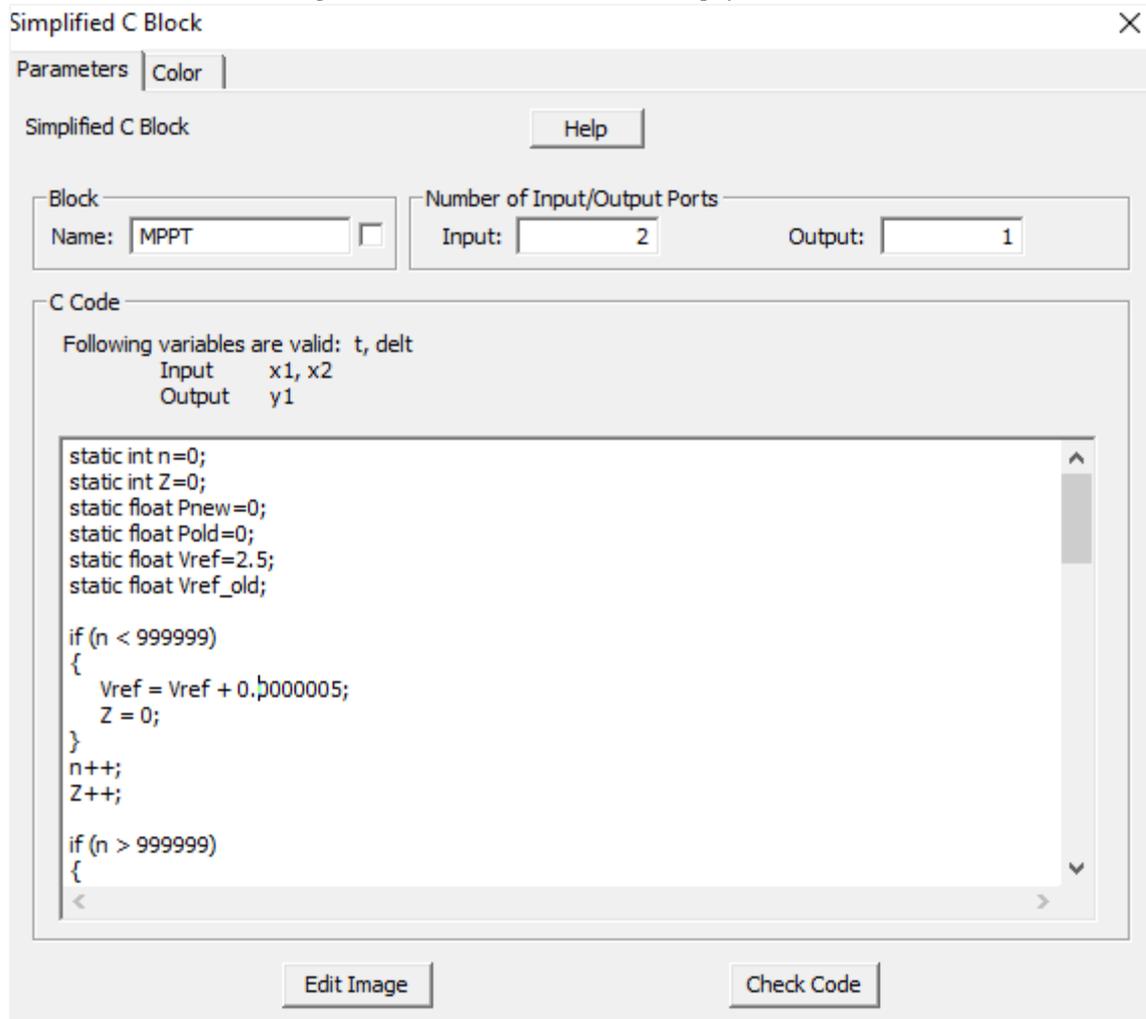


Fonte: Próprio autor (2021).

Desse modo, no presente trabalho foi empregado o algoritmo P&O, devido às suas atrativas características, como fácil entendimento e efetiva ação no rastreamento do ponto de máxima potência. A plataforma computacional utilizada para realizar as simulações foi a do *software* PSIM, que dispõe da ferramenta *Simplified C Block*, que possibilita construir algoritmos e testá-los em circuitos elétricos. Na Figura 3.4 é possível observar que a quantidade

de portas de entrada e saída do bloco podem ser inseridas pelo usuário, além dos campos para definição do nome do bloco e construção do código.

Figura 3.4 – Janela da ferramenta *Simplified C Block*.



Fonte: Próprio autor (2021).

O algoritmo foi desenvolvido e, para uma explanação mais prática, o mesmo será dividido em três etapas: declaração das variáveis, atuação das variáveis de controle de passo e análise comparativa dos valores de potência.

Inicialmente, fez-se necessário declarar as variáveis que seriam aplicadas ao longo do código, sendo elas: n, Z, Pnew, Pold, Vref e Vref_old. Os termos precedidos às variáveis apontam sua natureza, que são numerais inteiros ou com ponto flutuante (reais) e os índices new, old e ref indicam os valores novos, antigos e de referência dos parâmetros.

As variáveis declaradas como n e Z podem ser consideradas como variáveis de controle de passo do algoritmo, ou seja, elas serão as responsáveis por executar as repetições que estarão descritas no código, enquanto as condições designadas para elas forem verdadeiras.

Desse modo, seu mecanismo torna-se indispensável por restringir a frequência das iterações ao longo do algoritmo e determinar a taxa de amostragem dos valores de entrada do bloco.

As variáveis *Pnew* e *Pold* fazem referência aos valores de potências nova e antiga, que serão submetidas a comparação, ambas iniciando em zero. *Vref_old* e *Vref* são as variáveis das tensões de referência, antiga e atual respectivamente. A tensão de referência é iniciada em 2,5V, visto que o algoritmo foi construído para ser aplicado em um conversor *boost* de alto ganho, que deve necessariamente funcionar em um valor de razão cíclica superior a 50%, sendo 5V a tensão de pico na portadora de alta frequência que será aplicada no comparador juntamente com a saída do bloco.

Figura 3.5 – Declaração das variáveis do algoritmo P&O.

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

static int n=0;
static int Z=0;
static float Pnew=0;
static float Pold=0;
static float Vref=2.5;
static float Vref_old;

if (n < 999999)
{
    Vref = Vref + 0.0000005;
    Z = 0;
}
n++;
Z++;

if (n > 999999)
{

```

Fonte: Próprio autor (2021).

Com as variáveis apresentadas, é dada a continuidade do algoritmo com a atuação de *n* e *Z*. Essa etapa é responsável pelo controle do avanço da razão cíclica, que deve ocorrer de uma maneira controlada, funcionando como um *soft-start*. Conforme pode ser observado na figura 3.6, enquanto *n* apresentar um valor inferior a 999999, a tensão de referência deverá apresentar um comportamento linear, sendo acrescida no valor de $5 \times 10^{-7} \text{V}$ a cada iteração. É possível observar que, à medida que *n* é incrementada, a variável *Z* também segue em progresso, mas caso a variável *n* não tenha atingido o valor estipulado, ainda na mesma iteração o valor de *Z* retorna a zero. Esse processo é realizado dessa forma devido à diferença de atuação das variáveis *n* e *Z*. A variável *n* atua no controle inicial do funcionamento do algoritmo, sendo necessário envolver um maior número de iterações para a segurança de operação do conversor.

Já a variável Z atua no instante em que a operação do *soft-start* é finalizada, sendo a variável que vai indicar o intervalo de tempo em que os valores de entrada do bloco deverão ser lidos para o cálculo do valor de potência instantânea do sistema. Desse modo, até que Z atinja o valor de 39999, a variação na tensão de referência não será aplicada por meio da análise dos valores de potência. Vale ressaltar que tal valor estipulado a variável Z corresponde a 4ms, visto que o valor definido para o *time step* na ferramenta de controle de simulação, que determina o intervalo de tempo em que as iterações vão ocorrer, foi de 0,1 μ s. Além disso, o valor é importante para que o algoritmo seja apto a verificar mudanças efetivas na variação de corrente e de tensão produzida pelo painel e não seja induzido ao erro de realizar a leitura de um valor da ondulação de corrente nos indutores. Dessa forma, a definição do tempo de 4ms é suficiente para que o acréscimo ou decréscimo na tensão de referência, e, logo, na razão cíclica, incida em uma mudança no regime permanente de operação do conversor.

A partir do momento que as variáveis estiverem satisfazendo suas condições, a técnica de MPPT é iniciada, e a partir daí a variação a ser aplicada na tensão de referência será determinada após a comparação dos valores de potência.

Figura 3.6 – Atuação das variáveis n e Z do algoritmo P&O.

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

if (n < 999999)
{
    Vref = Vref + 0.0000005;
    Z = 0;
}
n++;
Z++;

if (n > 999999)
{
    if (Z == 39999)
    {

        Pold = Pnew;

        Pnew = x1*x2;
    }
}

```

Fonte: Próprio autor (2021).

A etapa seguinte do algoritmo, observada nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9, é a que caracteriza a atuação direta do método P&O em busca do MPP do sistema. Retornando ao valor de potência obtido no ciclo de operação anterior, o código faz a equivalência desse parâmetro

com o valor de potência instantânea observado no ciclo atual, sendo este o produto entre as duas entradas do bloco: tensão e corrente do painel fotovoltaico.

Figura 3.7 – Algoritmo P&O

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

Z++;
if (n > 999999)
{
  if (Z == 39999)
  {
    Pold = Pnew;
    Pnew = x1*x2;

    if (Pnew >= Pold)
    {
      if (Vref >= Vref_old)
      {
        Vref_old = Vref;
      }
    }
  }
}

```

Fonte: Próprio autor (2021).

A partir daí, para que esses valores possam ser comparados, é aplicada a primeira condição do método. Com os valores de potência antiga e potência atual obtidos, a análise comparativa é realizada baseada em duas situações, indicadas nas equações a seguir, e para cada uma delas é empregada uma nova condição.

$$P_{new} \geq P_{old} \quad (3.1)$$

$$P_{new} < P_{old} \quad (3.2)$$

Se a potência atual apresentar um valor igual ou superior ao valor da potência antiga, a variação que será feita na tensão de referência vai depender de uma segunda análise, desta vez entre os valores da tensão de referência antiga e da tensão de referência atual, que será determinante para definir se o valor receberá um incremento ou um decremento. Se a tensão de referência atual for maior que a tensão de referência antiga, o valor antigo será igualado ao valor atual somado de um incremento. Caso contrário, o valor antigo será igualado ao valor atual, mas somado de um decremento, conforme mostra a figura 3.8.

Figura 3.8 – Análise dos valores de potência de saída antigo e atual – situação 1.

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

if (Pnew >= Pold)
{
    if (Vref >= Vref_old)
    {
        Vref_old = Vref;
        Vref = Vref + 0.025;
    }
    if (Vref < Vref_old)
    {
        Vref_old = Vref;
        Vref = Vref - 0.025;
    }
}

```

Fonte: Próprio autor (2021).

Em contrapartida, se a potência atual apresentar um valor inferior ao valor da potência antiga, a atuação do algoritmo se dá de forma análoga a outra situação anteriormente apresentada, mas em um sentido oposto, como observado na figura 3.9.

Figura 3.9 – Análise dos valores de potência de saída antigo e atual – situação 2.

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

}
if (Pnew < Pold)
{
    if (Vref >= Vref_old)
    {
        Vref_old = Vref;
        Vref = Vref - 0.025;
    }
    else
    {
        Vref_old = Vref;
        Vref = Vref + 0.025;
    }
}

```

Fonte: Próprio autor (2021).

Por fim, o valor de Z retorna a zero, sendo necessário iniciar uma nova contagem para que novamente o valor de 39999 seja alcançado e um novo valor de potência seja gerado,

e a saída do bloco recebe o valor da tensão de referência, para que seja comparado com o sinal da portadora e aplicado no conversor, conforme mostra a figura 3.10.

Figura 3.10 – Conclusão do algoritmo P&O.

```

C Code
Following variables are valid: t, delt
Input    x1, x2
Output   y1

    Vref_old = Vref;
    Vref = Vref + 0.025;
}
}

    Z = 0;
}
}

y1 = Vref;

```

Fonte: Próprio autor (2021).

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foi apresentado o funcionamento do método MPPT P&O de forma geral e desenvolvimento do algoritmo para a implementação no *software* PSIM.

As considerações feitas abordaram o quanto o método é eficaz no rastreamento do ponto de máxima potência e de fácil implementação, sendo amplamente conhecido e bastante utilizado. Porém, também foram trazidos alguns pontos negativos que devem ser levados em consideração, como o rastreamento na direção equivocada em situações de rápida mudança de irradiância, por exemplo.

As etapas do algoritmo que foi construído foram comentadas detalhadamente, sendo possível observar que no MPPT P&O, além da comparação dos valores de potência do sistema, é imprescindível avaliar a variação na tensão de referência para conduzir a atuação do método.

4 PROJETO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

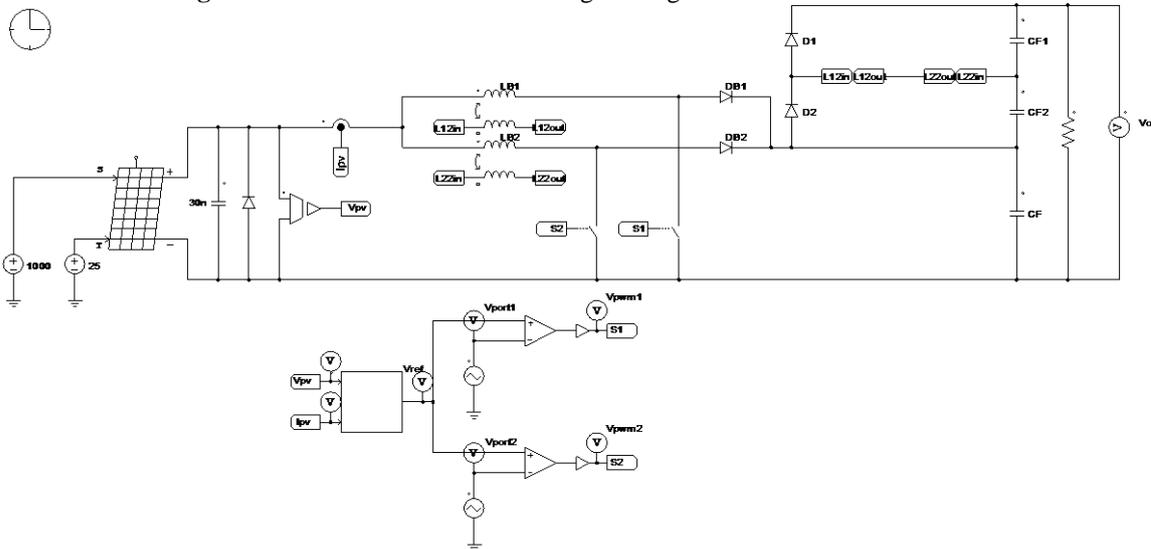
4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o projeto de dimensionamento do conversor *boost* de alto ganho, no qual o algoritmo de MPPT, apresentado no capítulo 3, será implementado. Além disso, também serão apresentados e discutidos os resultados de simulação obtidos com o desempenho do conversor e a atuação da técnica P&O, com a realização de ensaio estáticos e dinâmicos.

As simulações foram executadas no *software* PSIM, e o objetivo dos resultados alcançados é expor as formas de onda mais relevantes do conversor para que seja possível analisá-los e demonstrar que o conversor apresenta um funcionamento de acordo com os conceitos teóricos abordados nos capítulos anteriores.

A figura 4.1 mostra o circuito elétrico utilizado na avaliação do MPPT P&O aplicado a um sistema fotovoltaico ligado a um conversor *boost* de alto ganho.

Figura 4.1 – Conversor *boost* de alto ganho ligado a um sistema fotovoltaico.

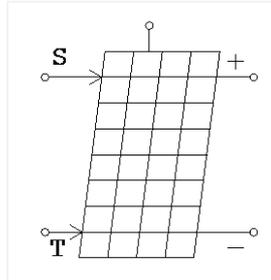


Fonte: Próprio Autor (2021).

O sistema fotovoltaico é representado pelo modelo físico do módulo solar, apresentado na figura 4.2. A ferramenta é encontrada nos elementos de potência de energia renovável, que estão disponíveis no PSIM, e a principal vantagem desse modelo é sua capacidade de identificar variações da radiação incidente e temperatura ambiente, tornando possível trabalhar levando em consideração essas grandezas. Entretanto, é necessário inserir vários parâmetros, sendo alguns deles preciso adequá-los por tentativa e erro. Como forma de

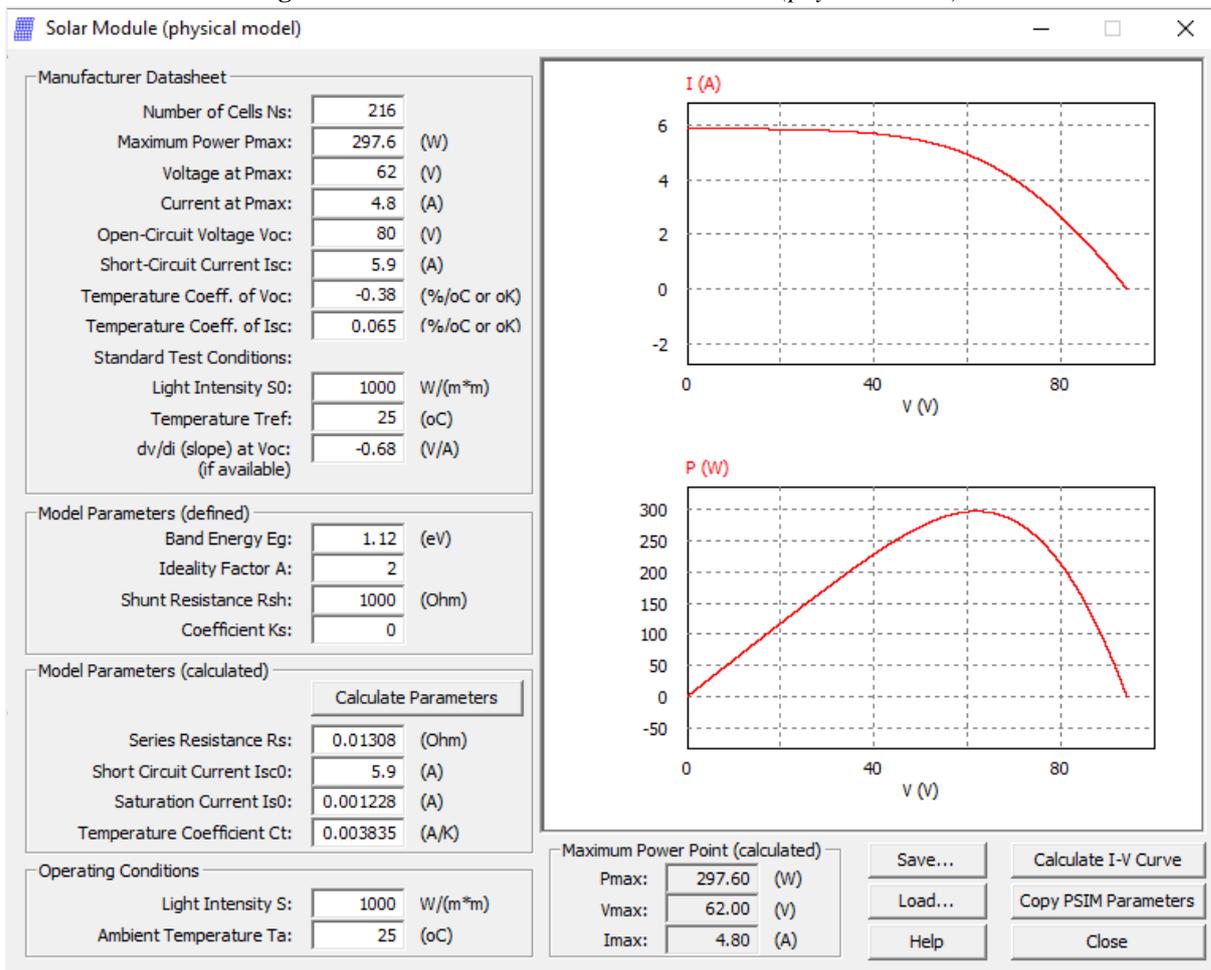
facilitar esse processo, o *software* PSIM disponibiliza no menu *Utilities* a ferramenta *Solar Module (physical model)*, como mostra a figura 4.3.

Figura 4.2 – Ferramenta *Solar Module (physical model)*.



Fonte: PSIM (2021).

Figura 4.3 – Janela da ferramenta *Solar Module (physical model)*.



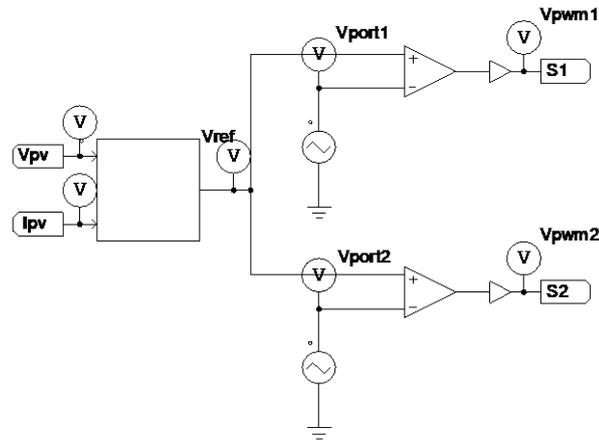
Fonte: PSIM (2021).

A janela da ferramenta mostra os principais parâmetros que devem ser inseridos, como máxima potência, tensão e corrente no ponto de máxima potência, tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. Tais parâmetros foram determinados de acordo com os valores padrões que são aplicados no modelo funcional do módulo solar, mas também podem ser obtidos por meio do *datasheet* de algum modelo comercial. Os valores de intensidade de

luz e temperatura sob condições de teste padrão serão estipulados em $1000\text{W}/\text{m}^2$ e 25°C , respectivamente. Por fim, é possível calcular os valores referentes ao MPP e gerar as curvas $V \times I$ e $V \times P$, como apresentado na figura 4.3.

O esquemático da figura 4.4 indica o circuito de controle do sistema, que está ligado às chaves do conversor e será o responsável pela aplicação do MPPT. É importante destacar que as portadoras V_{port1} e V_{port2} estão defasadas em 180° elétricos, e a tensão de referência V_{ref} gerada pelo algoritmo de MPPT é a mesma para ambas.

Figura 4.4 – Circuito de controle.



Fonte: Próprio autor (2021).

4.2 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO

Inicialmente, para o dimensionamento do conversor *boost* de alto ganho, é indispensável partir de algumas especificações, que serão apresentadas na tabela 4.1.

Os valores de tensão e corrente no MPP foram indicados de acordo com os parâmetros determinados para o modelo do módulo solar que será utilizado no projeto.

Será admitido como tensão de entrada o valor de tensão no ponto de máxima potência. Desse modo, com os valores de tensão apresentados na tabela 4.1, e retornando à equação 2.6, é possível obter o valor da razão cíclica.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2n + 1}{1 - D} \therefore \frac{600}{62} = \frac{3}{1 - D} \therefore D = 0,69 \quad (4.1)$$

Observa-se que, pelo fato de o conversor apresentar um rendimento máximo, o valor de potência da entrada será equivalente ao valor de potência de saída. A partir daí pode-se encontrar os valores de corrente média e resistência na carga.

$$P_o = V_o \times I_o \therefore I_o = \frac{297,6}{600} \therefore I_o = 0,496\text{A} \quad (4.2)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \therefore R = \frac{600^2}{297,6} \therefore R = 1209,6774\Omega \quad (4.3)$$

De maneira análoga à tensão de entrada, a corrente de entrada que será considerada equivale ao valor da corrente no ponto de máxima potência. Portanto, para determinar os valores de corrente média nos indutores, o valor de corrente de entrada do sistema será dividido por dois.

$$I_{LB1} = \frac{I_{in}}{2} = \frac{4,8}{2} \therefore I_{LB1} = 2,4A \quad (4.4)$$

$$I_{LB2} = \frac{I_{in}}{2} = \frac{4,8}{2} \therefore I_{LB2} = 2,4A = I_{LB1} \quad (4.5)$$

Com o valor de corrente média nos indutores obtido, os valores de indutância no enrolamento primário podem ser estabelecidos por meio do valor de ondulação de corrente pico a pico.

$$L = L_{B1} = L_{B2} = \frac{V_{in} \times D}{2 \times \Delta I_{in} \times f_s} \quad (4.6)$$

$$\Delta_{iLB1} = \Delta_{iLB2} = 1\% \times 2,4 = 0,024A \quad (4.7)$$

$$L_{B1} = L_{B2} = \frac{62 \times 0,69}{2 \times 0,024 \times 20000} = 44,5625mH$$

No enrolamento secundário, o valor de indutância será igual ao valor no primário, visto que a relação de transformação foi determinada em 1:1.

$$L = L_1 = L_2 = n^2 \times L_B \therefore n = 1 \quad (4.8)$$

$$L_1 = L_2 = L_{B1} = L_{B2} = 44,5625mH \quad (4.9)$$

Na figura 4.1 é possível observar que o circuito equivalente ao conversor *boost* de alto ganho dispõe de três capacitores na saída. Sabe-se que associação em série de componentes elétricos, a tensão total é resultante da soma das tensões sobre os componentes. Logo, para que as tensões sobre os capacitores sejam iguais e o seu somatório resulte no valor de tensão de saída, tem-se que:

$$C_F = C_{F1} = C_{F2} \quad (4.10)$$

$$V_{CF} = V_{CF1} = V_{CF2} = \frac{V_o}{3} = \frac{600}{3} \therefore V_{CF} = 200V \quad (4.11)$$

Com a tensão sobre os capacitores determinada, o valor da capacitância pode ser encontrado por meio da equação abaixo.

$$\Delta_{vCF} = 1\% \times \frac{V_o}{3} = 2V \quad (4.12)$$

$$C_F = \frac{I_o \times D}{f_s \times \Delta_{vC}} = \frac{0,496 \times 0,69}{20000 \times 2} \therefore C_F = 8,556\mu F \quad (4.13)$$

A tabela 4.2 organiza os parâmetros obtidos no dimensionamento do projeto para uma melhor visualização dos valores.

Tabela 4.1 – Especificações para o projeto do conversor *boost* de alto ganho.

Grandeza	Representação	Valor
Tensão no MPP	V_{MPP}	62V
Corrente no MPP	I_{MPP}	4,8A
Máxima Potência	P_{MPP}	297,6W
Potência de Entrada	P_i	297,6W
Rendimento	η	100%
Potência de Saída	P_o	297,6W
Ondulação da Tensão Pico a Pico	ΔV_C	1%
Ondulação da Corrente Pico a Pico	Δi_L	1%
Tensão de Saída	V_o	600V
Frequência de chaveamento	f_s	20kHz
Relação de Transformação	n	1:1

Fonte: Próprio Autor (2021).

Tabela 4.2 – Parâmetros do conversor *boost* de alto ganho.

Grandeza	Representação	Valor
Indutâncias do primário	L_{B1}	44,56mH
	L_{B2}	
Indutâncias do secundário	L_1	
	L_2	
Corrente média nos indutores (primário)	I_{LB1}	2,4A
	I_{LB2}	
Capacitâncias	C_F	8,56 μ F
	C_{F1}	
	C_{F2}	
Tensão nos Capacitores	V_{CF}	200V
	V_{CF1}	
	V_{CF2}	
Resistência de carga	R	1209,67 Ω
Razão Cíclica	D	69 %

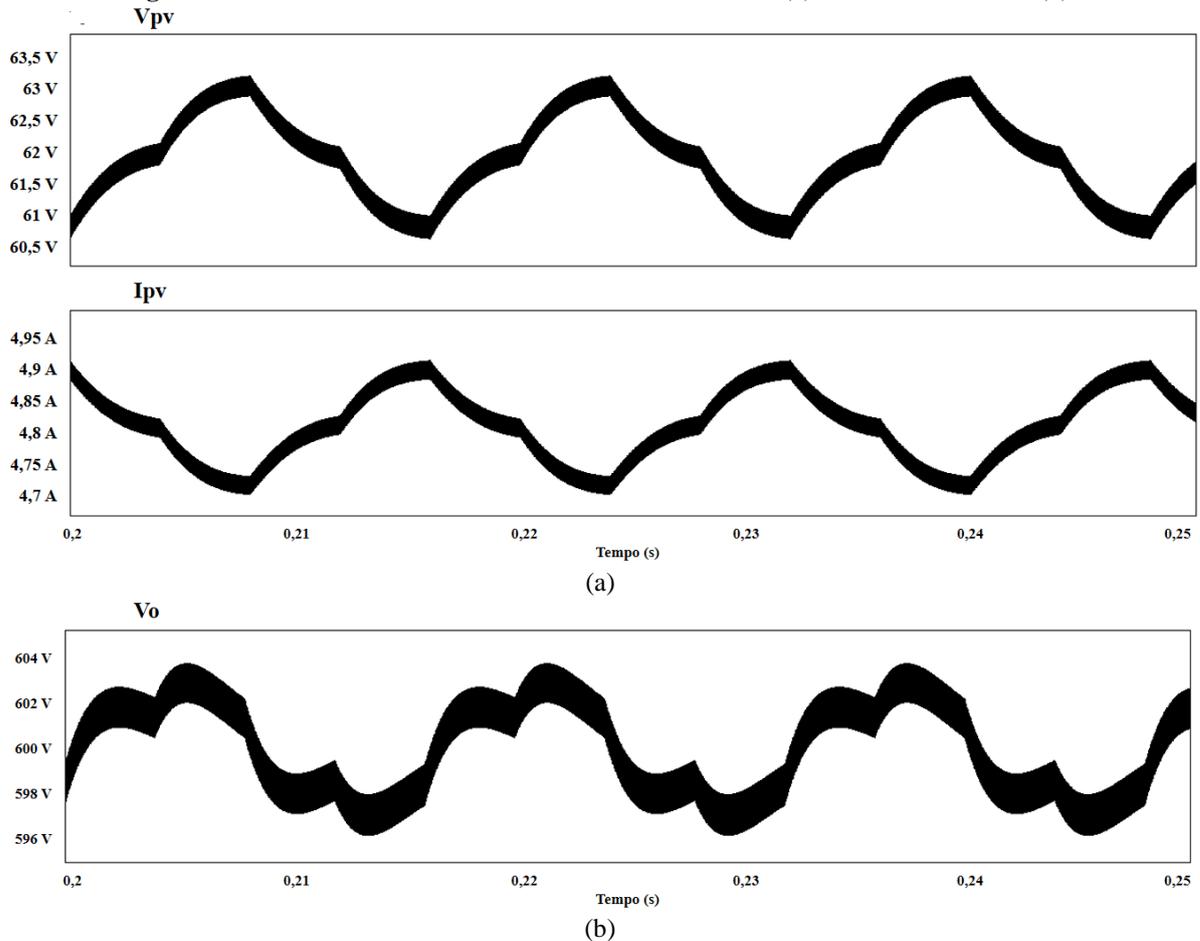
Ondulação Máx. da tensão de saída	ΔV_C	2V
Ondulação Máx. da corrente no indutor	Δi_L	0,024A
Frequência de chaveamento	f_s	20kHz

Fonte: Próprio Autor (2021).

4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO CONVERSOR *BOOST* DE ALTO GANHO

Nessa seção serão apresentados os resultados de simulação obtidos referentes ao funcionamento do conversor *boost* de alto ganho. Inicialmente, a figura 4.5.a mostra o comportamento da tensão e corrente de entrada do sistema. A partir da simulação, foram obtidos os valores médios para tais parâmetros, sendo eles 61,94V e 4,80A. Pode-se concluir que a potência de entrada do conversor é de aproximadamente 297,49W, sendo este um valor bastante próximo da especificação determinada em projeto. Já a figura 4.5.b representa a tensão de saída do sistema, com um valor médio calculado no *software* PSIM de 599,96V. É observado que ocorre um alto ganho de tensão, constatando o funcionamento adequado do conversor.

Figura 4.5 – Formas de onda de tensão e corrente de entrada (a) e de tensão de saída (b).

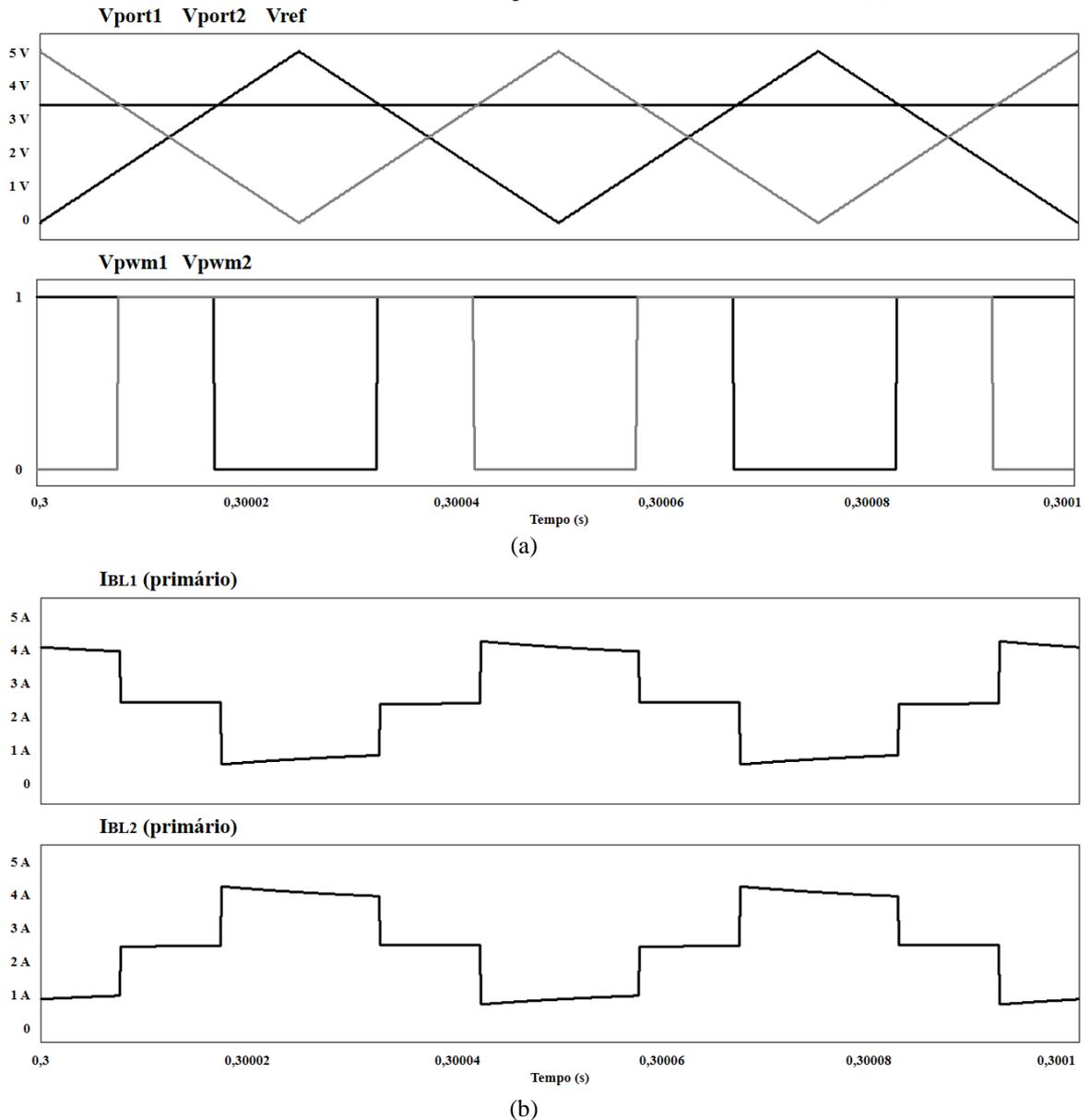


Fonte: Próprio Autor (2021).

Na figura 4.6.a serão apresentadas as formas de onda referentes aos sinais destinados aos acionamentos das chaves S_1 e S_2 . Na figura é observada a forma de onda da tensão de referência relacionada com as formas de onda das tensões nas portadoras 1 e 2. São verificados os valores de pico em 5V das portadoras e a defasagem entre elas de 180° . Ademais, é apresentado como se dá o acionamento das chaves S_1 e S_2 por meio da modulação PWM – *Pulse Width Modulation*. É observado que a interseção entre a tensão de referência e a tensão triangular de alta frequência é o que determina o instante do chaveamento para geração dos pulsos.

A figura 4.6.b mostra as formas de onda das correntes nos indutores L_{B1} e L_{B2} durante os períodos de chaveamento. Verifica-se que a corrente nos indutores não atinge o valor nulo em nenhum instante, visto que o conversor opera em modo de condução contínua – CCM.

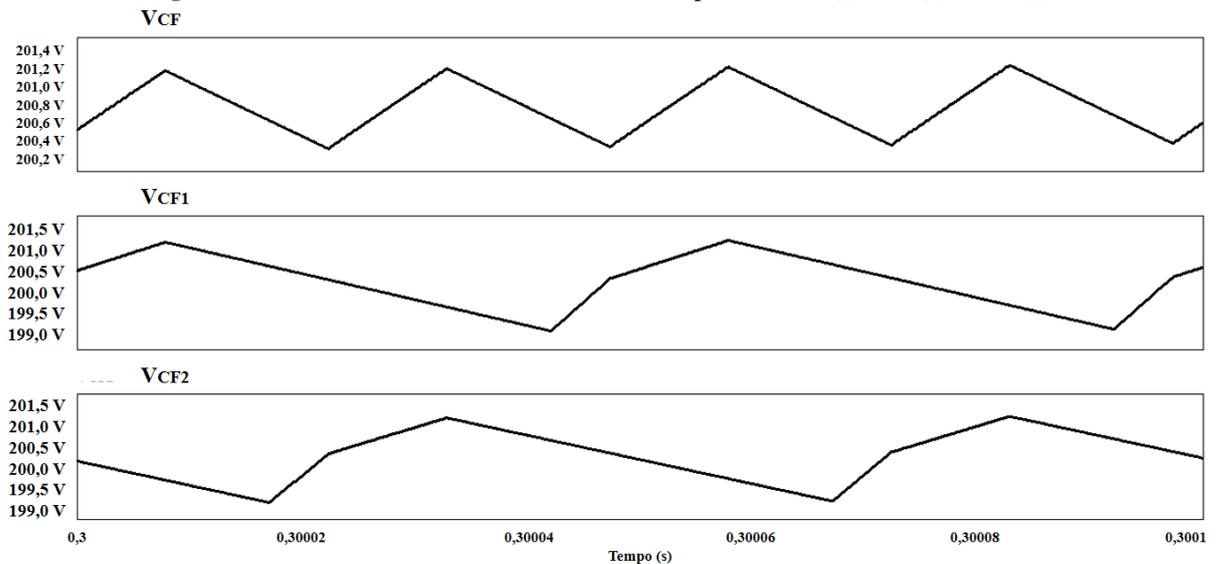
Figura 4.6 – Formas de onda das tensões das portadoras e de referência e pulsos nas chaves S_1 e S_2 (a) e formas de onda da corrente no enrolamento primário dos indutores LB1 e LB2 (b).



Fonte: Próprio Autor (2021).

A figura 4.7 mostra as formas de onda das tensões nos capacitores de saída, C_F , C_{F1} e C_{F2} . Nota-se que as tensões nos capacitores não exibem uma discrepância considerável entre si, apresentando valores médios aproximadamente balanceados, conforme abordado na seção anterior, além de que a ondulação de tensão nos componentes está dentro do projetado.

Vale ressaltar que os resultados foram recortados dentro de intervalos de tempo que possibilitasse a apresentação das formas de onda em regime permanente. A tabela 4.3 organiza os valores encontrados por meio do dimensionamento do conversor e os valores médios obtidos em simulação como forma de observar a efetividade do funcionamento do sistema, sendo encontrados baixos percentuais de erro relativo no estudo comparativo entre eles.

Figura 4.7 – Formas de onda de tensão sobre os capacitores C_F (a), C_{F1} (b) e C_{F2} (c).

Fonte: Próprio Autor (2021).

Tabela 4.3 – Análise comparativa dos valores teóricos e de simulação.

Grandeza	Valor teórico	Valor médio obtido em simulação	Erro Relativo
Tensão de entrada	62V	61,94V	0,086%
Corrente de entrada	4,8A	4,80A	0,063%
Potência de entrada	297,6W	297,49W	0,035%
Corrente nos indutores	2,4A	2,455 A	2,260%
	2,4A	2,449 A	1,994%
Tensão de Referência	3,45V	3,4508V	0,024%
Tensão nos capacitores	200V	200,32V	0,160%
	200V	199,82V	0,089%
	200V	199,82V	0,089%
Tensão na carga	600V	599,96V	0,006%
Corrente na carga	0,496A	0,4959 A	0,006%
Potência na carga	297,6W	297,56W	0,012%
Ganho estático	9,68	9,685	0,079%

Fonte: Próprio autor (2021).

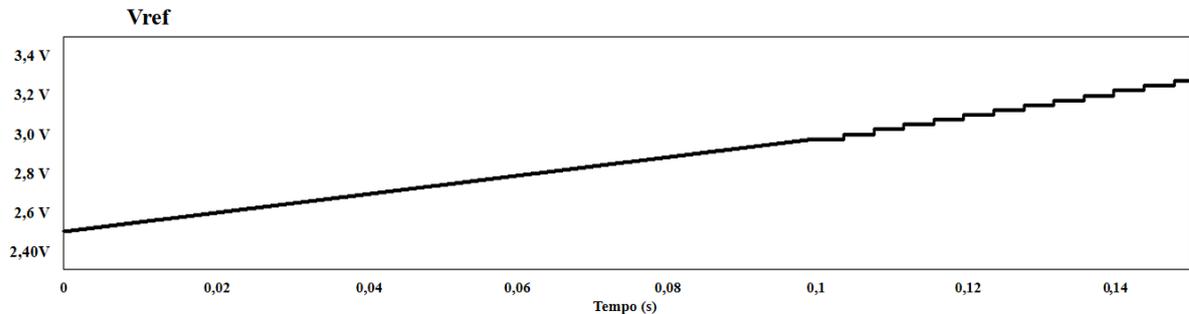
4.4 DESEMPENHO ESTÁTICO DO ALGORITMO PROJETADO

Nesse tópico serão apresentados os resultados de simulação obtidos com a aplicação do MPPT P&O na operação do conversor *boost* de alto ganho de modo a avaliar o seu desempenho estático, ou seja, os valores de irradiação solar e de temperatura constantes, fixados em 1000 W/m^2 e 25°C , respectivamente.

A figura 4.8 mostra o comportamento inicial da forma de onda da tensão de referência para que seja possível visualizar a operação da etapa de *soft-start*. É observado que a tensão de referência, iniciada no valor de 2,5V, varia de forma controlada e linear, fazendo com que a razão cíclica não apresente variações bruscas no início de funcionamento do sistema

e venha a ocasionar possíveis danos aos componentes do circuito. A operação abrange 1×10^6 iterações, e é finalizada em 100ms, conforme abordado no capítulo 3.

Figura 4.8 – Operação do *soft-start*.

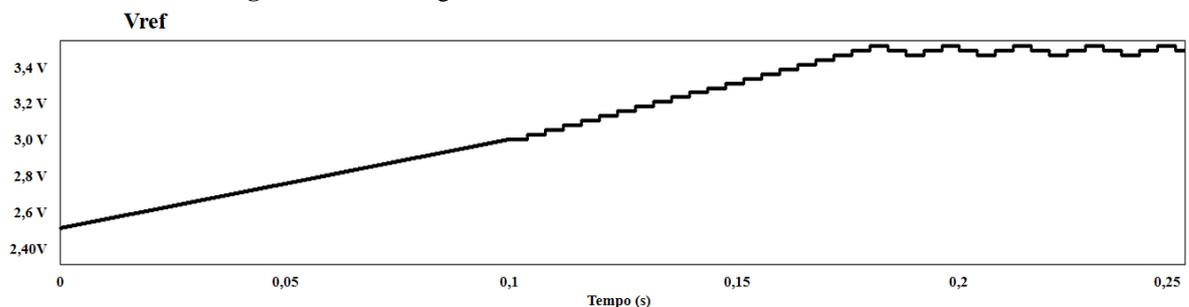


Fonte: Próprio Autor (2021).

Encerrada a atuação da etapa de *soft-start*, a variação na tensão de referência é condicionada à comparação dos valores de potência instantânea lidos nos terminais do módulo fotovoltaico. A figura 4.9 mostra, de uma forma geral, o comportamento da tensão de referência, exibindo o período de transição de funcionamento do algoritmo. Dado início a segunda etapa do algoritmo, verifica-se que a tensão de referência apresenta uma variação que, além de maior valor, é direcionada ao ponto de máxima potência. A partir do instante em que o ponto de máxima potência do sistema é encontrado, o valor da tensão de referência oscila entre valores nas proximidades deste, como pode ser observado na figura 4.10.

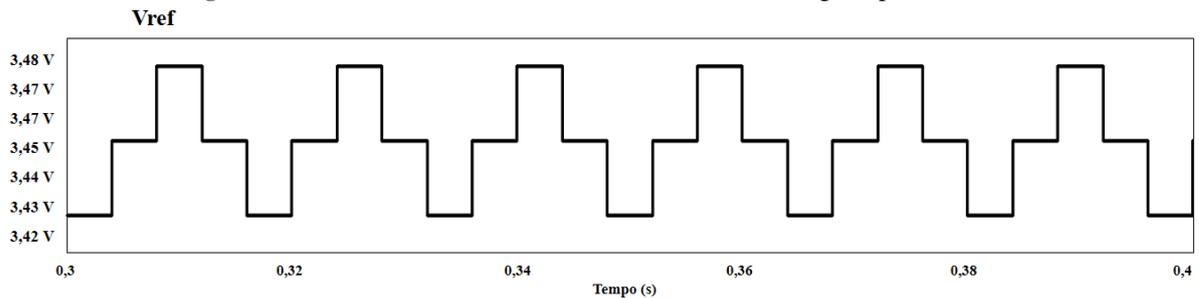
Por fim, a figura 4.11 apresenta a forma de onda da potência na carga. A leitura do valor médio realizada pelo *software* PSIM foi de 297,5 W. A partir desse valor é possível chegar em um rendimento do conversor muito próximo de 1. Esse excelente valor, todavia, pode ser justificado através da idealização dos componentes, que é considerada para efeitos de simulação, além do efeito de dispersão dos dispositivos magnéticos, que é desprezado.

Figura 4.9 – Visão geral da forma de onda da tensão de referência.



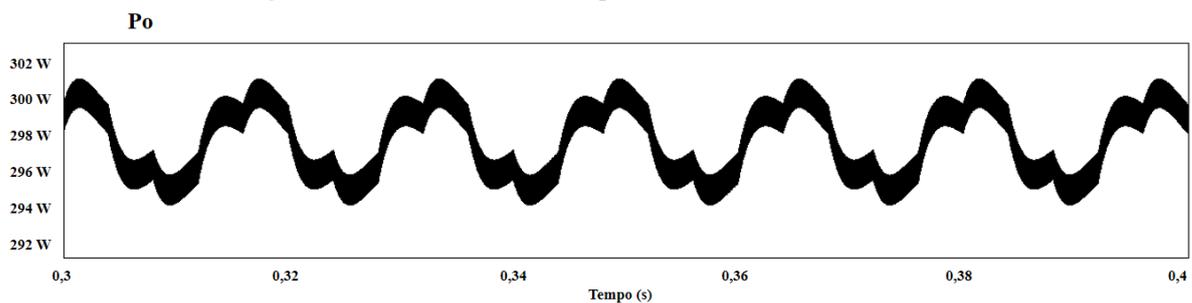
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.10 – Forma de onda da tensão de referência em regime permanente.



Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 4.11 – Forma de onda da potência de saída do conversor.



Fonte: Próprio Autor (2021).

4.5 DESEMPENHO DINÂMICO DO ALGORITMO PROJETADO

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos como forma de verificar o funcionamento do algoritmo de MPPT em situações que radiação, temperatura e carga são modificadas. Para realizar essa análise, foram estipulados alguns valores de degraus para serem implementados a partir de um determinado instante. Além disso, para fins de comparação, também foi considerado o valor de incremento ou decremento aplicado à tensão de referência.

Como visto no capítulo anterior, a função do algoritmo desenvolvido é buscar o ponto de máxima potência. Quando esse ponto é encontrado, o algoritmo apresenta uma estabilização dentro de valores próximos ao valor de operação ideal. Desse modo, foi avaliado o tempo que o algoritmo leva para alcançar uma nova estabilização quando são empregados novos valores de radiação e temperatura ou ocorre variação na carga.

Sabe-se que a potência do sistema não apresenta um comportamento dinâmico. Contudo, a variação da potência é alterada quando são utilizados diferentes valores no incremento ou decremento da tensão de referência e essa análise é importante para a determinação do valor de ΔV_{ref} . A tabela 4.4 mostra os valores obtidos em simulação de variação de potência no painel e na carga para os valores de variação aplicados à V_{ref} . É observado que, se comparados com o valor de potência do sistema de 297,6W, os valores de variação no painel são considerados pequenos, inclusive para o maior valor de ΔV_{ref}

estipulado. Entretanto, os valores de variação que ocorrem na potência de saída são relevantes, podendo influenciar na eficiência do sistema. Logo, conclui-se que, além dos valores estabelecerem uma relação diretamente proporcional, onde o aumento da variação aplicada a V_{ref} incide em um aumento na variação de potência do painel fotovoltaico, é imprescindível que a análise seja nos parâmetros de entrada e saída do sistema para que o valor a ser incrementado ou decrementado na tensão de referência seja determinado adequadamente.

Tabela 4.4 – Variações de potência em relação com a variação aplicada na tensão de referência.

Variação na tensão de referência ΔV	Variação de potência no painel ΔP_{in}	Variação de potência na carga ΔP_o
0,025V	0,480W	7,050W
0,050V	2,216W	12,26W
0,075V	3,804W	17,59W
0,100V	7,162W	23,69W

Fonte: Próprio autor (2021).

Para os ensaios de radiação, a temperatura foi fixada em 25°C e a radiação inicialmente em 1000W/m² com *steps* em 800W/m² e 600W/m². A tabela 4.5 apresenta os valores obtidos para os diferentes valores de variação da tensão de referência, sendo verificado que à medida que o valor de ΔV aumenta, o tempo que a forma de onda leva para estabilizar dentro do cenário que possui um novo valor de radiação diminui. É possível observar também que essa variação do tempo é relativamente maior quando aplicada uma maior variação de radiação. As figuras 4.12 e 4.13 apresenta o comportamento das formas de onda para os valores de variação na tensão de referência.

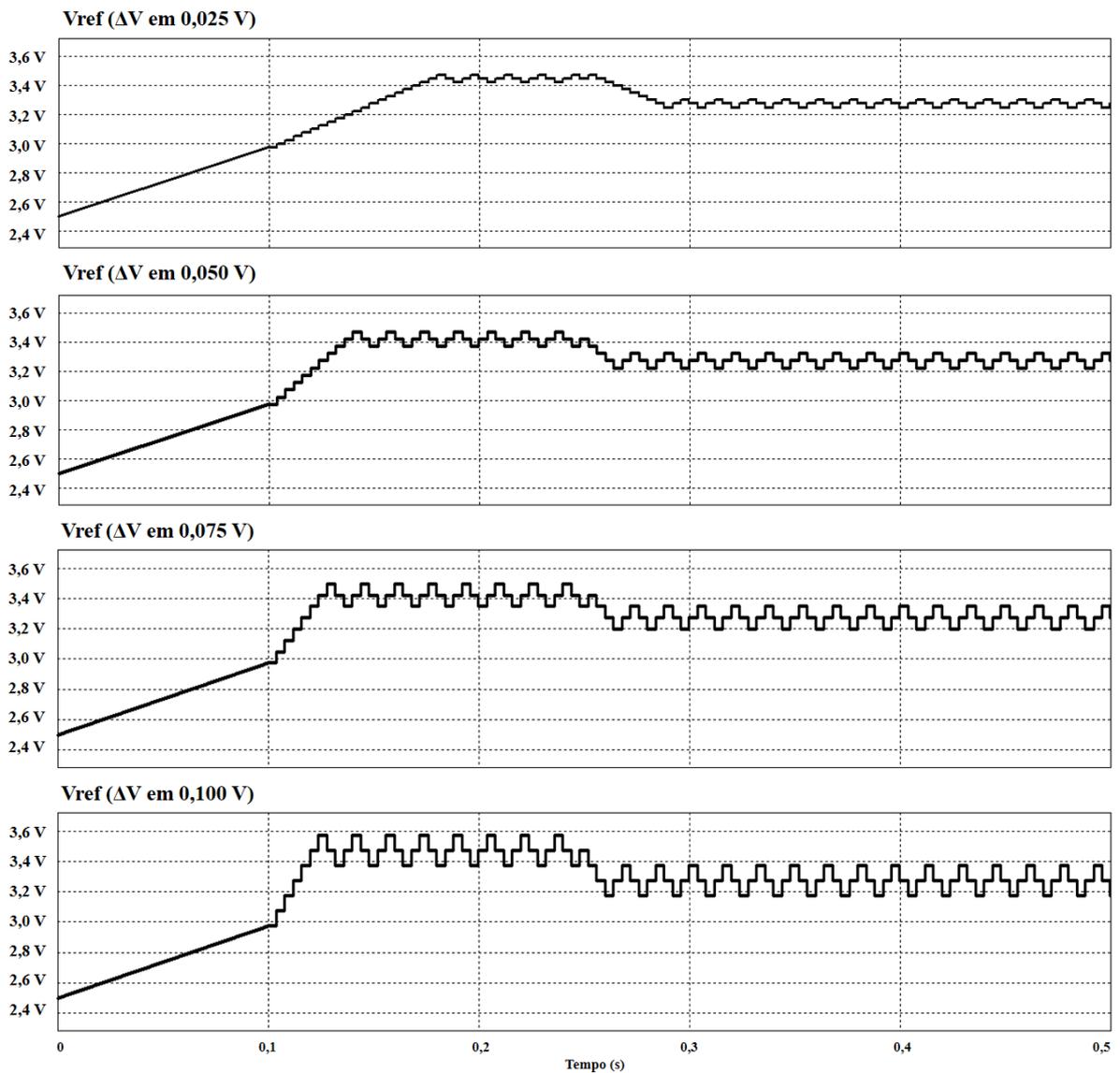
Para os ensaios de temperatura, foi determinada a radiação fixa em 1000W/m² e a temperatura inicial em 25°C, com *steps* em 0°C e 50°C. A tabela 4.6 mostra as variações de tempo que foram obtidas. Da mesma forma que os resultados dos ensaios de radiação, é observado que o tempo de estabilização apresenta uma diminuição com o aumento do incremento na tensão de referência. Além disso, foi verificado que o algoritmo atinge o ponto de máxima potência relativamente mais rápido em caso de alta temperatura. São apresentadas as formas de onda da tensão de referência nas figuras 4.14 e 4.15.

Tabela 4.5 – Tempo de estabilização para os ensaios de variação de radiação (temperatura constante).

Variação na tensão de referência ΔV	Step de 1000W/m ² a 800 W/m ²	Step de 1000W/m ² a 600 W/m ²
	Δt	Δt
0,025V	54ms	97ms
0,050V	30ms	56ms
0,075V	25ms	38ms
0,100V	24ms	36ms

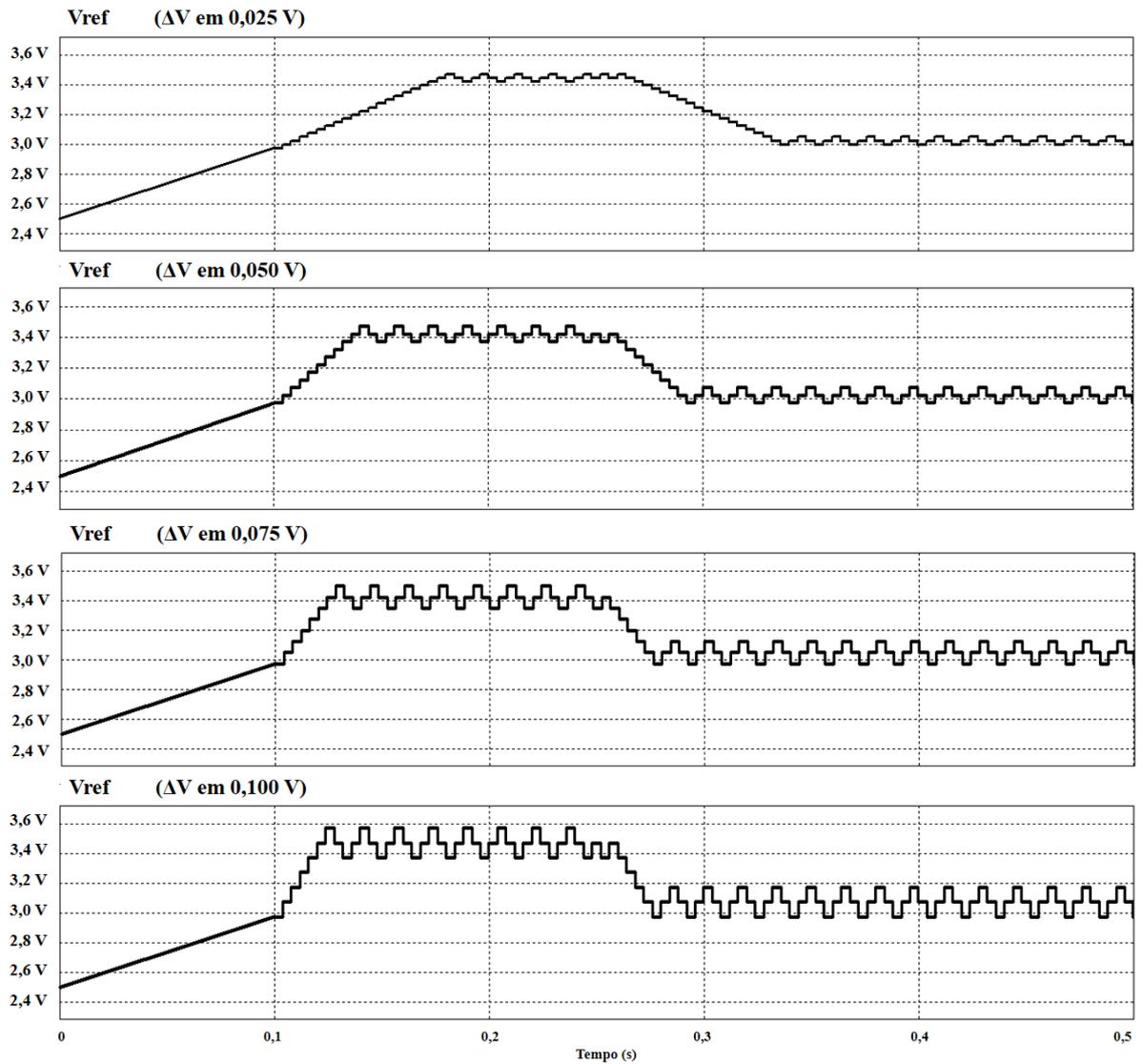
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.12 – Formas de onda da tensão de referência (step de radiação em 800 W/m²).



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.13 – Formas de onda da tensão de referência (*step* de radiação em 600 W/m²)



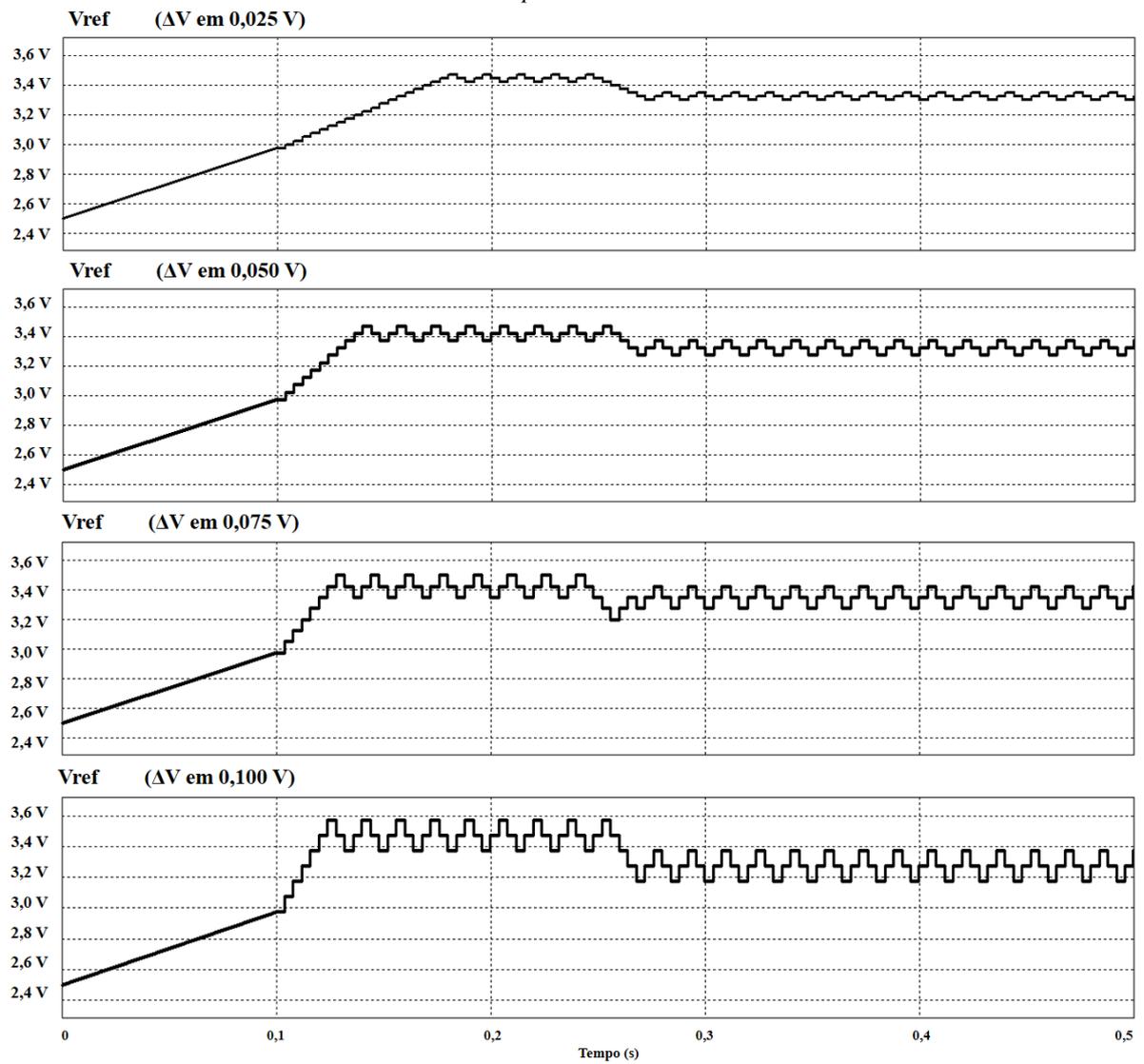
Fonte: Próprio autor (2021).

Tabela 4.6 – Tempo de estabilização para os ensaios de variação de temperatura (radiação constante).

Variação na tensão de referência ΔV	Step de 25°C a 0°C Step de 25°C a 50°C	
	Δt	Δt
0,025V	38ms	35ms
0,050V	34ms	30ms
0,075V	27ms	22ms
0,100V	22ms	17ms

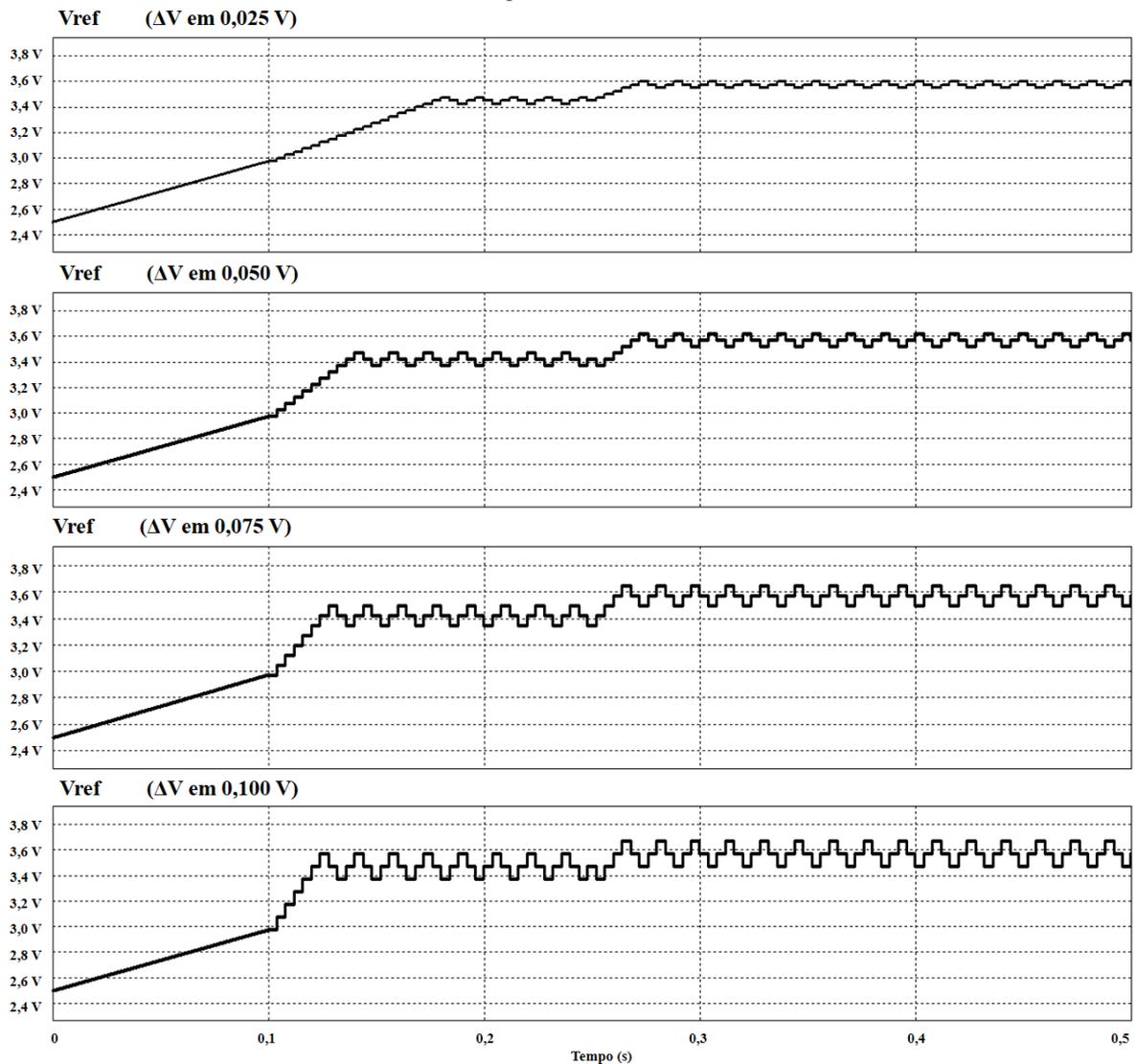
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.14 – Formas de onda da tensão de referência com radiação constante e temperatura inicial em 25°C e *step* em 0°C.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.15 – Formas de onda da tensão de referência com radiação constante e temperatura inicial em 25°C e *step* em 50°C.



Fonte: Próprio autor (2021).

Por fim, foram realizados os ensaios de variação de carga. Com intuito de verificar o comportamento do sistema em um degrau de carga de 50%, fez-se necessário realizar algumas alterações no circuito. Foi adicionada uma resistência à carga, de mesmo valor e em paralelo, como forma de modificar a carga total do sistema. Para que essa alteração seja realizada durante o funcionamento do algoritmo, foram posicionadas também algumas ferramentas como *bi-directional switch* e um fonte de tensão *step*, com *time step* definido em 250ms. Desse modo, o sistema inicialmente vai operar com um valor de carga que em 250ms decai pela metade. A tabela 4.7 apresenta os valores de variação de tempo para diferentes valores de variação na tensão de referência e a figura 4.16 mostra o comportamento das formas de onda. Verifica-se que para o menor valor de incremento na tensão de referência, o tempo de estabilização do

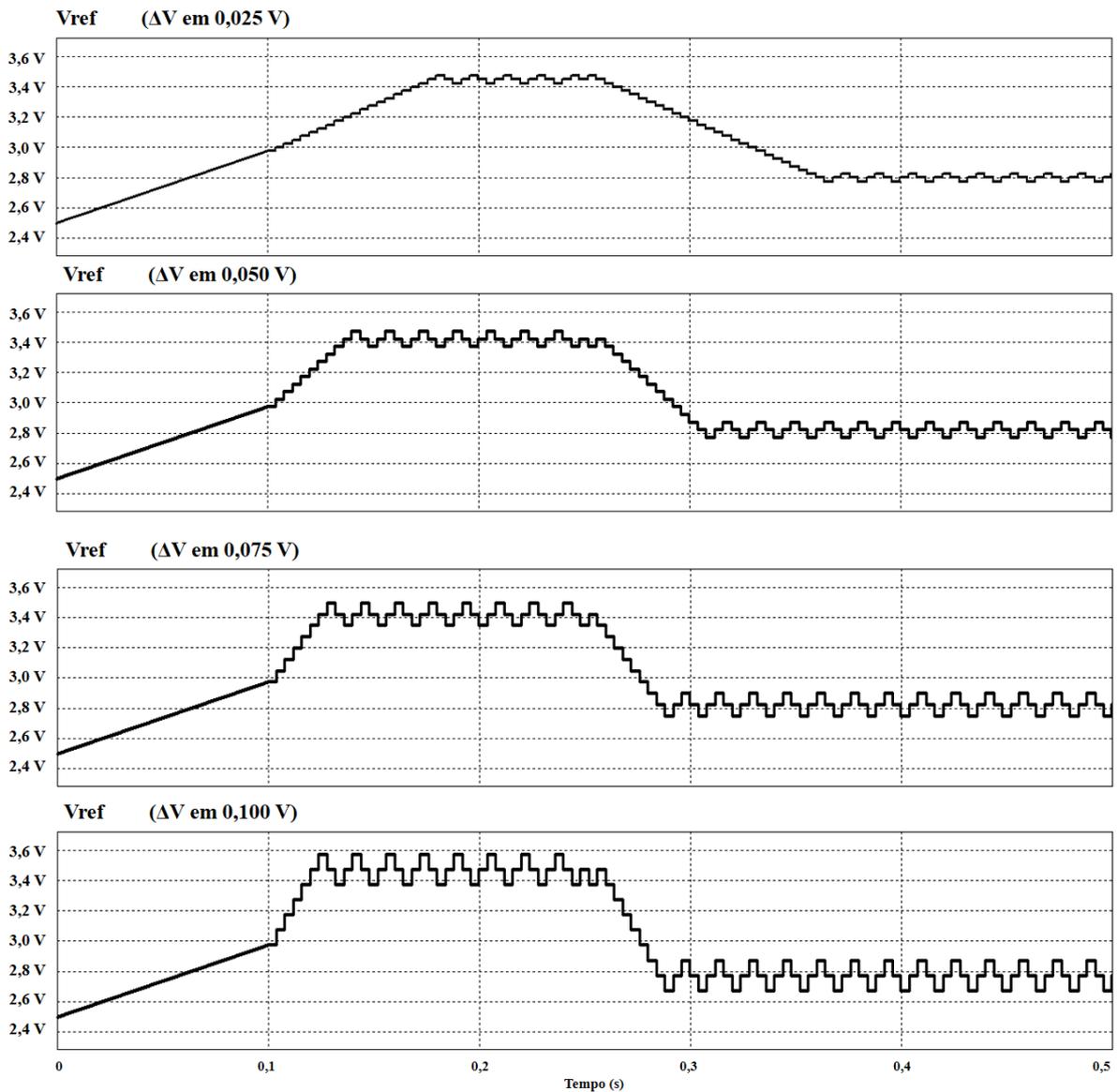
algoritmo é relativamente alto, mas que é possível obter a diminuição desse valor com o aumento da variação de V_{ref} .

Tabela 4.7 – Tempo de estabilização para os ensaios de degrau de carga.

Variação na tensão de referência ΔV	Step de 50% na carga Δt
0,025V	130ms
0,050V	74ms
0,075V	55ms
0,100V	51ms

Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 4.16 – Formas de onda da tensão de referência com variação de carga.



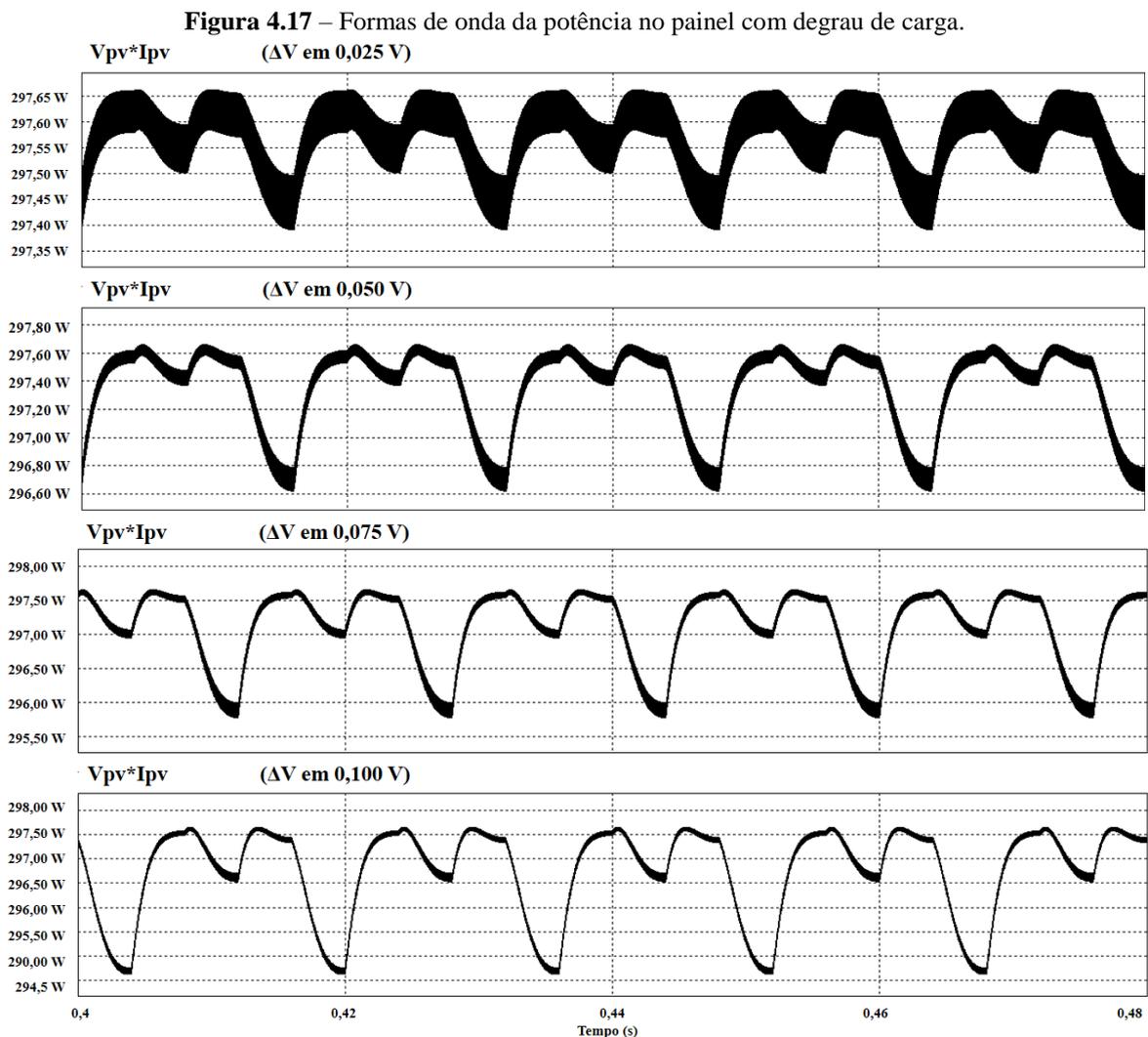
Fonte: Próprio autor (2021).

Vale ressaltar que o comportamento da tensão de referência é justificado pela relação que é estabelecida no novo valor de tensão para que a operação do sistema seja mantida

nas proximidades do ponto de máxima potência. Na primeira situação, em que se tem a resistência de carga no valor R , a tensão de saída é representada por V_o . Quando é aplicado o degrau de carga de 50% e o valor da resistência de carga é diminuído a sua metade, para que a potência do sistema não sofra alteração quando o algoritmo atingir estabilidade novamente, o novo valor da tensão de saída deve estabelecer a relação com V_o descrita na equação 4.15. Dessa forma, para que a tensão de saída seja menor, a razão cíclica deve ser reduzida, e esse processo é alcançado com a diminuição do valor médio de V_{ref} , como mostrado na figura 4.16.

$$V_o^2 = 0,707 \times V_o^1 \quad (4.15)$$

A figura 4.17 mostra as formas de onda da potência no painel para os diferentes valores de variação na tensão de referência quando aplicado o degrau de carga. Nota-se que, apesar da variação de potência aumentar à medida que o ΔV aumenta, o valor médio de potência do sistema é mantido para todas as situações, mostrando a eficácia do algoritmo quando a carga ligada ao conversor é alterada.



Fonte: Próprio autor (2021).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados o dimensionamento do conversor *boost* de alto ganho utilizado neste trabalho e os resultados de simulação obtidos com a implementação do controle MPPT Perturbe & Observe, como forma de mostrar a eficiência do funcionamento do sistema conectado a uma rede de geração fotovoltaica.

O dimensionamento do conversor foi feito para que o mesmo fosse interligado a um sistema fotovoltaico e o método de MPPT foi aplicado para que fosse possível a máxima extração de potência desse sistema. A atuação do sistema de controle desenvolvido foi avaliada em condições estáticas e dinâmicas, sendo considerado também o ajuste realizado na razão cíclica durante a operação do conversor.

Acerca do estudo de desempenho do conversor *boost* de alto ganho, tem-se que os resultados de simulação obtidos foram satisfatórios, visto que apresentaram valores e formas de onda de acordo com o esperado.

Os resultados de simulação referentes à análise de desempenho estático do algoritmo de MPPT desenvolvido mostram que, além da operação adequada, o rastreamento do ponto de máxima potência é realizado, sendo verificada a efetividade do algoritmo desenvolvido.

Já no estudo de desempenho dinâmico, onde foram empregadas variações em cima da radiação, da temperatura e da carga durante a operação do sistema, além da variação aplicada à tensão de referência dentro do algoritmo, foi possível observar que em todos os casos o tempo de estabilização diminui à medida que o valor de ajuste na tensão de referência aumenta. Em contrapartida, a análise de variação de potência do painel e as formas de onda que foram apresentadas facilitam a visualização de que não deve ser considerado apenas o tempo de estabilização. É imprescindível verificar que, para maiores valores de incremento ou decremento na tensão de referência, apesar do algoritmo encontrar um novo valor de estabilidade mais rapidamente, o sistema opera oscilando dentro de valores mais afastados do ponto de máxima potência. Dessa forma, conclui-se que a aplicação de um ΔV na tensão de referência de 0,075V é bastante eficiente visto que apresenta um curto tempo de estabilização e variação aceitável dentro dos valores de potência. Sendo considerado todos os ensaios realizados, a média de diminuição do valor de ΔT atingida para tal valor se aproxima de 100% quando comparados com os valores em que a tensão de referência é incrementada em 0,025V. Além disso, foi verificado que a variação da potência no painel estabelece um comportamento de crescimento que é duplicado quando é aplicado o valor de 0,1V na variável V_{ref} , além do

ΔT apresentar uma diferença muito pequena, tornando a escolha do valor de 0,1V pouco atrativa.

Nota-se também que, para um mesmo valor de variação na razão cíclica, os valores de tempo de estabilização vão ser maiores para um maior valor de *step* de radiação, sendo assim uma situação ideal de operação um dia ensolarado com baixa formação de nuvens, evitando o sombreamento do sistema e, conseqüentemente, a redução da incidência de radiação. Ademais, a situação em que foi observado que o algoritmo levou o maior tempo para alcançar um novo valor estável de tensão de referência foi para o ensaio de degrau de carga de 50%, com ΔV_{ref} em 0,025V, sendo este um cenário pouco interessante em relação aos outros resultados quando avaliado o tempo de estabilização.

5 CONCLUSÃO GERAL

A crescente busca por fontes alternativas de energia tem incentivado cada vez mais o uso de sistemas solares fotovoltaicos no Brasil e no mundo. Diante deste cenário, surge a proposta do trabalho que avalia o funcionamento do método MPPT P&O no conversor *boost* de alto ganho conectado a um sistema fotovoltaico. Foram analisados o princípio de funcionamento, equações e formas de onda, obtidas em simulação para que fosse validada a abordagem teórica explanada ao longo dos capítulos.

Com o objetivo de comprovar a eficácia do algoritmo desenvolvido, fez-se necessário a elaboração do projeto do conversor *boost* de alto ganho, conforme os equacionamentos e parâmetros de projeto desenvolvidos em Henn (2008). No *software* PSIM, amplamente utilizado no presente trabalho para o estudo do comportamento do sistema, o emprego da ferramenta *Solar Module (physical model)* foi essencial para a obtenção dos critérios do modelo físico do painel fotovoltaico. Vale ressaltar que tal modelo possibilita a aplicação de variações na radiação incidente e temperatura ambiente durante a operação.

Para a legitimação do funcionamento adequado do conversor, foram realizadas simulações no *software* PSIM com os valores aplicados aos componentes do circuito de acordo com os resultados obtidos no dimensionamento do projeto, sendo possível verificar que o conversor opera próximo aos valores teóricos encontrados, apresentando baixos percentuais de erro relativo. O ganho estático mostrou que a elevação de tensão é realizada efetivamente, de acordo com o esperado.

Para a avaliação do desempenho estático do algoritmo MPPT P&O desenvolvido, observou-se que o *softstart* apresentou o funcionamento correto, garantindo que os elementos magnéticos do circuito fossem carregados controladamente para evitar situações de sobretensão sobre os semicondutores. Notou-se ainda que o erro entre os valores projetado e simulado de potência gerada pelo painel fotovoltaico fica em torno de 0,03% para um incremento ou decremento de 0,025V.

Já para a avaliação do desempenho dinâmico, o algoritmo desenvolvido mostrou-se apto para o rastreamento do ponto de máxima potência dentro de variações de radiação, temperatura e carga durante a operação do sistema. Os valores de tempo de estabilização da potência do sistema obtidos na ocorrência de tais variações foram satisfatórios, além de que também foram avaliados os valores de ajuste aplicados na tensão de referência, com o intuito de encontrar a melhor opção a ser implementada. Os valores de incremento ou decremento na tensão de referência foram submetidos à análise dentro dos ensaios de radiação, temperatura e degrau de carga, levando em consideração não apenas a velocidade em que o algoritmo atinge

uma nova estabilização, mas também a variação de potência gerada pelo painel. Dessa forma, a partir da discussão realizada ao longo do capítulo 4, conclui-se que o valor mais adequado para o ΔV é de 0,075V, de maneira geral, visto que as respostas alcançadas para esse caso foram bastante atrativas.

Por fim, sugere-se como trabalhos futuros a aplicação do algoritmo MPPT Perturbe e Observe em outros modelos de conversores ou a implementação de outros métodos MPPT, sejam eles diretos ou indiretos, para que possa ser avaliado e comparado o seu funcionamento com a técnica P&O. Outra contribuição seria a aplicação do algoritmo desenvolvido em cargas não-lineares, como motores, conversores CC-CA, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008.
- ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Parte III Fontes não-renováveis: derivados de petróleo**.
- AZEVEDO, G. M. DE S. **Sistema de Conversão de Energia Fotovoltaica com Compensação Baseada em Corrente e Tensão Sistema de Conversão de Energia Fotovoltaica com Compensação Baseada em Corrente e Tensão**. 2007.
- BARRETO, R. L. **Contribuições ao Método de Rastreamento de Máxima Potência Para Sistemas Fotovoltaicos**. p. 85, 2014.
- BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: O desafio da integração de políticas públicas. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 98, p. 167–186, 2020.
- GIULIA, A.; COUTINHO, D.; AURÉLIO, O. M. **Células solares**. 2015.
- GOMES, A. C. et al. Princípio de Funcionamento do Método Perturba e Observa (P&O) para rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) em Sistemas Fotovoltaicos utilizando o Conversor Boost. **VI Simpósio de Controle e Automação do Sul da Bahia**. November, p. 7, 2016.
- HENN, G. A. L. et al. A novel bidirectional interleaved boost converter with high voltage gain. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, p. 1589–1594, 2008.
- HENN, G. A. L. **Conversor Boost Bidirecional de Alto Ganho Aplicado a um Sistema Fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, p. 156. 2008.
- IEA (2020), **Solar PV**, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- JANTSCH, M. et al. **Measurement of PV Maximum Power Point Tracking Performance**. 1997.
- KEMERICH, P. D. DA C. et al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 241, 2016.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. D. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário-o Projeto Swera (Solar energy resources assesment using geostationary satellites in brazil-Swera Project). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, n. 2, p. 145–159, 2004.
- PRACA, P. P. et al. High voltage gain single stage DC-DC converter based on three-state commutation cell. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, n. June 2015, p. 2882–2887, 2013.
- RICCI, M. M. et al. **Comparação De Técnicas De MPPT Para Um Sistema Fotovoltaicos Com Dois Arranjos Utilizando o Software PSIM**. p. 1–6, 2015.

SCHMITZ, L. et al. **Conversor Cc-Cc De Alto Ganho Baseado No Conversor Ćuk Com Indutor Acoplado E Multiplicadores De Tensão**. p. 267–276, 2019.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, p. 222, 2009.