



Ministério da Educação
Universidade Federal de Ouro Preto
ICEA - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



COMPARAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC PARA OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DO RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA

GABRIEL ANTÔNIO BARROS DA MATA

João Monlevade MG
2025

GABRIEL ANTÔNIO BARROS DA MATA

**COMPARAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC PARA
OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DO
RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Caio Meira Amaral da Luz

João Monlevade - MG
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M425c Mata, Gabriel Antônio Barros da.

Comparação de conversores cc-cc para otimização da geração de energia solar fotovoltaica através do rastreamento da máxima potência. [manuscrito] / Gabriel Antônio Barros da Mata. - 2025.

43 f.: il.: color..

Orientador: Prof. Dr. Caio Meira Amaral da Luz.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Circuitos elétricos. 2. Conversores de corrente elétrica. 3. Eletrônica de potência. 4. Engenharia elétrica. 5. Energia solar. 6. Geração de energia fotovoltaica. 7. Sistemas de energia elétrica. I. Luz, Caio Meira Amaral da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Antônio Barros da Mata

Comparação de Conversores CC-CC Para Otimização da
Geração de Energia Solar Fotovoltaica Através do
Rastreamento da Máxima Potência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 11 de Abril de 2015

Membros da banca

Dr. Caio Meira Amaral da Luz - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto - DECAT)
Dr. Welbert Alves Rodrigues - (Universidade Federal de Ouro Preto - DEELT)
Dr. Rodrigo Cassio de Barros - (Universidade Federal de Ouro Preto - DEELT)

Dr. Caio Meira Amaral da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de
Conclusão de Curso da UFOP em 15/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Caio Meira Amaral da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/04/2025,
às 13:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0896873** e o código CRC **39EE43F9**.

Este trabalho é dedicado a todos que fizeram parte do meu desenvolvimento.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo o suporte necessário e compreensão ao longo dessa jornada. Sem o suporte que sempre recebi, este trabalho não seria possível. Aos meus amigos, em especial ao Giovane Oliveira Vasconcellos e aos demais, Arthur, Lúcio, Ruan, Diogo, Christian, Wesley e todos que compartilharam comigo os desafios e as conquistas desta fase. Cada conversa, apoio e incentivo foi fundamental para seguir em frente e superar as dificuldades. Aos professores e profissionais que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Agradeço pelas valiosas orientações, pelo conhecimento transmitido e por terem acreditado no meu potencial. Este trabalho é fruto de uma caminhada que não trilhei sozinho, e a todos que fizeram parte dela, minha mais profunda gratidão.

*O talento resulta em notoriedade.
O esforço resulta em melhoria. A
constância resulta em excelência.
(Gabriel A.B. Mata)*

Resumo

No âmbito da transição energética, a eficiência na conversão de energia é vital. Este estudo foca na otimização da conversão de energia solar fotovoltaica em sistemas elétricos de potência, investigando diversas topologias de conversores chaveados, como *buck*, *boost*, *buck-boost*, *SEPIC*, *Cuk*, em conjunto com o algoritmo de Rastreamento de Ponto de Máxima Potência (MPPT) Perturba e Observa (P&O), as topologias serão simuladas pelo software PSIM. A análise abrange aspectos como eficiência de conversão, resposta transitória e estabilidade de cada topologia de conversor, proporcionando uma compreensão do desempenho dessas configurações. Os resultados deste estudo fornecerão orientações precisas para a seleção criteriosa de conversores chaveados e algoritmos MPPT, visando à integração eficaz de fontes de energia limpa em sistemas elétricos de potência. Além disso, esta pesquisa contribui significativamente para o avanço da eficiência e sustentabilidade na geração de energia renovável, promovendo um impacto positivo no cenário energético global e demonstrando a viabilidade técnica dessas soluções em larga escala.

Palavras-chave: Potência, MPPT, Conversores CC-CC.

Abstract

In the context of the energy transition, conversion efficiency is vital. This study focuses on optimizing the conversion of photovoltaic solar energy in electric power systems by investigating various switched converter topologies, such as buck, boost, buck-boost, SEPIC, and Cuk, in conjunction with the Perturb and Observe (P&O) Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. The topologies will be simulated using PSIM software. The analysis covers aspects such as conversion efficiency, transient response, and stability of each converter topology, providing a comprehensive understanding of their performance. The results of this study will offer precise guidelines for the careful selection of switched converters and MPPT algorithms, aiming for the effective integration of clean energy sources into electric power systems. Furthermore, this research significantly contributes to advancing efficiency and sustainability in renewable energy generation, promoting a positive impact on the global energy landscape and demonstrating the technical feasibility of these solutions on a large scale.

Keywords: Power, MPPT, DC-DC Converters.

Lista de figuras

Figura 1 – Célula, módulo e matriz FV.	3
Figura 2 – Modelo de uma célula FV representado com um diodo.	4
Figura 3 – Curva I-V e PV do módulo FV.	6
Figura 4 – Curva I-V.	6
Figura 5 – Região de não-operação do ponto de máxima potência para o conversor <i>buck</i>	7
Figura 6 – Região de não-operação do ponto de máxima potência para o conversor <i>boost</i>	8
Figura 7 – Região de operação do ponto de máxima potência para os conversores <i>buck-boost</i> , <i>cúk</i> e <i>sepic</i>	10
Figura 8 – fluxograma básico do método P&O modificado.	13
Figura 9 – Eficiências teoricamente calculadas.	15
Figura 10 – Conversor buck simulado via PSIM.	18
Figura 11 – Oscilação de tensão projetada: 0,377V.	18
Figura 12 – Oscilação de corrente projetada: 0,287A.	19
Figura 13 – Conversor boost simulado via PSIM.	20
Figura 14 – Oscilação de tensão projetada: 0,247V.	21
Figura 15 – Oscilação de corrente projetada: 0,287A.	21
Figura 16 – Conversor buck-boost simulado via PSIM.	23
Figura 17 – Oscilação de tensão projetada: 0,442V.	23
Figura 18 – Oscilação de corrente projetada: 0,283A.	24
Figura 19 – Conversor <i>cúk</i> simulado via PSIM.	26
Figura 20 – Oscilação de tensão projetada: 0,0787V.	27
Figura 21 – Oscilação de corrente projetada: 0,0125A.	27
Figura 22 – Conversor SEPIC simulado via PSIM.	28
Figura 23 – Oscilação de tensão projetada: 0,877V.	29
Figura 24 – Oscilação de corrente projetada: 0,281A.	29
Figura 25 – Modelo de um módulo FV operando com o algoritmo P&O.	31
Figura 26 – Conjunto módulo FV + Conversor <i>buck</i> simulado via PSIM.	32
Figura 27 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor <i>buck</i> simulado via PSIM.	33
Figura 28 – Conjunto módulo FV + Conversor <i>boost</i> simulado via PSIM.	34
Figura 29 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor <i>boost</i> simulado via PSIM.	35
Figura 30 – Conjunto módulo FV + Conversor <i>buck-boost</i> simulado via PSIM.	35
Figura 31 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor <i>buck-boost</i> simulado via PSIM.	36
Figura 32 – Conjunto módulo FV + Conversor <i>cúk</i> simulado via PSIM.	37
Figura 33 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor <i>Cúk</i> simulado via PSIM.	38
Figura 34 – Conjunto módulo FV + Conversor <i>SEPIC</i> simulado via PSIM.	38
Figura 35 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor <i>SEPIC</i> simulado via PSIM.	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de comparativo entre conversores.	14
Tabela 2 – Características elétricas do módulo KM(P) 50.	16
Tabela 3 – Comparação dos Tempos de Estabilização e da Potência Gerada para Cada Conversor CC-CC.	40

Lista de abreviaturas e siglas

P&O	Perturbe e Observe
IC	Condutância Incremental
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PV	<i>Photovoltaic</i>
FV	Fotovoltaica
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
UFV	Central Geradora Fotovoltaica
MPP	Ponto de Máxima Potência
PSIM	Power Simulation Software
STC	<i>Standard Test Condition</i>

Lista de símbolos

V_s	Tensão de entrada
k	Ciclo de trabalho
f	Frequência de chaveamento
L	Indutância
C	Capacitância
R	Resistência de carga
ΔI	Oscilação de corrente
ΔV_c	Oscilação de tensão
I_L	Corrente no indutor
P_{max}	Potência máxima
V_{mpp}	Tensão no ponto de máxima potência
I_{mpp}	Corrente no ponto de máxima potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
I_{SC}	Corrente de curto-circuito

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivos Específicos	2
1.2	Organização Textual	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Sistemas Fotovoltaicos	3
2.2	Conversores <i>cc-cc</i>	7
2.2.1	Conversor <i>buck</i>	7
2.2.2	Conversor <i>boost</i>	8
2.2.3	Conversor <i>buck-boost</i>	9
2.2.4	Conversor <i>Cúk</i>	11
2.2.5	Conversor <i>SEPIC</i>	11
2.3	Técnica de rastreamento da máxima potência	12
2.4	Conclusões preliminares	14
3	Dimensionamento dos conversores <i>cc-cc</i>	16
3.1	Especificações do módulo FV	16
3.2	Dimensionamento do conversor <i>buck</i>	16
3.2.1	Resultados da Simulação do conversor <i>buck</i>	18
3.3	Dimensionamento do conversor <i>boost</i>	19
3.3.1	Resultados da Simulação do conversor <i>boost</i>	20
3.4	Dimensionamento do conversor <i>buck-boost</i>	22
3.4.1	Resultados da Simulação do conversor <i>buck-boost</i>	22
3.5	Dimensionamento do conversor <i>cúk</i>	24
3.5.1	Resultados da Simulação do conversor <i>cúk</i>	26
3.6	Dimensionamento do conversor <i>SEPIC</i>	28
3.6.1	Resultados da Simulação do conversor <i>SEPIC</i>	28
3.7	Considerações finais do capítulo	30
4	Simulações computacionais	31
4.1	Modelo computacional	31
4.2	Conversor <i>buck</i>	32
4.3	Conversor <i>boost</i>	33
4.4	Conversor <i>buck-boost</i>	35
4.5	Conversor <i>cúk</i>	37
4.6	Conversor <i>SEPIC</i>	38
4.7	Análise Comparativa	40
4.8	Conclusão de final de capítulo	41

5	Conclusão	42
	Referências	43

1 Introdução

As energias renováveis têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento da sociedade moderna. Isso se deve, sobretudo, à crescente demanda por energia elétrica aliada à conscientização em relação às mudanças climáticas. Dentre a grande variedade de fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica (FV) tem ganhado grande notoriedade. Esta, por sua vez, é de fácil instalação e o custo por kW tem caído consideravelmente ao longo dos últimos anos (IRENA, 2023). No Brasil, especialmente, essa fonte energética ganhou visibilidade após a resolução 482 da ANEEL de 2012. Tal resolução representa um importante marco no contexto da geração distribuída. Dentre seus principais aspectos, destaca-se as diretrizes para conexão de fontes renováveis à rede elétrica bem como o sistema de compensação por parte das concessionárias.

Apesar dos aspectos positivos da energia solar FV, ressalta-se que esta ainda apresenta algumas desvantagens inerentes à tecnologia. Dentre estas, predomina a baixa eficiência de conversão oferecido por parte da célula fotovoltaica. A título de exemplo, módulos FV comerciais considerados de bom desempenho apresentam eficiência de conversão da ordem de 20% a 25% (IEA-PVPS, 2023). Essa baixa eficiência, por sua vez, pode ser ainda mais comprometida em decorrência das variações climáticas aos quais os módulos estão submetidos bem como em virtude do ponto de operação do mesmo. Nesse contexto, é essencial procurar por soluções a fim de extrair a máxima potência dos sistemas fotovoltaicos e atenuar o problema associado à baixa eficiência.

Uma solução amplamente adotada para extrair a máxima potência disponibilizada por sistemas FV é por meio do uso de conversores de potência. Nessa estratégia, um conversor $cc-cc$ é conectado após o módulo FV. Este, por sua vez, tem a capacidade de alterar a impedância da carga vista pelo módulo FV. Desse modo, é possível alterar o ponto de operação do sistema de modo a aloca-lo no ponto de operação referente à máxima potência do sistema FV. A determinação desse ponto é realizada por técnicas de rastreamento do ponto da máxima potência (*MPPT* – *Maximum Power Point Tracking*). Encontra-se na literatura uma ampla variedade de *MPPTs* dentre às quais destaca-se o perturba e observa (*P&O*) e a condutância incremental (*CI*). No que tange às topologias de conversores $cc-cc$ disponíveis, destaca-se o *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cúk* e *sepic*. Cada uma dessas topologias apresenta vantagens e desvantagens inerentes. Embora todas essas topologias sejam amplamente adotadas em diversos trabalhos acadêmicos, ainda não há um consenso em relação qual é mais adequada no contexto de sistemas FV.

1.1 Objetivos

Devido a ampla gama de conversores disponíveis na literatura, há uma falta de consenso no que se refere à escolha do conversor $cc-cc$ a ser adotado para realização de *MPPTs*. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo realizar uma análise qualitativa dos principais conversores $cc-cc$.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a velocidade na busca do *MPPT*;
- Investigar a resposta transitória dos sistemas diante de variações nas condições de operação;
- Analisar a estabilidade de cada configuração em cenários específicos de geração de energia solar fotovoltaica;
- Fornecer orientações para a seleção criteriosa de configurações de conversores para o algoritmo P&O;
- Fornecer material necessário para o projeto de conversores conforme a finalidade do trabalho, demonstrando sua viabilidade técnica;

1.2 Organização Textual

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos:

O capítulo 1 apresenta uma introdução detalhada, juntamente com os principais objetivos a serem alcançados. No capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente, destacando conteúdos inspiradores que embasam a criação deste trabalho. O capítulo 3 aborda o dimensionamento dos conversores utilizados juntamente à metodologia aplicada para cada conversor, e algoritmo de *MPPT* utilizado para o trabalho. No capítulo 4, aborda o projeto dos sistemas a serem comparados, e são realizados testes através do software PSIM, com a coleta de dados que serão posteriormente analisados. Os resultados obtidos durante essas coletas são discutidos ainda no capítulo 4, aplicando as teorias estudadas para determinar a melhor combinação de conversor *cc-cc* com o algoritmo *MPPT* utilizado sob uma mesma condição de trabalho. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho como também desenvolvimentos futuros deste estudo.

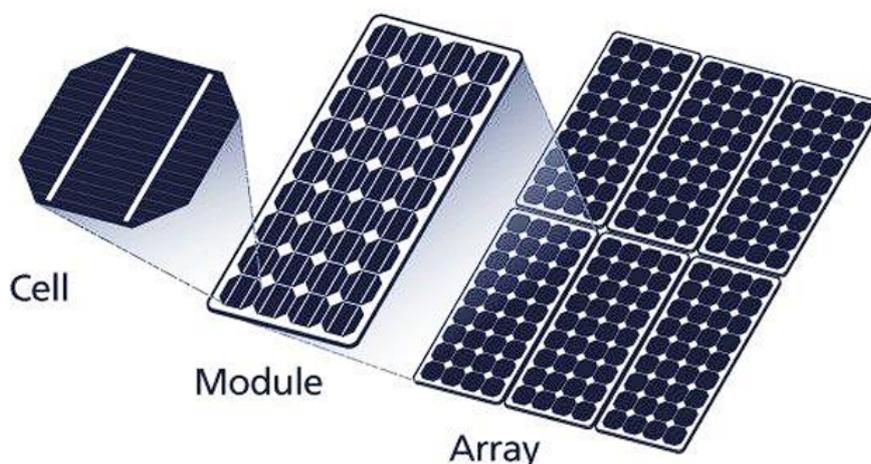
2 Revisão Bibliográfica

Nessa seção será realizada uma revisão bibliográfica dos principais conversores *cc-cc* não isolados, sendo estes: *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cúk* e *sepic*. Entretanto, tendo em vista que esses conversores serão inseridos no contexto de sistemas FV, uma breve revisão a respeito desse tema se faz necessário a fim de compreender alguns conceitos que serão mencionados ao longo da revisão.

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

A célula solar fotovoltaica, ilustrada na Figura 1, é a menor unidade do sistema FV. Ela realiza a conversão da radiação solar em energia elétrica por meio do fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (SAMPAIO, 2010). Esse fenômeno é explicado detalhadamente em (MARTINS; BARBI, 2006). Desse estudo, constata-se que a máxima tensão gerada pelas células é da ordem de 0,7 V. Logo, é essencial realizar a conexão em série dessas células a fim de alcançar tensões mais elevadas. Normalmente, as conexões entre as células são realizadas pelos próprios fabricantes que, por sua vez, também realizam seu encapsulamento originando assim os módulos FV. A tensão gerada pelos módulos depende, sobretudo, da quantidade de células conectadas em série. Atualmente, encontram-se módulos com 60, 72 e 144 células em série (MORAES, 2018). Dessa forma, os valores típicos de tensão em circuito aberto (V_{oc}) variam entre aproximadamente 35 V e 50 V, podendo ultrapassar 55 V em alguns modelos mais recentes. Esses níveis de tensão ainda são baixos para aplicações residenciais e comerciais. Como consequência, esses módulos podem ser conectados em série e paralelo originando assim as matrizes/arranjos fotovoltaicos.

Figura 1 – Célula, módulo e matriz FV.



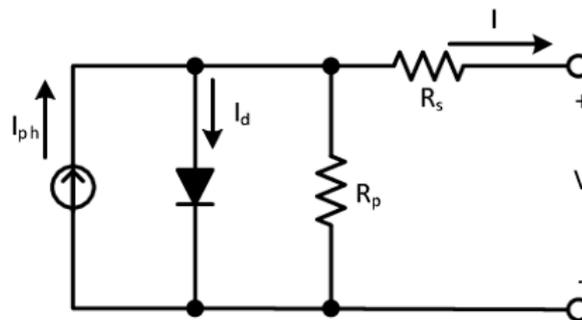
Fonte: AFROUZI, Hadi. et al, 2013

A Figura 1 ilustra, de forma didática, os três níveis de agrupamento das células fotovoltaicas: a célula individual (menor unidade de conversão da energia solar em elétrica), o módulo

(composto por diversas células interligadas em série e encapsuladas pelo fabricante) e, por fim, a matriz ou arranjo fotovoltaico (resultado da conexão em série e/ou paralelo de múltiplos módulos). Observa-se que a célula sozinha gera uma tensão da ordem de 0,7 V, sendo necessário agrupá-las para se obter tensões mais elevadas, o que justifica a formação dos módulos. Quando a aplicação requer níveis de tensão ainda maiores, vários módulos são conectados, formando assim a matriz fotovoltaica capaz de suprir demandas residenciais ou comerciais.

Como em qualquer dispositivo de conversão de energia elétrica, é fundamental conhecer as relações entre tensão, corrente e potência. Para isso, faz-se necessário um circuito elétrico equivalente capaz de modelar o comportamento da célula ou módulo FV. Diversos modelos têm sido propostos desde o seu descobrimento. Entretanto, o que mais se destaca na literatura é o modelo popularmente conhecido como modelo com um diodo, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo de uma célula FV representado com um diodo.



Fonte: HART, 2021

Para determinar a relação entre tensão V e a corrente I nos terminais do módulo fotovoltaico, deve-se aplicar a lei de *Kirchhoff* das correntes ao nó principal do circuito elétrico equivalente. Isso resulta na seguinte expressão:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1)$$

Conforme explicado em (HART, 2021), essa equação (1) ainda pode ser expressada em função de cada termo que influencia as correntes. Logo, a expressão geral que rege o funcionamento dos módulos é dada pela equação x.

$$I = \frac{S}{S_{ref}} [I_{phref} + K_I(T - T_{ref})] - I_o \left[e^{\left(\frac{V + R_S I}{n_s a V_t} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S I}{R_p} \right) \quad (2)$$

Em que:

S – Irradiância (W/m^2);

S_{ref} – Irradiância de referência (1000 W/m²), em STC ; ¹

I_{phref} – Corrente fotogerada pela célula em STC;

K_I – Coeficiente da corrente de curto-circuito (A/K);

T – Temperatura da célula (K);

T_{ref} – Temperatura de referência (298,15 K);

I_0 – Corrente de saturação reversa do diodo (A);

V_t – Tensão térmica (V);

a – Fator de idealidade;

n_s – número de células em série.

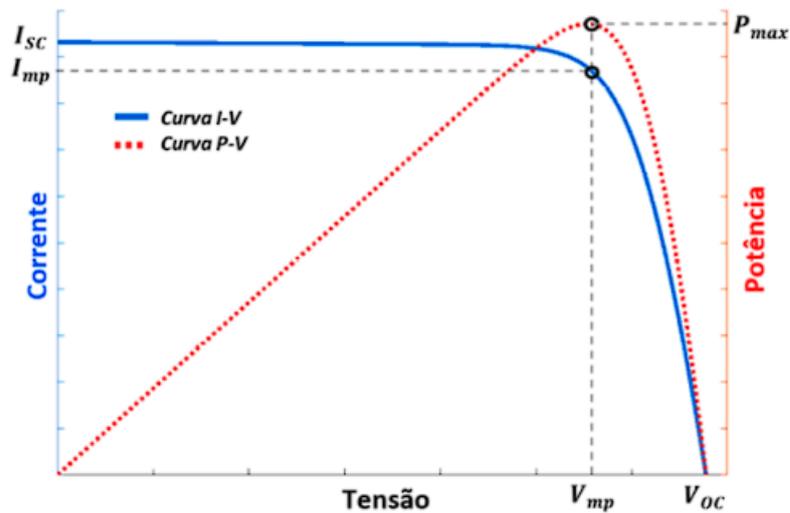
Observa-se claramente que a equação (2) relaciona a tensão e a corrente dos terminais do módulo fotovoltaico. Para realizar a construção gráfica dessa expressão, faz-se necessário todos os demais termos da equação. Esses parâmetros podem ser encontrados no *datasheet* do módulo avaliado. Entretanto, salienta-se que cinco parâmetros não são fornecidos pelos fabricantes. São estes: I_{phref} , I_0 , a , R_S e R_p . Além disso, observa-se que essa é uma equação transcendental. Logo, para determinar todos os parâmetros da equação, é necessário recorrer a métodos numéricos iterativos.

Após determinar todos os parâmetros faltantes, pode-se realizar a construção gráfica do módulo fotovoltaicos. Uma típica curva I-V e P-V de um módulo fotovoltaico é ilustrado na Figura 3. Dessa curva, destaca-se cinco pontos importantes devem ser mencionados:

- Corrente de curto circuito I_{SC} – Corrente quando os terminais do módulo fotovoltaico são curto circuitados. Representa a máxima corrente que o módulo pode gerar para uma dada condição climática;
- Corrente de máxima potência I_{mpp} – É a corrente referente ao ponto em que o módulo gera a máxima potência;
- Tensão de circuito aberto V_{oc} – É a tensão do módulo quando seus terminais estão em aberto. Representa a máxima tensão que pode ser gerada pelo módulo;
- Tensão de máxima potência V_{mpp} – É a tensão referente ao ponto de máxima potência;
- Máxima potência P_{max} – É a máxima potência que pode ser gerada pelo módulo em uma dada condição climática.

¹ STC ou (*Standard Test Conditions*), em português, Condições de Teste Padrão, trata-se de uma padronização adotada por cientistas e fabricantes no qual considera-se S=1000 W/m², T=25 °C e 1,5 AM.

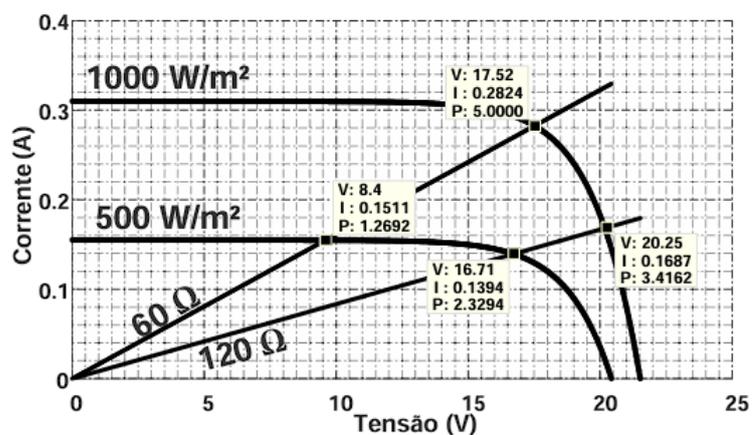
Figura 3 – Curva I-V e PV do módulo FV.



Fonte: TAGHVAEE; RADZI, 2013

Outro aspecto importante a ser mencionado diz respeito ao ponto de operação do sistema solar FV. Para tanto, a carga conectada aos terminais do sistema FV exerce um papel importante nesse aspecto. A título de exemplo, a Figura 4 ilustra a curva I-V do sistema fotovoltaico bem como a reta de carga da resistência que é conectada aos seus terminais. O ponto de interseção entre as duas determina o ponto de operação do sistema. Logo, constata-se que diferentes valores de carga proporcionam diferentes pontos de operação. Uma maneira automática de obter essa variação de carga é por meio de conversores *cc-cc* que será discutido nas próximas seções.

Figura 4 – Curva I-V.



Fonte: TAGHVAEE; RADZI, 2013

Dessa forma, conclui-se que a organização das células em módulos e, posteriormente, em matrizes fotovoltaicas, é fundamental para se obter tensões e potências adequadas às aplicações residenciais ou comerciais.

Na Figura 3, observa-se um esquema simplificado do circuito de interligação, evidenciando como os módulos podem ser organizados em série e paralelo para elevar tensão e corrente conforme necessário. Já na Figura 4, é possível visualizar um exemplo prático de implementação, no qual se destacam os componentes de proteção e controle, além de evidenciar a forma como os módulos são instalados fisicamente, garantindo tanto a segurança quanto a eficiência da captação solar.

2.2 Conversores *cc-cc*

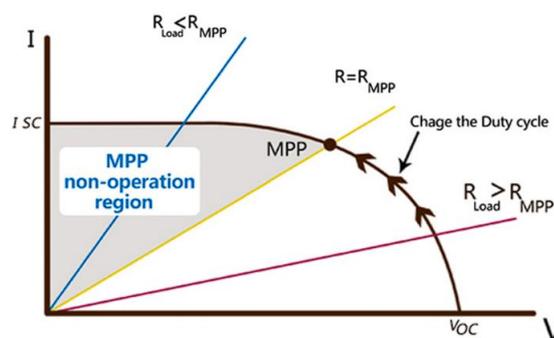
A seguir serão abordados os conversores que serão utilizados ao longo do projeto, sendo eles: *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cúk* e *sepic*.

2.2.1 Conversor *buck*

No conversor *buck*, ou abaixador, a magnitude da tensão de saída é sempre menor que a da magnitude da tensão de entrada. Entretanto, a fim de obedecer ao princípio da conservação da energia, a corrente de saída deve ser sempre maior que a corrente de entrada. Logo, essa topologia pode ser usada para realizar a conexão de séries FV de elevada tensão para baterias de baixa tensão. Seja R_i a impedância conectada a entrada do conversor *cc-cc*. Por meio da variação do ciclo de trabalho, D_i , pode-se alterar o valor de R_i a fim de se aproximá-la da resistência ótima R_{mpp} . Já que D_i varia em um intervalo entre $[0,1]$, o conversor *buck* não pode obter valores de resistências que sejam menores que a resistência de carga. Portanto, pontos de operação próximos à corrente de curto circuito I_{SC} não são alcançáveis. Ou seja, esse conversor opera apenas com $R_{carga} > R_{mpp}$.

A Figura 5 mostra que o conversor *buck* não consegue operar em regiões próximas à corrente de curto circuito. Logo, quando essa topologia é usada a fim de rastrear a máxima potência, o rastreamento é limitado à região descrita.

Figura 5 – Região de não-operação do ponto de máxima potência para o conversor *buck*.



Fonte: RASHID, 2001

A Figura 5 evidencia a limitação do conversor *buck* em operar em regiões próximas à

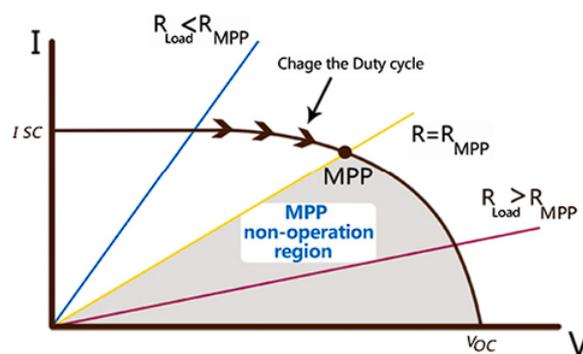
corrente de curto-circuito (I_{sc}) do módulo fotovoltaico. Isso ocorre porque, ao variar o ciclo de trabalho (D) apenas entre 0 e 1, a impedância de entrada (R_i) não pode assumir valores menores que a resistência de carga (R_{carga}). Em outras palavras, o conversor fica restrito a operar em pontos onde R_{carga} é maior que a resistência ótima (R_{mpp}), inviabilizando a aproximação de correntes elevadas. Dessa forma, quando essa topologia é utilizada para rastrear o ponto de máxima potência, há uma “região de não-operação” – próxima à I_{sc} – que não pode ser alcançada, como ilustrado na Figura 5.

2.2.2 Conversor *boost*

No conversor *boost* ou elevador, a magnitude da tensão de saída é sempre maior que a magnitude da tensão de entrada (RASHID, 2001), portanto, esta topologia pode ser usada para conectar altas tensões de carga e baixas tensões de módulo FV. Como é teorizado sobre a taxa de conversão de resistência do conversor *buck*, porque o valor do ciclo de trabalho está entre [0,1], um conversor *boost*

não pode refletir impedâncias maiores que a impedância de carga e, portanto, não atinge valores próximos à tensão de circuito aberto do módulo (ENRIQUE, 2005), ou seja, o conversor *boost* opera somente se $R_{load} \leq R_{mpp}$.

Figura 6 – Região de não-operação do ponto de máxima potência para o conversor *boost*.



Fonte: RASHID, 2001

A Figura 6 mostra o conversor *boost* não seguindo os pontos da curva próximos à tensão de circuito aberto, e quando o conversor *boost* for utilizado como *MPPT*, o *MPP* será rastreado como se estivesse restrito dentro da região de operação (TAGHVAEE; RADZI, 2013).

Observe que sob condições de baixa irradiação, um conversor *boost* não pode rastrear *MPP* porque o ponto está na região não operacional.

A figura 6 mostra que o conversor *boost* não consegue operar em regiões próximas à tensão de circuito aberto. Logo, quando essa topologia é usada a fim de rastrear a máxima potência, o rastreamento é limitado à região descrita.

A Figura 6 ilustra a “região de não-operação” do conversor *boost*, evidenciando que, por refletir sempre uma impedância menor ou igual à resistência de carga (em virtude do ciclo de trabalho variar apenas entre 0 e 1), essa topologia não consegue operar em pontos próximos à tensão de circuito aberto (V_{oc}) do módulo fotovoltaico. Em outras palavras, o conversor *boost* não atinge valores de tensão que superem significativamente a tensão de carga, impossibilitando o rastreamento do ponto de máxima potência (*MPP*) quando este se encontra em regiões de tensão elevadas (próximas à V_{oc}). Além disso, em condições de baixa irradiação, o *MPP* tende a deslocar-se justamente para essa faixa de tensão mais alta, de modo que o conversor *boost* não consegue acompanhá-lo. Assim, quando utilizado para fins de *MPPT*, o conversor *boost* fica restrito a uma faixa operacional limitada, como ilustrado na Figura 6.

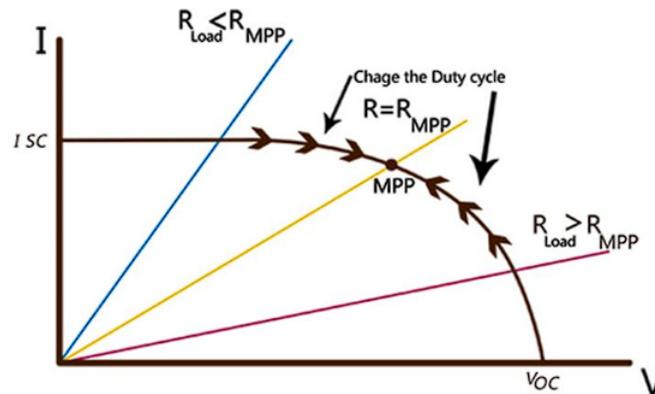
2.2.3 Conversor *buck-boost*

Em conversores *buck-boost*, *step-up/down* ou bidirecionais, a magnitude da tensão de saída pode ser menor ou maior que a magnitude da tensão de entrada (RASHID, 2001), portanto, esta topologia pode ser usada na conexão de baterias quase compatíveis ou tensões de carga e módulo. Uma saída negativa também resulta do terminal comum da corrente de entrada.

A topologia *buck-boost* pode ser alcançada através da conexão em cascata dos dois conversores básicos (conversor *buck* e conversor *boost*). A relação de conversão de tensão de saída-entrada é a relação de conversão dos dois conversores em cascata quando as chaves em ambos os conversores têm o mesmo ciclo de trabalho. A taxa de conversão *buck-boost* obtida através do conversor *buck* no primeiro estágio resulta em um conversor *buck-boost* em cascata. Um conversor *boost* no primeiro estágio forma um conversor *boost-buck* em cascata. A principal diferença entre ambas as configurações é o menor número de dispositivos no conversor *buck-boost* em cascata (DURAN, 2008).

A Figura 7 mostra o ponto de operação do módulo fotovoltaico determinado pela intersecção das curvas de carga e geração. A taxa de conversão de resistência do conversor *buck-boost* (ver Tabela XX) mostra que aumentar D diminui a impedância de entrada R_i , portanto, a tensão operacional *PV* se move para a região esquerda da curva $I - V$, e que diminuir D aumenta R_i , portanto, a tensão operacional move-se para a direita da curva $I - V$. O conversor *buck-boost*, portanto, não possui uma zona não operacional, portanto, a alteração do ciclo de trabalho permite a operação de corrente de curto-circuito para tensão de circuito aberto. A topologia também é a única capaz de rastrear a resistência da carga, que varia de zero a infinita.

Figura 7 – Região de operação do ponto de máxima potência para os conversores *buck-boost*, *cúk* e *sepic*.



Fonte: RASHID, 2001.

A Figura 7 ilustra o ponto de operação do módulo fotovoltaico determinado pela interseção das curvas de carga e de geração, evidenciando a ampla faixa operacional do conversor *buck-boost* (bem como de topologias análogas, como *Cúk* e *SEPIC*). Nesse esquema, o ciclo de trabalho (D) pode variar de 0 a 1, alterando a impedância de entrada (R_i) de forma contínua: ao aumentar D , R_i diminui, deslocando o ponto de operação para a região de maiores correntes (à esquerda da curva $I-V$), enquanto a redução de D faz R_i crescer, movendo o ponto de operação em direção a tensões mais altas (à direita da curva $I-V$). Essa característica elimina a “zona de não-operação” observada em conversores puramente *buck* ou *boost*, permitindo que o conversor *buck-boost* opere desde a corrente de curto-circuito até a tensão de circuito aberto. Além disso, por poder tanto elevar quanto reduzir a tensão, essa topologia se mostra especialmente versátil, sendo capaz de rastrear a resistência de carga em toda sua faixa de variação (de zero até valores infinitos) e, assim, capturar o ponto de máxima potência (MPP) em diferentes condições de irradiação e carga.

Como trabalhar em MPP é o objetivo principal da operação, e o ponto MPP pode ser configurado em qualquer lugar da curva $I-V$, a topologia do conversor *buck-boost* é a única que permite o acompanhamento do MPP para o módulo FV independentemente de temperatura, irradiação e carga conectada, mas a corrente de entrada da topologia *buck-boost* é sempre descontínua (porque a chave está em série com o gerador), portanto a corrente tem muitos componentes harmônicos produzindo alta ondulação de entrada e problemas de ruído significativos. Esses conversores são, portanto, mais complexos e caros (FELIPE, 2018). As principais desvantagens desta topologia são notavelmente a alta ondulação da tensão de entrada e as altas tensões elétricas no comutador. Foram publicados trabalhos de pesquisa que tentam aumentar o uso de conversores *buck-boost* e sua estratégia de controle em sistemas $MPPT$, assim como investigações sobre como os conversores *buck-boost* afetam o desempenho do sistema (COELHO et al., 2009).

2.2.4 Conversor *Cúk*

O conversor *cúk* é um conversor *cc-cc* que funciona como um conversor *buck-boost*, capaz de aumentar ou diminuir a tensão de entrada com polaridade reversa através do terminal comum. (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2004) Esta topologia pode ser usada para conectar baterias ou cargas quase correspondentes às tensões do módulo.

A região de operação do conversor *cúk* no painel fotovoltaico é a mesma do conversor *buck-boost* (ver Fig. 7). Ambos os conversores não possuem zona não operacional, portanto, a alteração do ciclo de trabalho permite que eles operem através de corrente de curto-circuito para tensão de circuito aberto. A principal diferença entre o conversor *cúk* e as configurações *cc-cc* básicas é a adição de um capacitor e um indutor. O indutor L1 filtra a entrada *DC* (para evitar grandes harmônicos) e o capacitor C1 é o dispositivo de transferência de energia (ao contrário do indutor nas configurações básicas).

Uma vantagem importante desta topologia é a corrente contínua na entrada e saída do conversor; a varredura da característica $I - V$ é, portanto, mais confiável e o conversor é menos ruidoso (SOLODOVNIK et al., 2004). As desvantagens do conversor *cúk* são o alto número de componentes passivos e altas tensões elétricas na chave, diodo e capacitor C1.

Safari e Mekhilef usaram o conversor *cc-cc cúk* para extrair *MPP* do sistema fotovoltaico pelo método de controle direto. A principal diferença do sistema proposto para os sistemas *MPPT* existentes inclui a eliminação da malha de controle proporcional-integral e a investigação do efeito da simplificação do circuito de controle. Um DSP controlava a comutação dos IGBTs (SAFARI; MEKHILEF, 2011). Bae e Kwasinski propuseram um conversor *cúk cc-cc* de múltiplas entradas para *MPPT* para extrair energia máxima do painel fotovoltaico em qualquer clima. Este método fornece interface fonte de corrente e é capaz de aumentar e diminuir as tensões de entrada (BAE; KWASINSKI, 2009).

2.2.5 Conversor *SEPIC*

O conversor de indutor primário de extremidade única (*sepic*) é uma espécie de conversor *buck-boost* capaz de aumentar ou diminuir a tensão de entrada e pertence à classe de conversor que possui dois indutores. Possui a característica de não inversão dos conversores *buck-boost*. O conversor *sepic*, assim como o conversor *cúk*, possui a característica desejável de o terminal de controle da chave ser conectado ao terra; isso simplifica o circuito "*gate-drive*". Como mostra a Figura 5, o conversor opera via transferência de energia capacitiva (C1) e indutiva (L1), portanto os estresses de tensão em C1 são menores que aquelas no conversor *cúk*. O conversor também possui corrente de entrada não pulsante (CHUNG et al., 2003).

As correntes de entrada das topologias *cúk* e *sepic* são contínuas e podem extrair corrente sem ondulação de um painel fotovoltaico; isso é importante para um *MPPT* eficaz. A topologia *sepic*, entretanto, é aplicável apenas quando a tensão da bateria é superior à tensão do módulo

fotovoltaico (JIMENEZ-TORIBIO et al., 2009). O princípio do conversor *sepic* é baseado no conversor *buck-boost*, portanto suas características são as mesmas. O conversor *sepic* também não possui uma região não operacional no painel fotovoltaico (ver Fig. 8).

Duran et al. exemplificou a metodologia e um sistema experimental baseado em conversores *sepic* interligados para medição de curvas $I - V$ e $P - V$ de módulos fotovoltaicos. Para reduzir a ondulação da curva, foram utilizados quatro conversores *sepic* conectados em paralelo e modo de operação intercalado. O novo desenvolvimento proporcionou um novo nível de velocidade, portabilidade e facilidade de medição de potência de pico, tanto nos módulos quanto nos arranjos fotovoltaicos (DURAN, 2008).

Tse et al. apresentou uma nova técnica para extrair eficientemente a potência máxima de saída de um painel solar. Um conversor PWM *cc-cc sepic* ou *cúk* operando em modo indutor-corrente descontínuo ou modo tensão-capacitor combinou com a resistência de saída do painel injetando na frequência de chaveamento uma pequena variação de sinal senoidal. A capacidade de rastreamento foi verificada por um experimento com um painel solar de 10 W (TSE et al., 2002).

Chen et al. Para obter a conversão de energia da célula solar de alta eficiência, utilizou-se a placa de circuito conversor *sepic* e implementou-se a estratégia de controle *fuzzy* com o chip de controle dsPIC30F4011 (TA-TAU et al., 2011).

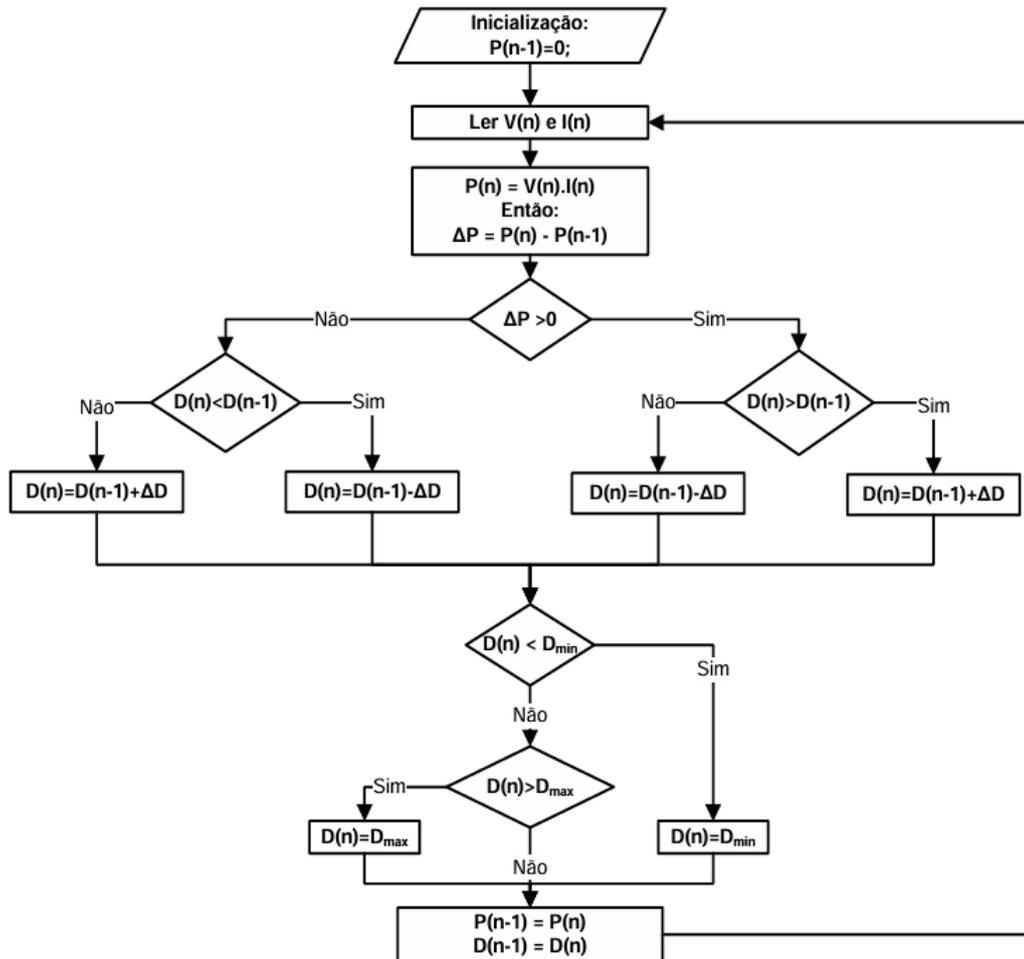
2.3 Técnica de rastreamento da máxima potência

Constata-se, na literatura, uma grande variedade de *MPPTs*. Dentre estas, pode-se mencionar a técnicas tradicionais, baseada em subida de colina, tal como: tensão constante, fração da tensão de circuito aberto, fração da corrente de curto circuito, perturba e observa (*P&O*), Condutância incremental (*CI*) e Beta e técnicas mais avançadas que se baseiam em inteligência artificial, lógica *fuzzy* e bioinspirados. Entretanto, salienta-se que a técnica mais usada para realizar o *MPPT* é o *P&O*. Dessa forma, será utilizado esse algoritmo nos estudos subsequentes. (ELGENDY; ZAHAWI; ATKINSON, 2012)

O método *P&O* opera periodicamente incrementando ou decrementando o ciclo de trabalho D que é aplicado ao conversor. Como consequência, a tensão de saída terminal do sistema FV é alterada. Em seguida, compara-se a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Caso a tensão varie e a potência aumente, o sistema de controle muda o ponto de operação naquela direção; caso contrário, muda o ponto de operação na direção oposta. Uma vez que o sentido para a variação da corrente é conhecido, a corrente é variada a uma taxa constante. Esta taxa é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a menor oscilação em regime permanente. O fluxograma básico do método é apresentado na figura 8. Este método necessita dos sensores de corrente e de tensão. (TAGHVAEE; RADZI, 2013)

Observa-se que o método P&O pode ser melhorado através da variação do passo de incremento da razão cíclica do conversor, de forma a otimizar a busca do MPP. Quando o passo é variável o método é denominado de P&O modificado. (FEMIA et al., 2005)

Figura 8 – fluxograma básico do método P&O modificado.



Fonte: DE BRITO, Moacyr, 2010.

A Figura 8 apresenta o fluxograma básico do método *P&O* modificado, evidenciando as etapas necessárias para o rastreamento do ponto de máxima potência (*MPP*). Inicialmente, medem-se a tensão e a corrente do módulo fotovoltaico, permitindo o cálculo da potência instantânea. Em seguida, essa potência é comparada com a potência medida no ciclo anterior para determinar se o ponto de operação deve continuar na mesma direção (incrementando ou decrementando o ciclo de trabalho *D*) ou inverter o sentido da variação.

No método *P&O* modificado, o passo de variação de *D* não é fixo, podendo ser ajustado em função da proximidade do *MPP*. Isso proporciona uma busca mais rápida e eficiente pelo ponto de máxima potência, pois, quando o sistema está distante do *MPP*, pode-se utilizar passos maiores para acelerar a convergência, e, ao se aproximar do *MPP*, a variação passa a ser menor, reduzindo as oscilações em regime permanente. Esse processo de ajuste contínuo, controlado pelo

fluxo de medições e cálculos descrito na figura, permite que o método *P&O* apresente melhor desempenho em diferentes

2.4 Conclusões preliminares

Comparando os principais tipos de conversores não isolados, conforme mencionado, os conversores *buck*, *boost*, *buck-boost* e *cúk* e *sepic* são classificados como os principais conversores não isolados em aplicações fotovoltaicas.

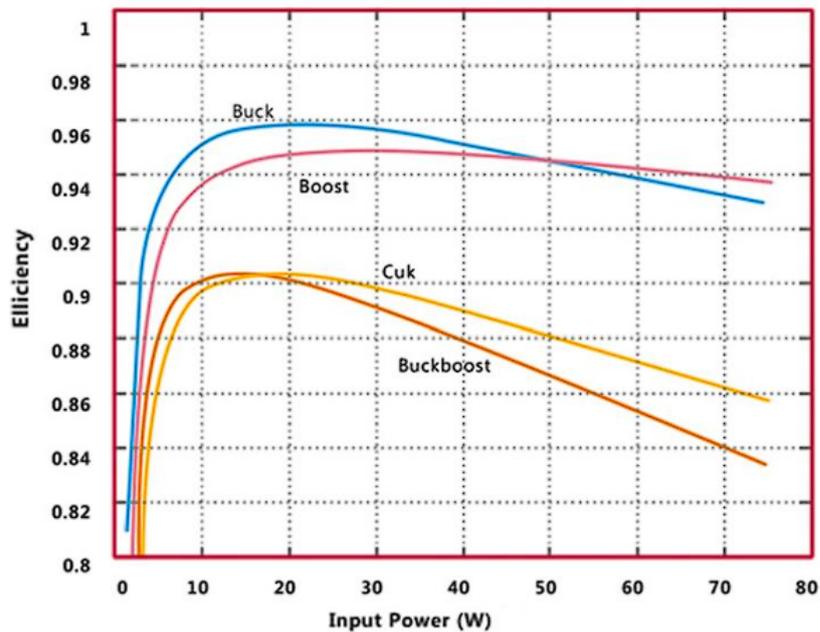
Tabela 1 – Tabela de comparativo entre conversores.

	Buck-Boost	Cúk	Buck-Boost Positivo	SEPIC
Polaridade da tensão de saída	Inversa	Inversa	Direta	Direta
Corrente de entrada	Pulsante	Não-pulsante	Depende do modo de operação	Não-pulsante
<i>Switch drive</i>	Flutuante	Flutuante	Um flutuante, o outro aterrado	Aterrado
Eficiência	Baixa	Média	Alta com apenas um estágio ativo	Média
Custo	Médio devido à flutuação do <i>Switch drive</i>	Médio devido ao bloco adicional de capacitor	Alto devido a um interruptor e diodo adicionais e um circuito de acionamento complexo	Médio devido ao bloco adicional de capacitor

Fonte: Adaptado de TAGHVAEE; RADZI, 2013.

Cada topologia de conversor possui algumas características específicas em termos de eficiência, capacidade de rastreamento, custo, etc. Com base nas informações teóricas apresentadas até o momento é determinado que em questão de eficiência o conversor *buck* se mantém superior aos conversores apresentados seguindo do conversor *boost*, e após os demais conforme:

Figura 9 – Eficiências teoricamente calculadas.



Fonte: (TAGHVAEE; RADZI, 2013).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre quatro topologias de conversores não isolados (*buck-boost*, *Cúk*, *buck-boost* positivo e *SEPIC*), destacando características como polaridade da tensão de saída, forma de corrente de entrada, tipo de acionamento do interruptor (*switch drive*), eficiência e custo. Observa-se que os conversores *buck-boost* e *Cúk* produzem uma tensão de saída de polaridade inversa, enquanto as configurações *buck-boost* positivo e *SEPIC* mantêm a polaridade direta. No quesito corrente de entrada, o *Cúk* e o *SEPIC* apresentam uma característica de corrente não-pulsante, o que pode reduzir ondulações e interferências no sistema de alimentação. Em relação ao acionamento do interruptor, tanto o *buck-boost* quanto o *Cúk* requerem um *drive* flutuante, já o *SEPIC* possui um interruptor aterrado, simplificando em parte o circuito de acionamento. Quanto à eficiência, o *buck-boost* tradicional tende a ser a mais baixa, enquanto o *buck-boost* positivo pode alcançar valores mais elevados quando bem projetado. Por fim, o custo de cada topologia varia de acordo com a complexidade do circuito (como o uso de capacitores adicionais ou interruptores extras) e a forma de acionamento necessária.

A Figura 9, por sua vez, ilustra as eficiências teoricamente calculadas dessas topologias, evidenciando que, de modo geral, o conversor *buck* tende a apresentar a maior eficiência, seguido pelo conversor *boost*. As demais topologias (*buck-boost*, *Cúk*, *SEPIC* e variações positivas de *buck-boost*) podem ter eficiências um pouco menores, dependendo do dimensionamento dos componentes, da qualidade dos semicondutores empregados e das condições de operação (tensão de entrada, carga, frequência de comutação etc.). Ainda assim, cada conversor possui vantagens específicas, como a capacidade de elevar ou abaixar a tensão e de manter polaridade direta ou inversa, o que torna a escolha final dependente da aplicação e dos requisitos de potência.

3 Dimensionamento dos conversores cc-cc

Após a revisão bibliográfica dos principais tipos de conversores cc-cc, faz-se necessários dimensiona-los a fim de usá-los nas simulações computacionais. Tendo em vista que o objetivo do trabalho é realizar uma análise comparativa dos conversores no rastreamento da máxima potência, algumas padronizações devem ser feitas visando realizar uma comparação justa. Para tanto, considera-se o mesmo módulo FV em todas as simulações bem como o mesmo nível de irradiância e temperatura. Logo, as tensões e correntes sempre serão as mesmas. Além disso, considera-se a mesma oscilação de corrente e tensão no dimensionamento de todos os conversores.

3.1 Especificações do módulo FV

Com o intuito de realizar o dimensionamento dos parâmetros dos conversores cc-cc, faz-se necessário, primeiramente, conhecer o módulo fotovoltaico ao qual esses conversores serão conectados. Para esse trabalho, utiliza-se o módulo KM(P) 50 da fabricante *Komaes Solar®* cuja as principais especificações estão listadas na Tabela 2. Salienta-se que esses valores são para situação em STC (*Standard Test Conditions*). Além disso, será usado o mesmo modelo em todas as situações analisadas.

Tabela 2 – Características elétricas do módulo KM(P) 50.

Especificações	Simbologia	Valor
Modelo KM(P) 50	–	–
Máxima potência	P_{max} (W)	10
Tensão de máxima potência	V_m (V)	17,74
Corrente de máxima potência	I_m (A)	2,84
Tensão de circuito aberto	V_{oc} (V)	21,56
Corrente de curto-circuito	I_{sc} (A)	3,04
Eficiência do módulo	η (%)	11,81
Número de células em série	n_s	36
Coefficiente de curto-circuito	K_I (A/K)	0,00033
Coefficiente de tensão	K_V (V/K)	-0,0731
Coefficiente de potência	%/K	-0,5

Fonte: Komaes Solar®.

3.2 Dimensionamento do conversor *buck*

O dimensionamento do conversor *buck* na Figura 10 foi realizado com base nos parâmetros operacionais do módulo, incluindo tensão e corrente de máxima potência, oscilação de corrente de 10%, oscilação de tensão de 5%, frequência de chaveamento de 100 kHz (MOSFET) e ciclo de trabalho de 0,5. Esses valores foram utilizados para garantir consistência na comparação entre diferentes conversores, proporcionando uma análise justa.

O dimensionamento do indutor foi obtido a partir da equação (3) que relaciona a oscilação de corrente (ΔI) com a tensão de entrada, o ciclo de trabalho e a frequência de chaveamento:

$$\Delta I = \frac{V_s k - (1 - k)}{fL} \quad (3)$$

Em que:

- ΔI : Oscilação da corrente (10% da corrente de máxima potência);
- V_s : Tensão de entrada;
- k : Ciclo de trabalho;
- f : Frequência de chaveamento do MOSFET;
- L : Indutância.

Ao aplicar os parâmetros especificados, o valor da indutância calculado foi de: $1,56e^{-4}H$.

Com o valor da indutância obtido, o próximo passo foi determinar a capacitância necessária para atender à oscilação de tensão desejada de 5%. A Equação (4), empregada neste cálculo, foi definida como:

$$\Delta V_c = \frac{V_s k - (1 - k)}{8LCf^2} \quad (4)$$

- ΔV_c : Oscilação da tensão (5% da tensão de entrada);
- C : Capacitância;

O valor da capacitância obtido foi de: $7,226e^{-7}F$.

Finalmente, para completar o projeto do conversor *buck*, foi calculada a resistência da carga acoplada à saída. A equação (5) utilizada para esse dimensionamento é determinada por:

$$2I_L = \frac{2kV_s}{R} \quad (5)$$

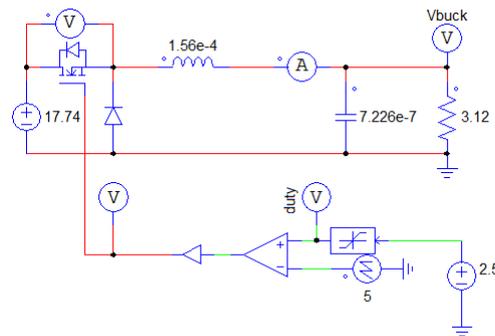
- I_L : Corrente no indutor;
- R : Resistência da carga.

A resistência calculada foi de: $3,12\Omega$

3.2.1 Resultados da Simulação do conversor *buck*

A simulação do conversor *buck* foi realizada utilizando o software PSIM, e os resultados de tensão, corrente e respectivos valores de oscilação de tensão e corrente são apresentados a seguir nas Figuras 10, 11, 12.

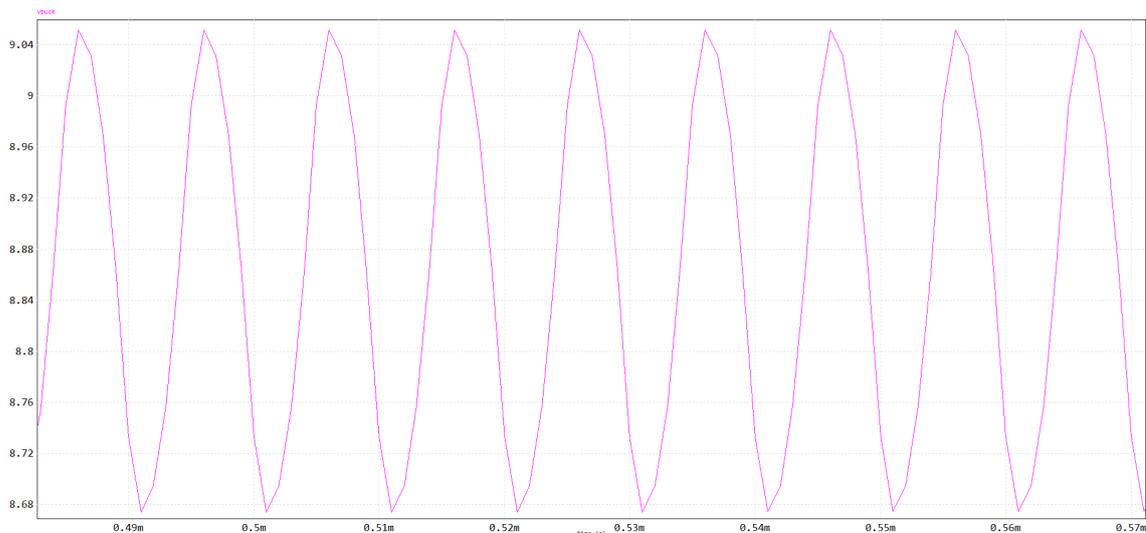
Figura 10 – Conversor buck simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

A Figura 10 apresenta o circuito completo do conversor *buck* implementado no software *PSIM*, evidenciando os principais componentes utilizados, como o transistor de chaveamento, o diodo de roda livre, o indutor e o capacitor de saída. A topologia escolhida permite visualizar a forma de onda de saída e o comportamento dinâmico do sistema, possibilitando avaliar, de maneira clara, o desempenho do conversor sob diferentes condições de operação.

Figura 11 – Oscilação de tensão projetada: 0,377V.

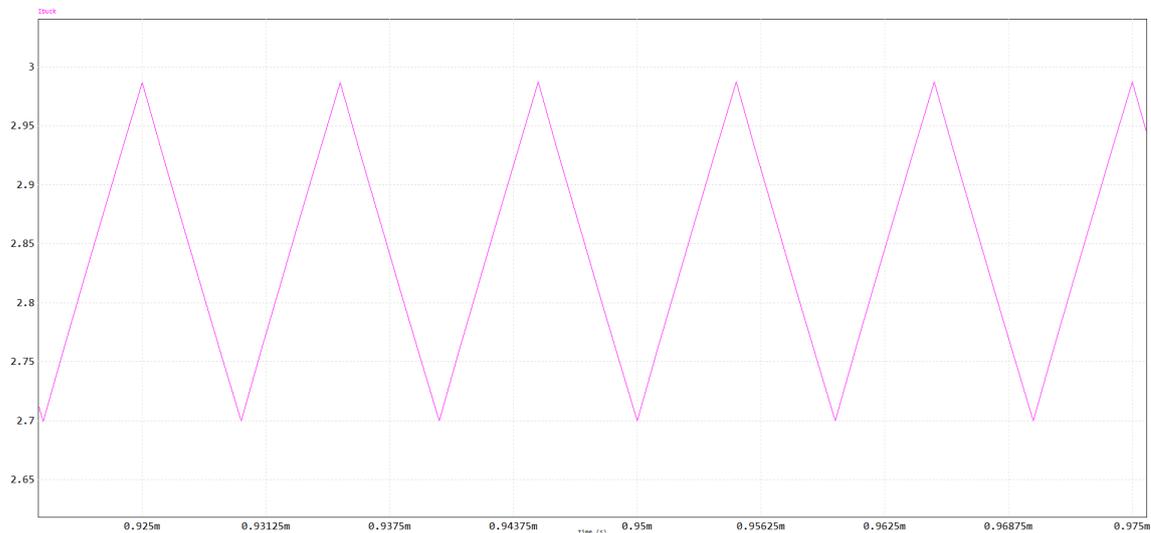


Fonte: Autor.

A Figura 11 está exibindo o sinal de tensão resultante na saída do conversor *buck*, destacando-se a amplitude de 0,377 V e sua forma de onda. A análise dessa forma de onda

permite verificar se a tensão de saída se encontra dentro dos limites de tolerância estabelecidos no projeto (5%), bem como observar a *ripple* (oscilação) presente, importante para garantir que a alimentação do sistema final seja estável e confiável.

Figura 12 – Oscilação de corrente projetada: 0,287A.



Fonte: Autor.

A Figura 12 ilustra a corrente que percorre o indutor e/ou a carga do conversor *buck*, apresentando um valor médio e a oscilação de 0,287 A. Este parâmetro é fundamental para avaliar as perdas no indutor e a eficiência do conversor, pois o *ripple* de corrente (mantido dentro de 10%) afeta diretamente o aquecimento dos componentes e a estabilidade do circuito.

O dimensionamento do conversor *buck* foi realizado com base nos parâmetros especificados, e os resultados obtidos indicam que o conversor atende às especificações de projeto. A oscilação de corrente e tensão foi mantida dentro dos limites estabelecidos 10% e 5%, respectivamente, conforme observado nas simulações realizadas no PSIM.

3.3 Dimensionamento do conversor *boost*

Para o conversor *boost* na Figura 13, a fim de realizar uma comparação justa entre os diferentes conversores, utiliza-se as mesmas especificações de padronizados do conversor *buck*, incluindo tensão e corrente de máxima potência, oscilação de corrente de 10%, oscilação de tensão de 5%, frequência de chaveamento de 100 kHz e ciclo de trabalho de 0,5.

Inicia-se o dimensionamento do conversor *boost* pelo indutor necessário para garantir a oscilação de corrente especificada. Para tanto, utiliza-se a equação (6). A equação utilizada é ajustada para a topologia aplicada no conversor *boost*:

$$\Delta I = \frac{V_s k}{fL} \quad (6)$$

Ao aplicar os parâmetros especificados, o valor da indutância calculado foi de: $3,12e^{-4}H$.

Para atender à oscilação de tensão desejada de 5%, a equação (7) para o cálculo do capacitor no conversor *boost* é dada por:

$$\Delta V_c = \frac{I_a k}{fC} \quad (7)$$

A capacitância necessária foi calculada em $3,20e^{-5}F$.

O valor da resistência de carga acoplada à saída foi dimensionado através da seguinte equação (8):

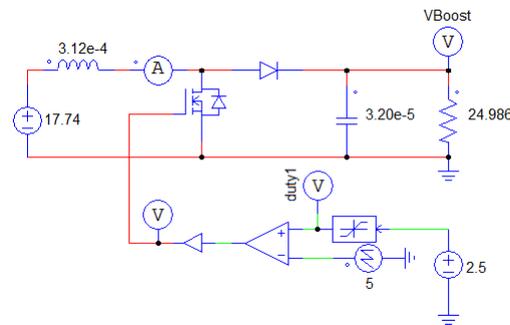
$$2I_L = \frac{2V_s}{(1 - k)^2 R} \quad (8)$$

Com os parâmetros padronizados, o valor da resistência foi calculado em $24,986\Omega$.

3.3.1 Resultados da Simulação do conversor *boost*

A simulação do conversor *boost* foi realizada utilizando o software PSIM, e os resultados de tensão, corrente e respectivas oscilações de tensão e corrente são apresentados a seguir nas figuras 13, 14, 15.

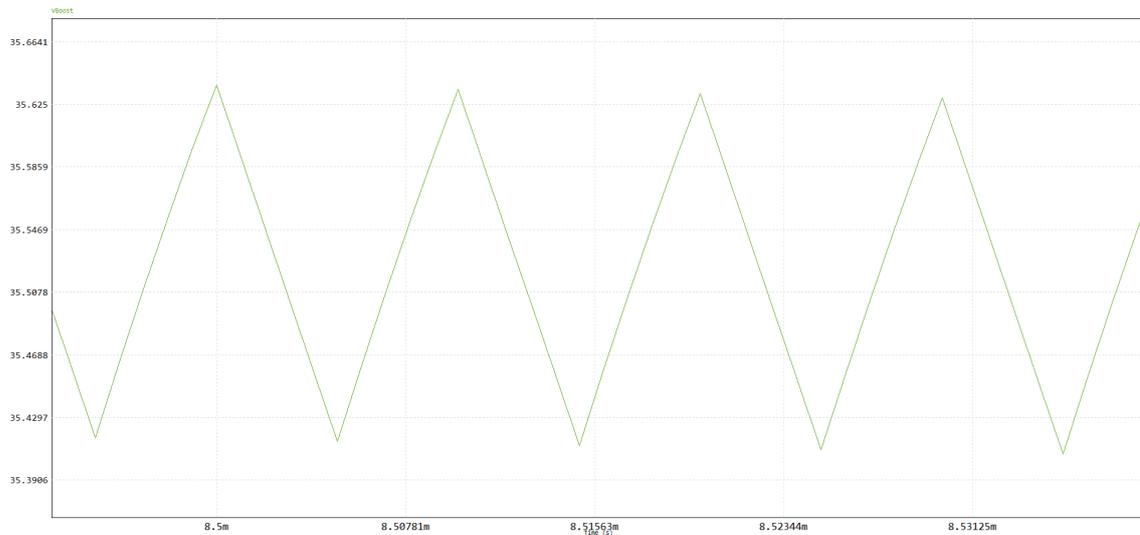
Figura 13 – Conversor boost simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

A Figura 13 apresenta o diagrama do conversor *boost* implementado no software *PSIM*, onde se destacam os principais componentes responsáveis pela elevação da tensão, como o transistor de chaveamento, o diodo, o indutor e o capacitor. A topologia e o arranjo dos elementos permitem verificar o funcionamento do conversor em diferentes condições de operação, além de possibilitar a análise do comportamento dinâmico e da forma de onda de saída.

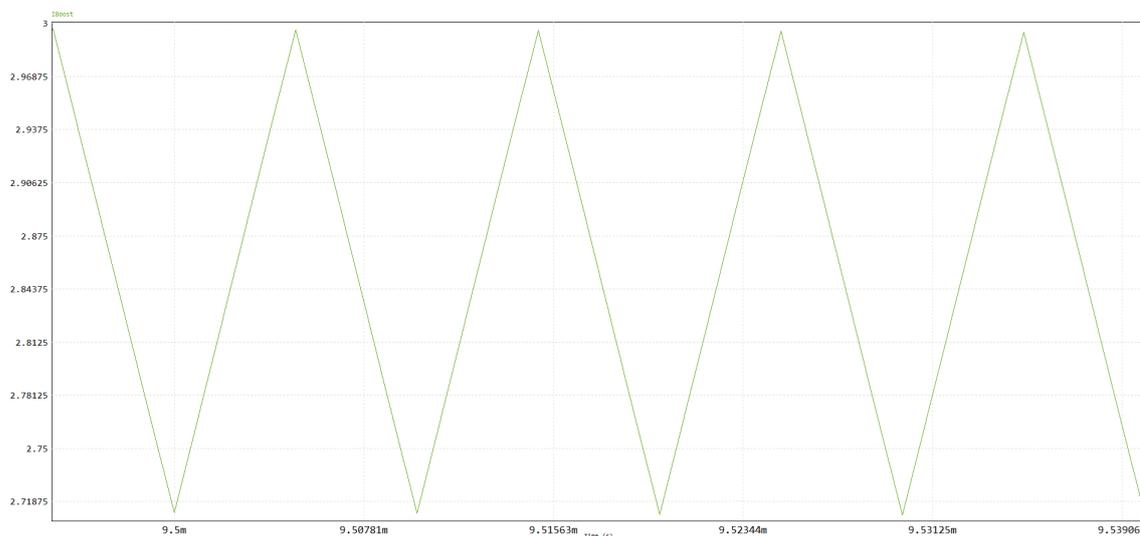
Figura 14 – Oscilação de tensão projetada: 0,247V.



Fonte: Autor.

A Figura 14 ilustra a forma de onda de tensão de saída do conversor *boost*, evidenciando a oscilação de aproximadamente 0,247 V. Esse valor de *ripple* está dentro do limite de 5% estabelecido no projeto, assegurando que a elevação de tensão obtida seja estável e atenda aos requisitos de qualidade e confiabilidade definidos para a aplicação.

Figura 15 – Oscilação de corrente projetada: 0,287A.



Fonte: Autor.

A Figura 15 observa a corrente que circula pelo indutor e pela carga do conversor, apresentando um *ripple* de 0,287 A. Esse valor está dentro dos 10% estipulados como limite máximo de oscilação, o que demonstra que o conversor *boost* foi adequadamente dimensionado, garantindo menor aquecimento dos componentes e maior eficiência no processamento de energia.

O dimensionamento do conversor *boost* foi realizado com base nos parâmetros especificados, e os resultados obtidos indicam que o conversor atende às especificações de projeto. A oscilação de corrente e tensão foi mantida dentro dos limites estabelecidos 10% e 5%, respectivamente, conforme observado nas simulações realizadas no PSIM.

3.4 Dimensionamento do conversor *buck-boost*

O dimensionamento do conversor *buck-boost* na Figura 16 também segue a mesma linha de raciocínio adotada para os conversores anteriores. Novamente, utilizam-se os mesmos parâmetros padronizados para garantir comparabilidade entre os modelos.

O cálculo da indutância no conversor *buck-boost* segue a equação (9) já apresentada para o conversor *boost*, considerando a oscilação de corrente de 10%:

$$\Delta I = \frac{V_s k}{fL} \quad (9)$$

Ao aplicar os parâmetros especificados, o valor da indutância calculado foi de: $3,12e^{-4}H$.

Para atender à oscilação de tensão desejada de 5%, a equação (10) para o cálculo do capacitor no conversor *buck-boost* é dada por:

$$\Delta V_c = \frac{I_a k}{fC} \quad (10)$$

A capacitância necessária foi calculada em $3,20e^{-5}F$.

A resistência de carga foi calculada através da equação (11) a seguir:

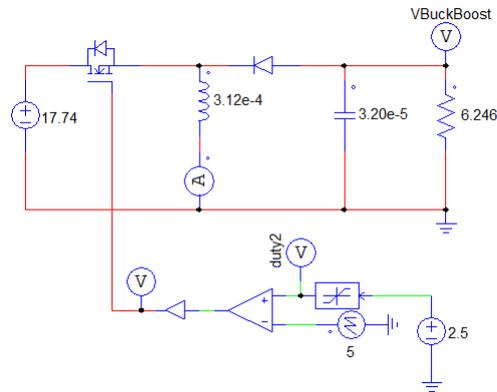
$$2I_L = \frac{2kV_s}{(1-k)R} \quad (11)$$

Resultando em um valor de carga de: $6,246\Omega$

3.4.1 Resultados da Simulação do conversor *buck-boost*

A simulação do conversor *buck-boost* foi realizada utilizando o software PSIM, e os resultados obtidos de tensão, corrente e suas respectivas oscilações são apresentados a seguir nas figuras 16, 17, 18.

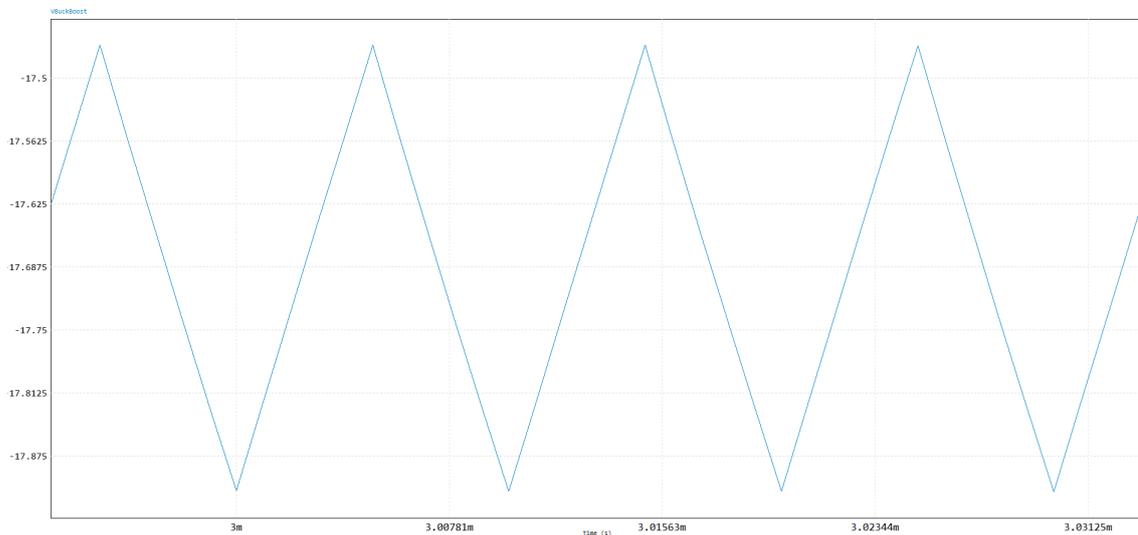
Figura 16 – Conversor buck-boost simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

A Figura 16 apresenta o circuito do conversor *buck-boost* implementado no software *PSIM*, evidenciando os principais componentes (*transistor* de chaveamento, *diodo*, *indutor* e *capacitor*) e o arranjo que possibilita tanto a redução quanto a elevação da tensão de saída. A topologia ilustrada permite analisar o comportamento dinâmico do sistema e avaliar o desempenho do conversor em diferentes condições de operação.

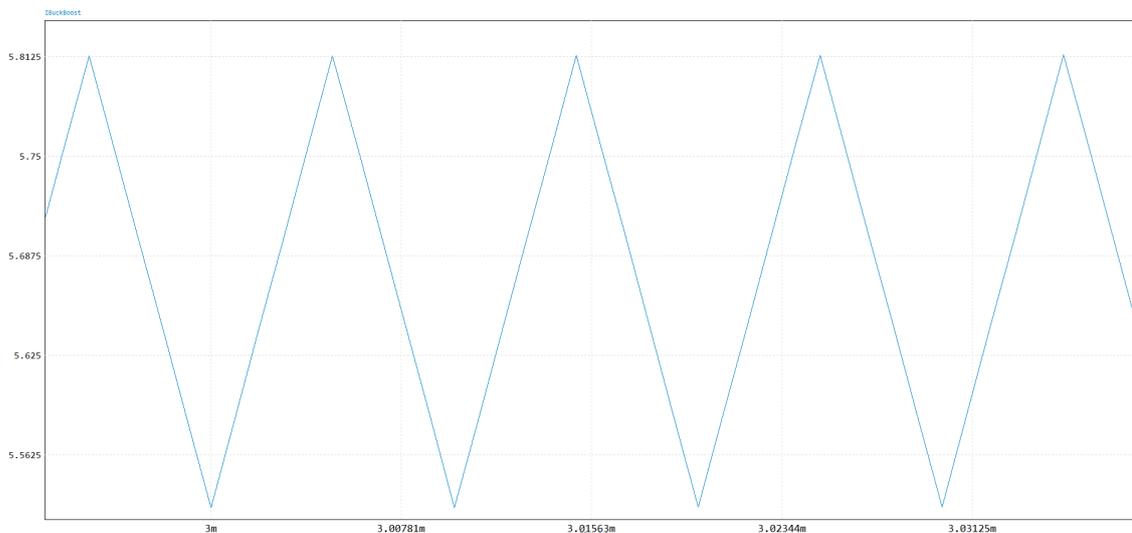
Figura 17 – Oscilação de tensão projetada: 0,442V.



Fonte: Autor.

A Figura 17 observa-se a forma de onda de tensão na saída do conversor, destacando-se a oscilação (*ripple*) de 0,442 V. Esse valor encontra-se dentro do limite de 5% estabelecido no projeto, indicando que o dimensionamento do circuito está adequado para manter a estabilidade da tensão de saída, mesmo em situações de variação de carga ou de tensão de entrada.

Figura 18 – Oscilação de corrente projetada: 0,283A.



Fonte: Autor.

A Figura 18 é apresentada a forma de onda de corrente que circula pelo indutor e pela carga do conversor, mostrando uma oscilação de 0,283 A. Esse *ripple* de corrente está dentro dos 10% estipulados como limite máximo, demonstrando que o dimensionamento do indutor e a estratégia de controle são eficazes em manter o nível de corrente dentro dos padrões de eficiência e confiabilidade requeridos para o projeto.

O dimensionamento do conversor *buck-boost* foi realizado com base nos parâmetros especificados, e os resultados obtidos indicam que o conversor atende às especificações de projeto. A oscilação de corrente e tensão foi mantida dentro dos limites estabelecidos 10% e 5%, respectivamente, conforme observado nas simulações realizadas no PSIM.

3.5 Dimensionamento do conversor *cúk*

O dimensionamento do conversor *cúk* na Figura 19 foi realizado seguindo os mesmos parâmetros padronizados dos conversores anteriores, como a tensão e corrente de máxima potência, oscilação de corrente de 10%, oscilação de tensão de 5%, frequência de chaveamento de 100 kHz e ciclo de trabalho de 0,5. Esses valores foram aplicados para garantir consistência na análise comparativa.

Será dimensionado os indutores L_1 e L_2 e capacitores C_1 e C_2 considerando a oscilação de corrente e oscilação de tensão desejadas, iniciando por L_1 de acordo com a seguinte equação (12):

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 \quad (12)$$

Para determinar os valores de t_1 e t_2 , considerando um ciclo de trabalho de 50% primeiramente foi encontrado a razão entre $1/100kHz$, resultante em um valor de $10\mu s$, sendo então definidos como: $5\mu s$ para t_1 e t_2 , em seguida utilizamos a equação (13):

$$t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L_1}{V_s} \quad (13)$$

Resultando em uma indutância L_1 de: $3,12e^{-4}H$ ou $31,2mH$

Para calcular o valor do capacitor C_1 necessita-se encontrar a tensão V_{C_1} do capacitor e V_a que atua na carga com a equação (14):

$$V_{C_1} = \frac{V_s}{1 - k} \quad (14)$$

Resultando em uma tensão de: $1,774V$, seguindo com a equação (15)

$$V_a = \frac{-kV_s}{1 - k} \quad (15)$$

Resultando em uma tensão de: $-17,74V$, como utilizaremos o valor em módulo podemos considerar a seguinte relação: $|V_s| = |-V_a|$.

Portanto seguindo a padronização de oscilação de tensão de até 5% utilizamos a equação (16):

$$\Delta V_{C_1} = \frac{I_s(1 - k)}{fC_1} \quad (16)$$

Resultando em um valor de capacitância de $8e^{-6}F$.

Em seguida, o valor do indutor L_2 é determinado pela equação (17):

$$2I_{L_2} = 2I_a = \frac{kV_s}{fL_2} \quad (17)$$

Resultando em uma indutância L_2 de: $1,561e^{-5}H$

E após calculamos a capacitância C_2 através da equação (18) que utiliza o valor de V_a previamente calculado:

$$V_a = \frac{KV_s}{8C_2L_2f^2} \quad (18)$$

O valor da capacitância de C_2 obtido foi de $8e^{-6}F$, portanto $C_1 = C_2$

Por fim, a resistência de carga foi dimensionada pela equação (19):

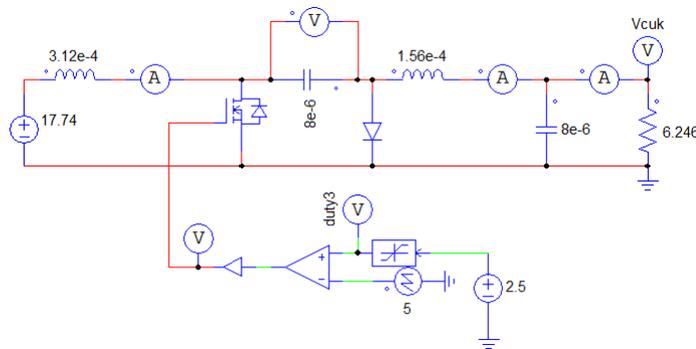
$$2I_s = 2\left(\frac{k}{1-k}\right)^2 \frac{V_s}{R} \quad (19)$$

A resistência obtida foi 6,286Ω.

3.5.1 Resultados da Simulação do conversor *cúk*

A simulação do conversor *cúk* foi realizada utilizando o software PSIM, e os resultados de tensão, corrente e respectivas oscilações de tensão e corrente são apresentados a seguir nas figuras 19, 20, 21.

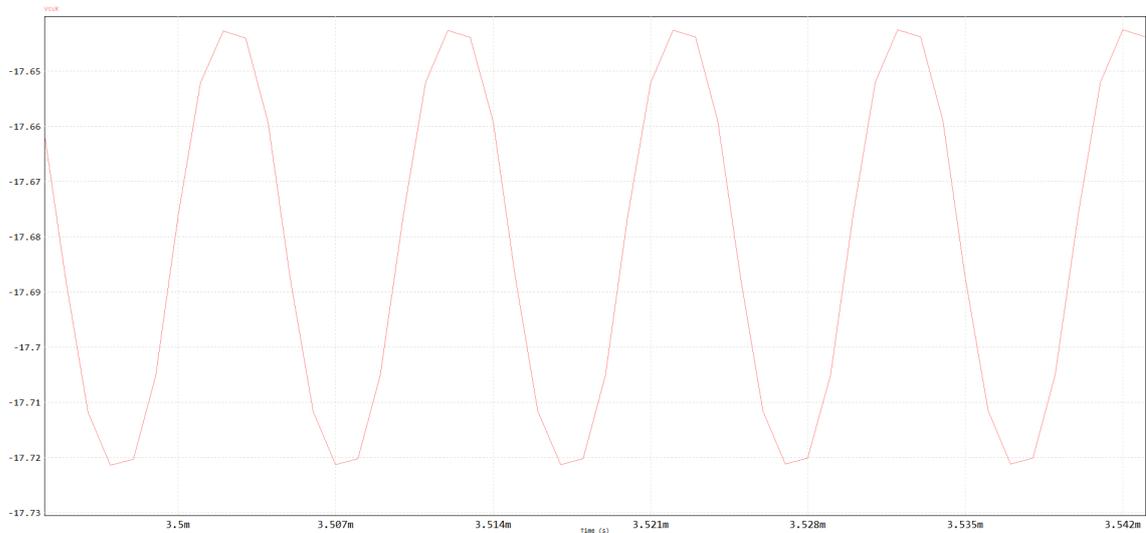
Figura 19 – Conversor *cúk* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 19, visualiza-se o diagrama completo do conversor *Cúk* modelado no software *PSIM*, onde se destacam os principais componentes responsáveis pelo processamento de energia, como o *transistor* de chaveamento, diodos, indutores e capacitores. Essa configuração possibilita a transferência de energia com redução das ondulações de corrente, caracterizando a topologia típica de um conversor *Cúk*, que pode tanto elevar quanto reduzir a tensão de saída, conforme as necessidades do projeto.

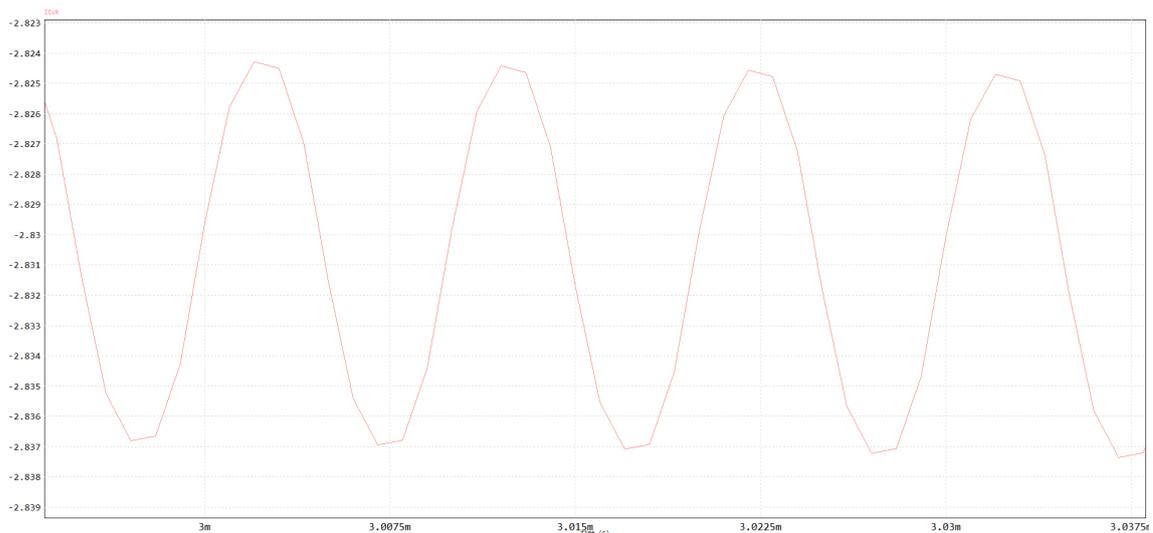
Figura 20 – Oscilação de tensão projetada: 0,0787V.



Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta a forma de onda de tensão na saída do conversor, evidenciando uma oscilação de aproximadamente 0,0787 V. Esse valor de *ripple* está dentro dos 5% estabelecidos no projeto, garantindo a estabilidade do nível de tensão fornecido à carga e confirmando que o dimensionamento dos componentes e a estratégia de controle são adequados para minimizar as variações de tensão.

Figura 21 – Oscilação de corrente projetada: 0,0125A.



Fonte: Autor.

Nesta figura, observa-se a forma de onda de corrente que circula pelo conversor, com um *ripple* de cerca de 0,0125 A. O baixo valor de oscilação, dentro do limite de 10% definido em

projeto, indica que o conversor *Cúk* foi corretamente projetado, resultando em menor estresse nos componentes e maior eficiência no processamento de energia.

Os resultados das simulações mostram que o conversor *cúk* atende aos critérios de projeto, mantendo a oscilação de corrente e tensão dentro dos limites estabelecidos 10% e 5%, respectivamente.

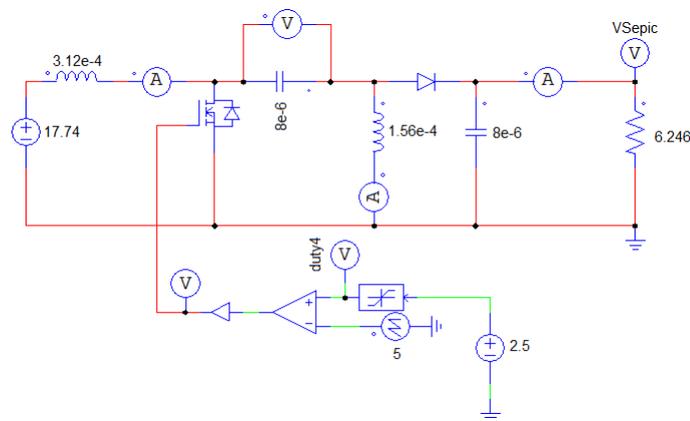
3.6 Dimensionamento do conversor *SEPIC*

O dimensionamento do conversor *SEPIC* na Figura 22 é o mesmo realizado para o conversor *cúk*, tendo como diferença apenas o comportamento inverso dos resultados. Com este princípio em mente foi realizado o rearranjo dos componentes para a configuração *SEPIC* não inversora e obtidos os resultados de simulação.

3.6.1 Resultados da Simulação do conversor *SEPIC*

A simulação do conversor *SEPIC* foi realizada utilizando o software PSIM, e os resultados de tensão, corrente e suas respectivas oscilações são apresentados a seguir nas figuras 22, 23, 24.

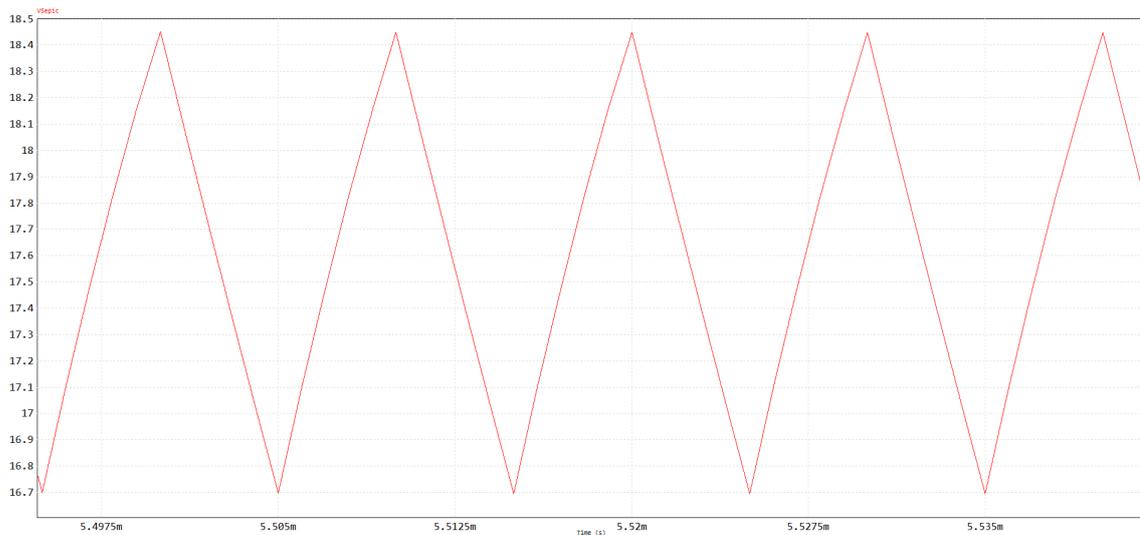
Figura 22 – Conversor *SEPIC* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 22, observa-se o diagrama do conversor *SEPIC* modelado no software *PSIM*, destacando os principais componentes, como transistores, diodos, indutores e capacitores, necessários para realizar tanto a redução quanto a elevação da tensão de saída. Essa topologia, por meio de um acoplamento capacitivo, permite uma maior flexibilidade no controle da tensão, além de reduzir o *ripple* de corrente e melhorar a eficiência do sistema.

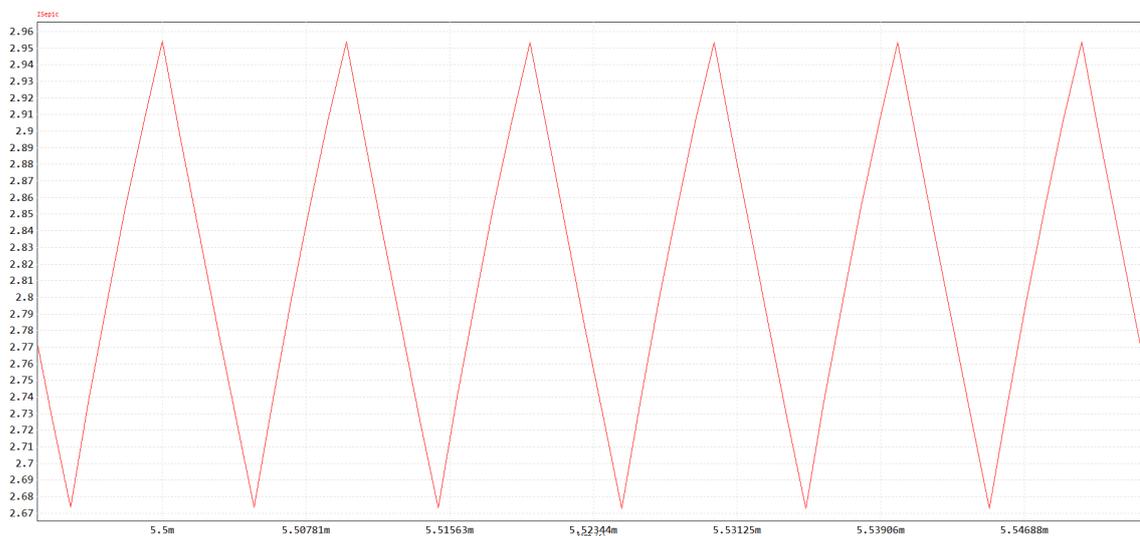
Figura 23 – Oscilação de tensão projetada: 0,877V.



Fonte: Autor.

A Figura 23 apresenta a forma de onda de tensão na saída do conversor SEPIC, com uma oscilação (ripple) de aproximadamente 0,877 V. Esse valor está dentro dos limites especificados no projeto, garantindo que a tensão de saída seja suficientemente estável para alimentar a carga de forma confiável, sem comprometer o desempenho ou a segurança do sistema.

Figura 24 – Oscilação de corrente projetada: 0,281A.



Fonte: Autor.

A figura 24, é exibida a corrente que circula pelo circuito, com um ripple de 0,281 A. Esse nível de oscilação, igualmente dentro das faixas aceitáveis, confirma que o dimensionamento dos componentes do SEPIC foi adequado, mantendo a corrente em valores seguros para os dispositivos envolvidos e assegurando uma operação eficiente e confiável do conversor.

Os resultados das simulações mostram que o conversor *SEPIC* atende às especificações de projeto, mantendo a oscilação de corrente e tensão dentro dos limites estabelecidos.

3.7 Considerações finais do capítulo

Eficiência e Flexibilidade: Conversores como o *buck-boost*, *Cúk* e *SEPIC* oferecem maior flexibilidade e são mais adequados para o rastreamento de ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos, onde a tensão de entrada pode variar amplamente. Eles permitem que o sistema se ajuste dinamicamente para maximizar a extração de energia do painel solar.

Tempo Necessário para Estabilização: Os diferentes tipos de conversores foram ensaiados para avaliar o tempo necessário para que a saída estabilize. Esse fator é essencial no contexto do rastreamento do ponto de máxima potência, pois impacta diretamente na capacidade do sistema de responder rapidamente às variações da tensão de entrada. Ao final do trabalho, será analisado se esses tempos são consideráveis na escolha do conversor mais adequado.

Conclusão Preliminar: Para o rastreamento de ponto de máxima potência, a escolha do conversor deve considerar a faixa de operação da tensão de entrada (17,74V do módulo utilizado) e a necessidade de flexibilidade no sistema. O uso de conversores mais versáteis como o *buck-boost* e *SEPIC* podem garantir maior eficiência em aplicações dinâmicas de energia, como em sistemas fotovoltaicos, onde as condições de operação variam constantemente.

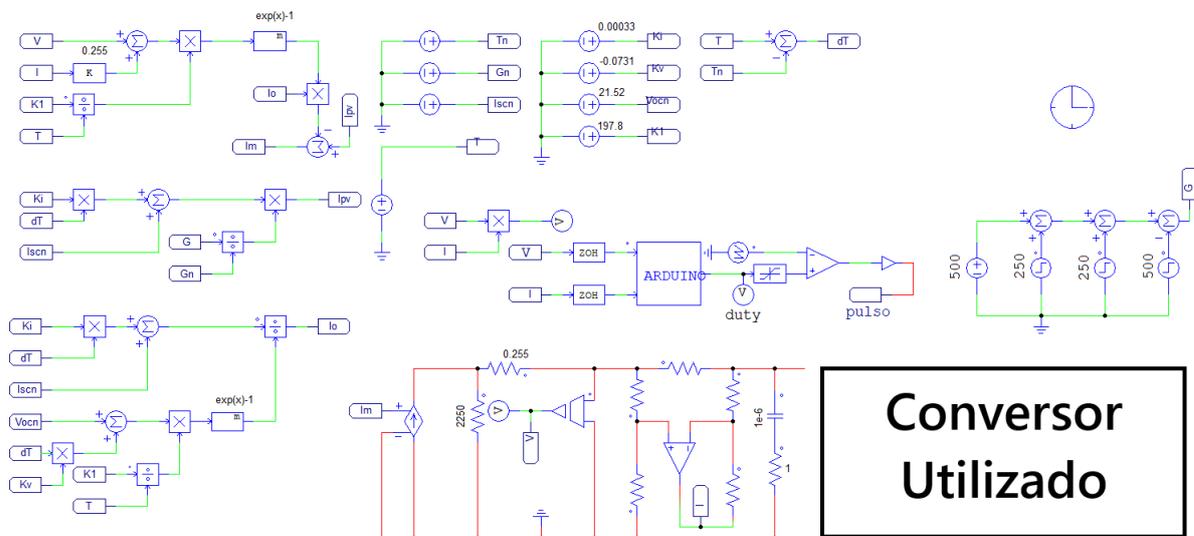
4 Simulações computacionais

Na seção anterior, foram apresentadas as características e o dimensionamento dos principais conversores encontrados na literatura. A fim de verificar qual desses conversores é mais adequado para o rastreamento da máxima potência, realiza-se nesta seção uma análise comparativa por meio de simulações computacionais em ambiente PSIM.

4.1 Modelo computacional

A Figura 25 ilustra o modelo computacional do módulo FV adotado nas simulações em ambiente PSIM. O circuito desenvolvido visa representar o funcionamento ao longo do tempo de um módulo FV, conforme apresentado em (FELIPE, 2018). Os parâmetros elétricos pertinentes à implementação desse modelo foram listados na Tabela 2. Os terminais desse modelo, por sua vez, são conectados à entrada dos conversores projetados. Foi adotada a metodologia proposta por (TAGHVAEE; RADZI, 2013), a qual possibilita a obtenção dos parâmetros necessários para que as curvas I-V e P-V se ajustem ao comportamento real do módulo fotovoltaico.

Figura 25 – Modelo de um módulo FV operando com o algoritmo P&O.



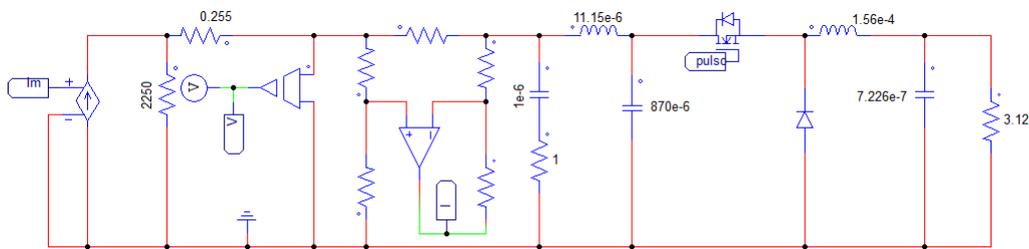
Fonte: Autor.

Uma característica importante desse modelo reside no fato de que ele é capaz de realizar variações de irradiância e temperatura ao longo do tempo. Assim, pode-se simular as variações de irradiância e temperatura que, eventualmente, podem ocorrer ao longo do dia. Para a análise a seguir, aplicam-se quatro variações de irradiância ao longo de dois segundos. Inicialmente, a irradiância aplicada é de 500W/m^2 . Em seguida, são aplicados dois incrementos de 250W/m^2 nos instantes $t = 0,5\text{ s}$ e $t = 1\text{ s}$, conduzindo a irradiância para 750W/m^2 e 1000W/m^2 , respectivamente. Posteriormente, no instante $t = 1,5\text{ s}$, aplica-se um decremento de 500W/m^2 , reduzindo a irradiância novamente para 500W/m^2 .

4.2 Conversor buck

O conversor *buck*, por ser um abaixador de tensão, possui como característica uma fonte de tensão na entrada. Consequentemente, a corrente de entrada apresenta um comportamento pulsado, o que torna necessária a utilização de um filtro de entrada para garantir uma aquisição de corrente adequada. As características do filtro são: $L = 11,15, \mu H$ e $C = 870, \mu F$. Este filtro obtido através de cálculos explicitados em detalhes na referência foi compartilhado posteriormente com o conversor *buck-boost*, proporcionando condições semelhantes de operação (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001).

Figura 26 – Conjunto módulo FV + Conversor *buck* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 26, é apresentado o arranjo composto pelo módulo FV e o conversor buck implementado no software *PSIM*, evidenciando o uso de um filtro LC ($L = 11,15 \mu H$ e $C = 870 \mu F$) na entrada para suavizar a corrente e reduzir. A simulação contempla as diferentes etapas de irradiação ($500 W/m^2$, $750 W/m^2$, $1000 W/m^2$ e novamente $500 W/m^2$), possibilitando avaliar a resposta do sistema na busca pelo MPPT em cada condição de insolação.

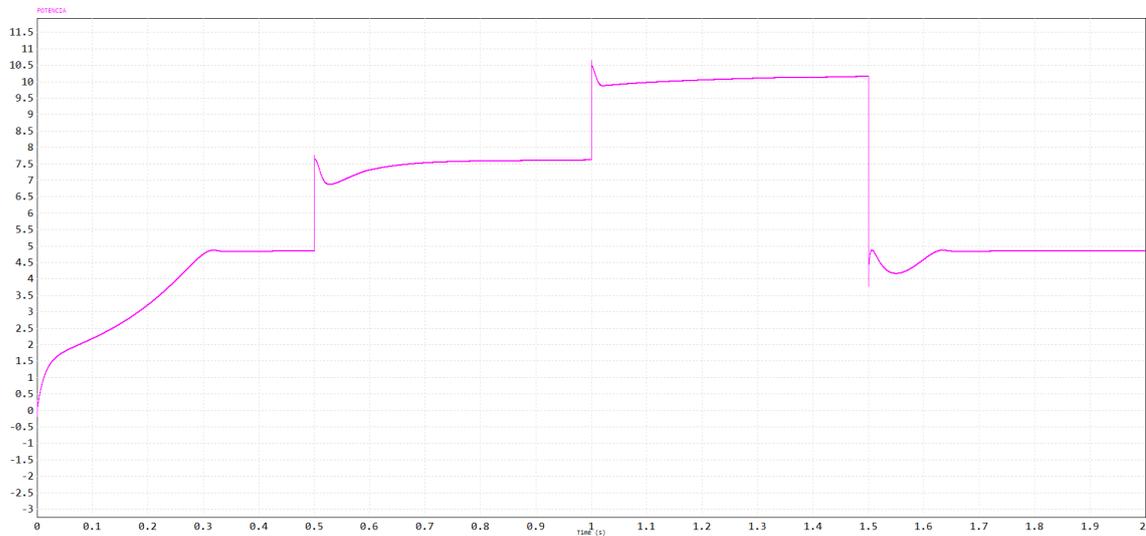
A simulação considera as variações de irradiação descritas, com o objetivo de determinar os tempos necessários para o conversor atingir o MPPT em cada ciclo: condição inicial ($500 W/m^2$), primeiro acréscimo ($750 W/m^2$), segundo acréscimo ($1000 W/m^2$) e redução final ($500 W/m^2$).

No primeiro conjunto de simulações, utilizamos o conversor *buck*, que é comumente empregado quando se deseja reduzir a tensão de entrada. O objetivo aqui foi verificar como o sistema responde ao rastreamento de máxima potência quando a tensão de saída é sempre menor que a de entrada, devido à topologia do conversor.

Durante os experimentos, foi observado que o conversor *buck* conseguiu acompanhar em grande parte as variações de irradiação, ajustando a sua operação de forma eficiente para maximizar a transferência de potência. A transição de condições de $500 W/m^2$ para $750 W/m^2$ foi bem gerenciada pelo sistema com uma estabilização rápida do ponto de máxima potência mas de $750 W/m^2$ para $1000 W/m^2$ o sistema foi mais lento na busca do MPPT, sendo que o processo de rastreamento também foi suave durante a redução de irradiação para $500 W/m^2$.

O conversor *buck* apresentou uma resposta ao sistema apresentado na Figura 27:

Figura 27 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor *buck* simulado via PSIM.



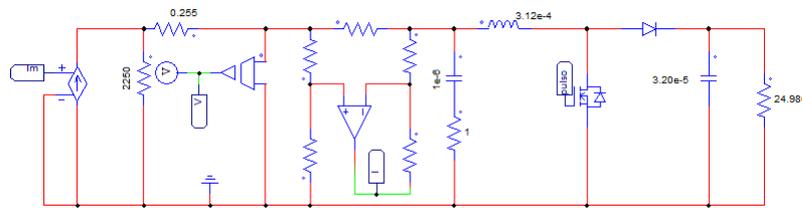
Fonte: Autor.

Na Figura 27, visualiza-se a curva de resposta do conjunto módulo FV + conversor buck ao longo do tempo, evidenciando como o sistema se ajusta para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) nas diferentes condições de irradiância (500 W/m^2 de 0 a 0,5s, 750 W/m^2 de 0,5 a 1s, 1000 W/m^2 de 1 a 1,5s e retorno a 500 W/m^2 de 1,5 a 2s). Observa-se que, ao iniciar em 500 W/m^2 , o conversor reage rapidamente, estabilizando-se em um curto intervalo de tempo; na transição para 750 W/m^2 , o ponto de operação volta a se ajustar de forma relativamente rápida, enquanto, na passagem para 1000 W/m^2 , a resposta mostra um leve aumento no tempo de estabilização. Por fim, quando a irradiância é reduzida novamente para 500 W/m^2 , o conversor realiza o ajuste de forma suave, confirmando a capacidade do sistema de se adaptar às variações de insolação e manter o funcionamento próximo ao MPPT.

4.3 Conversor *boost*

Projetado para elevar a tensão de entrada, o conversor *boost* foi simulado com condições idênticas ao modelo *buck*. As variações de irradiação foram aplicadas para avaliar o tempo de resposta deste conversor ao rastrear o ponto de máxima potência.

Figura 28 – Conjunto módulo FV + Conversor *boost* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 28, observa-se a integração do módulo FV com o conversor boost no software *PSIM*, onde o objetivo principal é elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada proveniente do módulo FV. As condições de simulação são idênticas às utilizadas no modelo buck, permitindo comparar o comportamento do conversor durante as diferentes etapas de irradiação (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e novamente 500 W/m^2). Dessa forma, avalia-se a resposta do sistema no rastreamento do MPPT, analisando tanto o tempo necessário para atingir o ponto de máxima potência quanto a eficiência em cada nível de irradiância.

O comportamento do modelo foi analisado para determinar a eficiência no rastreamento do MPPT em cada ciclo de variação da irradiação.

A seguir, analisa-se o conversor *boost*. Esse conversor é utilizado quando se precisa aumentar a tensão de entrada. No caso do sistema fotovoltaico, isso significa que a tensão de saída pode ser superior à tensão de entrada.

Nas simulações realizadas, o conversor *boost* mostrou um comportamento estável após a primeira condição, conseguindo captar as variações de irradiância de forma eficiente e ajustando a operação do sistema para manter o MPPT. Observou-se que o conversor teve um ótimo desempenho na busca pelo ponto de máxima potência, tanto nas fases de aumento da irradiância (de 500 W/m^2 para 750 W/m^2 e 1000 W/m^2) quanto na fase de redução para 500 W/m^2 , com uma resposta rápida às mudanças. Porém no que tange a eficiência da conversão a potencia fornecida por este conjunto, exceto para a condição em 1000 W/m^2 forneceu um valor de potência abaixo do esperado.

O conversor *boost* apresentou uma resposta ao sistema conforme:

Figura 29 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor *boost* simulado via PSIM.



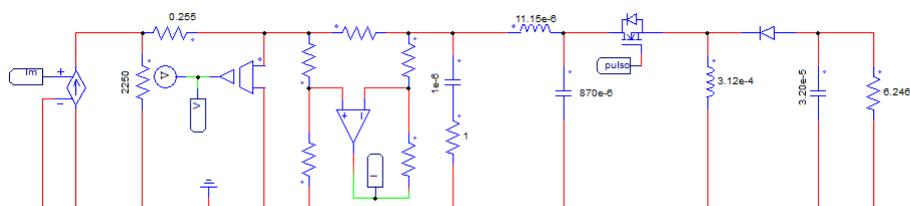
Fonte: Autor.

Na Figura 29, é possível observar a curva de resposta do conjunto módulo FV + conversor boost ao longo das transições de irradiância (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e retorno a 500 W/m^2). Percebe-se que o sistema consegue rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) de forma relativamente rápida nos momentos de aumento e redução de irradiância, ajustando a tensão de saída para valores superiores aos da entrada. Contudo, nota-se que, para as condições de 500 W/m^2 e 750 W/m^2 , a potência fornecida pelo conversor não atinge o nível esperado, indicando que a eficiência de conversão pode estar sendo afetada por perdas internas ou pelo próprio dimensionamento do conversor em níveis de irradiância mais baixos. Em contrapartida, na condição de 1000 W/m^2 , o desempenho de conversão é mais próximo do ideal, mostrando uma maior aderência ao MPPT e maior aproveitamento da energia disponível.

4.4 Conversor *buck-boost*

Capaz de operar com tensões de saída maiores ou menores que a entrada, o conversor *buck-boost* compartilhou o filtro LC utilizado no modelo *buck*, garantindo condições similares de entrada.

Figura 30 – Conjunto módulo FV + Conversor *buck-boost* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 30, observa-se a integração do módulo FV com o conversor buck-boost no software *PSIM*, utilizando o mesmo filtro LC empregado no modelo buck para manter condições de entrada semelhantes. Essa topologia possibilita tanto a redução quanto a elevação da tensão de saída, adequando-se às variações de irradiação solar. Assim como nos modelos anteriores, foram aplicados os mesmos níveis de irradiação (500 W/m², 750 W/m², 1000 W/m² e 500 W/m²) para avaliar o tempo de resposta do sistema no rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e comparar o desempenho frente às diferentes condições de operação.

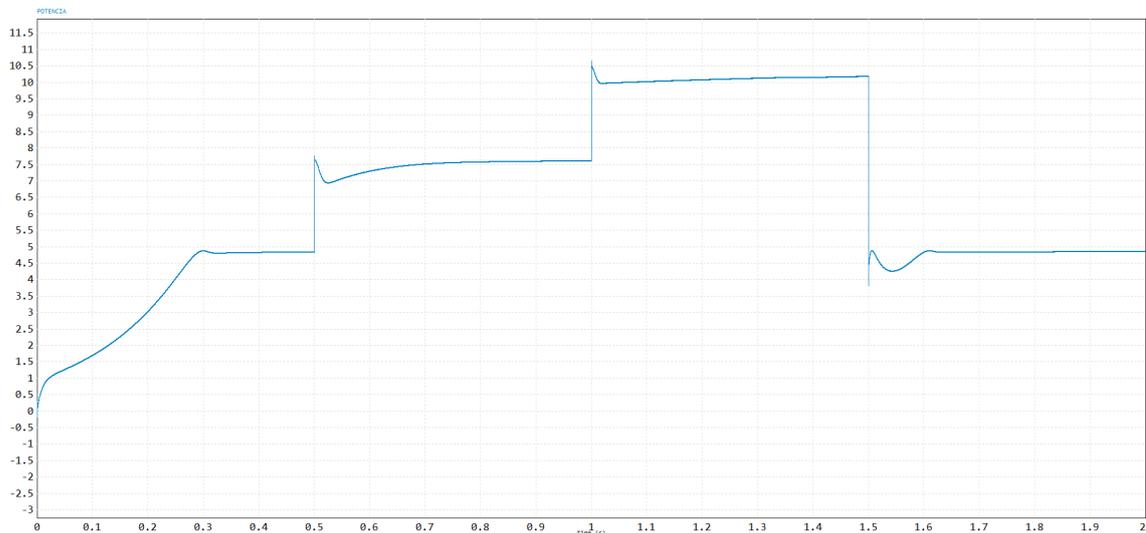
O objetivo da simulação foi determinar o tempo necessário para atingir o MPPT nas mesmas condições de variação descritas para os modelos anteriores.

O conversor *buck-boost* combina características dos conversores *buck* e *boost*, sendo capaz de aumentar ou reduzir a tensão de entrada. Esse comportamento é útil quando as condições de irradiação variam drasticamente, o que pode resultar em uma tensão de saída que não necessariamente precisa ser maior ou menor que a entrada.

Nas simulações, o conversor *buck-boost* demonstrou ser bastante versátil ao lidar com as mudanças de irradiação. O sistema foi capaz de ajustar rapidamente a tensão de saída para otimizar a transferência de potência, acompanhando com eficiência as mudanças no ponto de máxima potência, mesmo durante transições de grande variação de irradiação.

O conversor *buck-boost* apresentou uma resposta ao sistema conforme:

Figura 31 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor *buck-boost* simulado via *PSIM*.



Fonte: Autor.

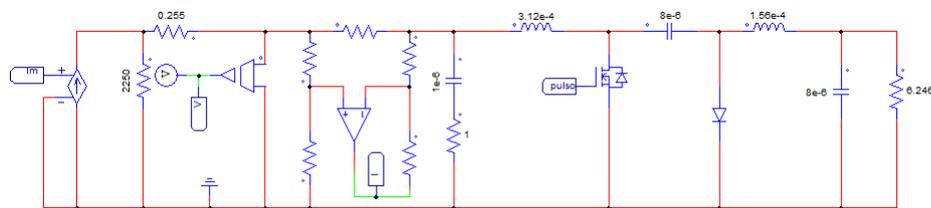
Na Figura 31, é possível observar a curva de resposta do conjunto módulo FV + conversor buck-boost ao longo das transições de irradiação (500 W/m², 750 W/m², 1000 W/m² e retorno a 500 W/m²). Percebe-se que o sistema consegue rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) de forma relativamente rápida nos momentos de aumento e redução de irradiação, ajustando a

tensão de saída para valores superiores aos da entrada. Contudo, nota-se que, para as condições de 500 W/m^2 e 750 W/m^2 , a potência fornecida pelo conversor não atinge o nível esperado, indicando que a eficiência de conversão pode estar sendo afetada por perdas internas ou pelo próprio dimensionamento do conversor em níveis de irradiância mais baixos. Em contrapartida, na condição de 1000 W/m^2 , o desempenho de conversão é mais próximo do ideal, mostrando uma maior aderência ao MPPT e maior aproveitamento da energia disponível.

4.5 Conversor *cúk*

Com característica de corrente de entrada não pulsante, o conversor *cúk* foi modelado para avaliar sua estabilidade e resposta em condições dinâmicas de irradiação.

Figura 32 – Conjunto módulo FV + Conversor *cúk* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 32, é ilustrado o conjunto formado pela módulo FV e o conversor Cúk no software *PSIM*, evidenciando a topologia conhecida por apresentar corrente de entrada não pulsante. Esse recurso contribui para reduzir o *ripple* e melhorar a estabilidade do sistema durante as variações de irradiação (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e 500 W/m^2). A simulação, portanto, avalia a capacidade do conversor em rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) de forma eficiente, analisando tanto a rapidez na resposta quanto a manutenção de níveis adequados de corrente e tensão ao longo dos ciclos de operação.

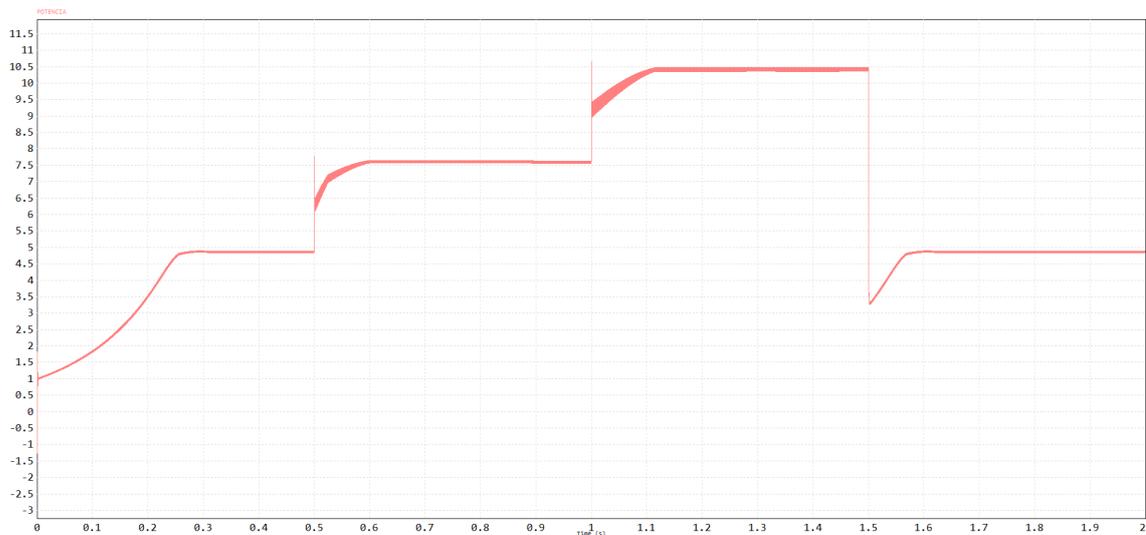
As variações de irradiação foram aplicadas para verificar a eficiência do conversor no rastreamento do MPPT, com foco no tempo de resposta para cada ciclo de operação.

O conversor *Cúk* também foi analisado, sendo uma topologia que, assim como o conversor *buck-boost*, pode tanto reduzir quanto aumentar a tensão de entrada, mas de maneira mais eficiente em termos de controle de corrente.

Nos experimentos, o conversor *Cúk* apresentou um bom desempenho na busca pelo MPPT, com uma resposta eficiente durante as transições de irradiância. Ele conseguiu manter o ponto de máxima potência estável, demonstrando um controle adequado da tensão e corrente, que variou de forma linear e previsível durante os testes.

O conversor *Cúk* apresentou uma resposta ao sistema conforme:

Figura 33 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor *Cúk* simulado via PSIM.



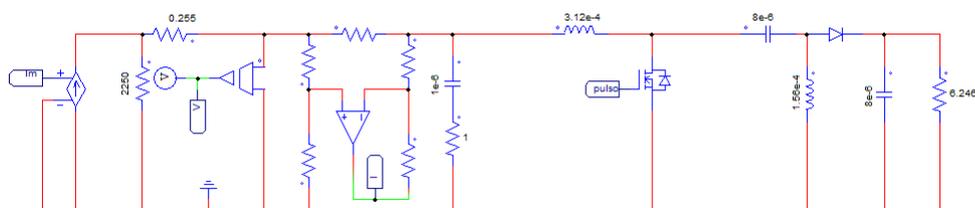
Fonte: Autor.

Na Figura 33, é possível observar a curva de resposta do conjunto módulo FV + conversor *Cúk* frente às variações de irradiância (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e retorno a 500 W/m^2). O gráfico evidencia a capacidade desse conversor em ajustar a tensão de saída para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT), mantendo tanto a tensão quanto a corrente de forma mais estável em comparação a outras topologias. Nota-se que, mesmo durante transições mais bruscas, o conversor *Cúk* apresenta uma variação suave e previsível, demonstrando boa eficiência no controle de corrente e confirmando seu desempenho satisfatório na busca pelo MPPT.

4.6 Conversor *SEPIC*

O conversor *SEPIC* combina a flexibilidade de operar com tensões de saída superiores ou inferiores à entrada com corrente de entrada não pulsante. Este modelo foi simulado para avaliar o tempo de resposta ao rastrear o ponto de máxima potência nas condições de variação impostas.

Figura 34 – Conjunto módulo FV + Conversor *SEPIC* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 34, observa-se a integração do módulo FV com o conversor *SEPIC* no software *PSIM*, destacando-se a característica de corrente de entrada não pulsante e a possibilidade de

operar com tensões de saída superiores ou inferiores à de entrada. Essa topologia promove maior estabilidade durante as transições de irradiação (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e 500 W/m^2), permitindo avaliar o desempenho do sistema no rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). A simulação investiga especialmente o tempo de resposta do conversor às variações dinâmicas de irradiação, demonstrando a flexibilidade e a eficiência do *SEPIC* em manter níveis adequados de tensão e corrente na saída.

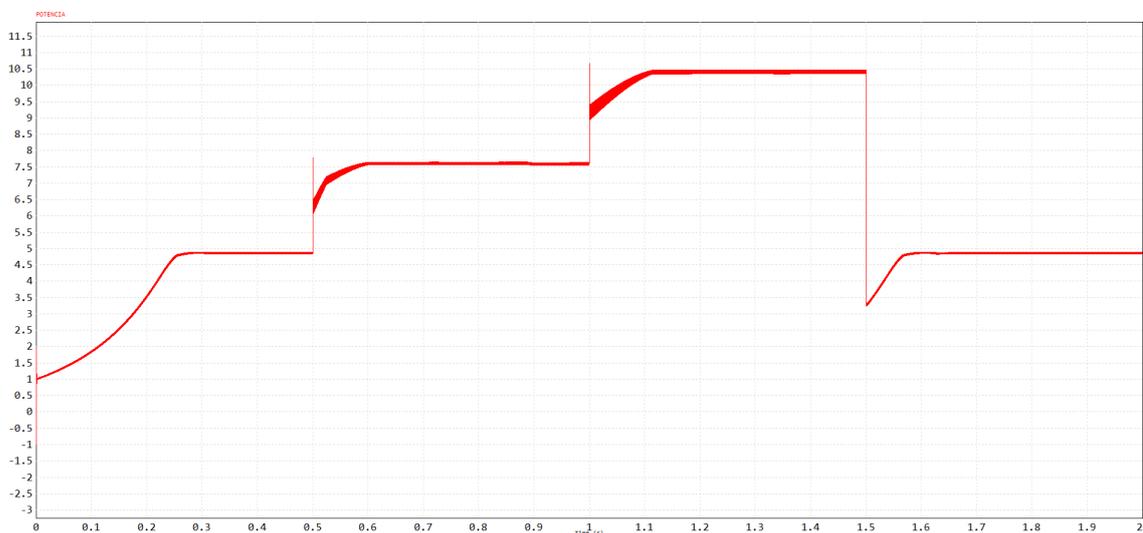
A simulação buscou medir o tempo necessário para o conversor *SEPIC* encontrar o MPPT em cada ciclo, considerando o cenário dinâmico de irradiação.

Por fim, o conversor *SEPIC* foi testado. Este conversor possui uma característica similar ao *Cúk*, mas com a vantagem de fornecer uma saída positiva, independentemente do valor da entrada, podendo ser usado em uma variedade de cenários fotovoltaicos.

Durante os testes, o conversor *SEPIC* se mostrou altamente eficiente em termos de rastreamento do MPPT. Mesmo com variações abruptas de irradiação, o sistema foi capaz de ajustar rapidamente a operação para manter o ponto de máxima potência. O conversor demonstrou um bom comportamento tanto durante aumentos quanto diminuições de irradiação, mantendo um bom nível de eficiência energética.

O conversor *SEPIC* apresentou uma resposta ao sistema conforme:

Figura 35 – Resposta do conjunto módulo FV + conversor *SEPIC* simulado via PSIM.



Fonte: Autor.

Na Figura 35, visualiza-se o comportamento do conjunto módulo FV + conversor *SEPIC* diante das diferentes condições de irradiação (500 W/m^2 , 750 W/m^2 , 1000 W/m^2 e retorno a 500 W/m^2). O gráfico mostra como a tensão de saída e a potência ajustam-se rapidamente a cada variação, mantendo o ponto de máxima potência (MPPT) de forma eficiente. Essa resposta dinâmica confirma a capacidade do *SEPIC* em lidar com aumentos e reduções de irradiação,

garantindo uma saída sempre positiva e demonstrando elevada eficiência energética ao longo de todo o processo de rastreamento.

4.7 Análise Comparativa

A Tabela 3 apresenta uma análise quantitativa desses conversores. Essa tabela, por sua vez, detalha o tempo de estabilização bem como a potência extraída com cada conversor. Essa última, por sua vez, leva em consideração o valor médio durante o intervalo de tempo analisado. Entretanto, tendo em vista que cada intervalo contém 0,5 segundos, esse tempo deve ser levado em consideração no cálculo da potência. Em outras palavras, tendo em vista que a potência é equivalente à área abaixo da curva, pode-se calcular a potência no intervalo de tempo analisado conforme a equação (20).

$$P_{\text{Área}_i} = P_{\text{média}_i} \times 0,5 \quad (20)$$

para $i = 1, 2, 3, 4$;

Onde $P_{\text{média}_i}$ é o valor médio da potência na área i (para $i = 1, 2, 3, 4$). A potência total foi calculada como a soma das potências de todas as áreas ou pelo valor médio multiplicado pelo tempo total de 2 segundos.

Tabela 3 – Comparação dos Tempos de Estabilização e da Potência Gerada para Cada Conversor CC-CC.

Tipo de Conversor	<i>Buck</i>	<i>Boost</i>	<i>Buck-Boost</i>	<i>Cúk</i>	<i>SEPIC</i>
Tempo de estabilização Área 1 (s)	0,426	NE	0,406	0,306	0,306
Tempo de estabilização Área 2 (s)	0,491	0,063	0,412	0,096	0,097
Tempo de estabilização Área 3 (s)	0,478	0,003	0,481	0,115	0,112
Tempo de estabilização Área 4 (s)	0,222	1,28	0,355	0,117	0,119
Potência Total Área 1 (W)	1,800	0,740	1,723	1,818	1,821
Potência Total Área 2 (W)	3,739	2,917	3,737	3,774	3,773
Potência Total Área 3 (W)	5,037	5,015	5,053	5,158	5,150
Potência Total Área 4 (W)	2,381	1,321	2,393	2,379	2,379
Potência total gerada (W)	12,956	9,992	12,904	13,128	13,126

Fonte: Autor.

Após a análise de cada conversor, uma comparação foi realizada para entender melhor as características de desempenho de cada topologia. O conversor *buck* se destacou pela simplicidade e eficiência em sistemas onde a tensão de saída precisa ser menor que a de entrada, mas teve algumas limitações quando a irradiância variou consideravelmente. O conversor *boost*, por outro lado, foi mais eficaz em situações onde era necessário aumentar a tensão, mantendo uma resposta estável e rápida mas foi penalizado na área 1 pelo fato de não se estabilizar no tempo disponibilizado para teste, impactando em sua potência gerada.

Os conversores *buck-boost*, *Cúk* e *SEPIC* se comportaram de maneira mais versátil e eficiente diante das variações de irradiância, com o conversor *SEPIC* se destacando pela sua robustez em sistemas fotovoltaicos com amplas flutuações de irradiância.

4.8 Conclusão de final de capítulo

Os resultados obtidos indicam que todos os conversores testados podem ser usados em sistemas fotovoltaicos com rastreamento de máxima potência. No entanto, cada topologia tem suas vantagens dependendo das necessidades do sistema, como a tensão de saída e a variação da irradiância. Conversores como o *buck-boost*, *Cúk* e *SEPIC* foram mais adequados para lidar com mudanças abruptas na irradiância, enquanto os conversores *buck* e *boost* são mais adequados para cenários com variações mais previsíveis e controladas de potência.

É evidenciado na tabela 3 com o resultado final da pesquisa referente aos tempos para estabilização no rastreamento do ponto de máxima potência.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo a comparação entre diferentes topologias de conversores CC-CC, avaliando seu desempenho em sistemas fotovoltaicos sob diferentes condições de irradiância. Para isso, foram analisados os tempos de estabilização e a potência gerada por cada conversor, considerando sua capacidade de adaptação a variações ambientais. Os dados apresentados na Tabela 3 permitiram uma avaliação quantitativa do comportamento de cada conversor, possibilitando uma escolha fundamentada para aplicações específicas.

Os resultados obtidos evidenciaram que o conversor *Boost* apresentou tempos de estabilização extremamente baixos nas Áreas 2 (0,063 s) e 3 (0,003 s), o que indica uma rápida adaptação a mudanças na irradiância. No entanto, sua instabilidade na Área 1 (NE) e o tempo elevado na Área 4 (1,28 s) comprometeram sua eficiência global, resultando na menor potência total gerada (9,992 W). Por outro lado, os conversores *Cúk* e *SEPIC* demonstraram os melhores desempenhos, alcançando as maiores potências geradas (13,128 W e 13,126 W, respectivamente), além de manterem respostas rápidas e consistentes. Isso os torna ideais para aplicações que exigem alta eficiência na conversão de energia e resposta imediata às variações de irradiância, como em sistemas sujeitos a sombreamento parcial ou mudanças bruscas nas condições ambientais.

O conversor *Buck*, embora com tempos de estabilização moderados (0,222 s a 0,491 s), gerou uma potência total de 12,956 W, sendo uma opção confiável, mas sem atingir a eficiência máxima dos conversores *Cúk* e *SEPIC*. Já o conversor *Buck-Boost* apresentou um desempenho intermediário, equilibrando tempo de estabilização e potência gerada, o que o torna adequado para sistemas onde há variações moderadas de irradiância e a necessidade de um compromisso entre estabilidade e eficiência.

Apesar das contribuições deste estudo, algumas limitações devem ser consideradas. Os testes foram conduzidos sob um conjunto específico de parâmetros de irradiância, o que pode não representar todas as condições operacionais possíveis. Para obter uma avaliação mais abrangente, futuras investigações poderiam incluir cenários dinâmicos mais complexos, como variações abruptas de carga, mudanças extremas de temperatura e condições reais de sombreamento. Além disso, a análise da eficiência térmica dos conversores poderia fornecer insights adicionais sobre sua viabilidade em aplicações de longo prazo.

Dessa forma, a escolha do conversor ideal depende das especificações do sistema fotovoltaico e das condições ambientais de operação. Para aplicações que demandam máxima eficiência e rápida adaptação, os conversores *Cúk* e *SEPIC* se mostram as melhores opções. O conversor *Buck* pode ser uma alternativa viável para cenários onde se prioriza estabilidade com resposta rápida, enquanto o conversor *Buck-Boost* representa uma solução equilibrada para sistemas com variações moderadas. A seleção adequada do conversor deve considerar não apenas a eficiência e a estabilidade do sistema, mas também sua capacidade de resposta às variações ambientais, garantindo assim um desempenho otimizado e sustentável.

Referências

- BAE, S.; KWASINSKI, A. Maximum power point tracker for a multiple-input Ćuk dc–dc converter. In: *Proceedings of the 31st International Telecommunications Energy Conference, INTELEC*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.
- CHUNG, H. S. H. et al. A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a sepic or cuk converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 3, p. 717–724, 2003.
- COELHO, R. F. et al. A study of the basic dc–dc converters applied in maximum power point tracking. In: *Proceedings of the Power Electronics Conference, COBEP '09*. Brazil: [s.n.], 2009. p. 673–678.
- DURAN, E. Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain i–v characteristic curves of photovoltaic modules. *Proceedings of the IEEE power electronics specialists conference*, 2008.
- ELGENDY, M. A.; ZAHAWI, B.; ATKINSON, D. J. Assessment of perturb and observe mppt algorithm implementation techniques for pv pumping applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 3, n. 1, p. 21–33, 2012.
- ENRIQUE, J. A new approach to obtain i–v and p–v curves of photovoltaic modules by using dc-dc converters. *Photovoltaic Specialists Conference in Conference Record of the Thirty-first IEEE, Florida*, 2005.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd. ed. Boston: Springer Science & Business Media, 2001.
- FELIPE, D. K. Análise da variação dos coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com a irradiância. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado*, 2018.
- FEMIA, N. et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 20, n. 4, p. 963–973, 2005.
- HART, D. W. Eletrônica de potência. In: *Eletrônica de Potência*. [S.l.: s.n.], 2021.
- IEA-PVPS. *Trends in Photovoltaic Applications 2023: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2022*. 2023. Accessed: 2025-04-14. Disponível em: <<https://iea-pvps.org/publications/trends-report-2023/>>.
- IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2022*. 2023. Accessed: 2025-04-14. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2023/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>>.
- JIMENEZ-TORIBIO, E. E. et al. Sensorless control of sepic and Ćuk converters for dc motors using solar panels. In: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC '09*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1503–1510.
- MARTINS, D. C.; BARBI, I. Eletrônica de potência: conversores cc-cc básicos nao isolados. In: *Edição dos Autores*. [S.l.: s.n.], 2006.
- MOHAN, N. T.; UNDELAND, M.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.

- MORAES, C. Análise do conversor buck em condução contínua. In: *Eletrônica de Potência*. [S.l.: s.n.], 2018.
- RASHID, M. Power electronics handbook. *Academic Press*, 2001.
- SAFARI, A.; MEKHILEF, S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance mppt with direct control method using cuk converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 4, p. 1154–1161, 2011.
- SAMPAIO, L. P. Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos. *International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2010.
- SOLODOVNIK, E. V. et al. Power controller design for maximum power tracking in solar installations. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 5, p. 1295–1304, 2004.
- TA-TAU, C. et al. Design of digital battery charger system based on pv-module in fuzzy systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1860–1865.
- TAGHVAEE, M.; RADZI, M. A current and future study on non-isolated dc–dc converters for photovoltaic applications. www.elsevier.com/locate/rser, 2013.
- TSE, K. et al. A novel maximum power point tracker for pv panels using switching frequency modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 17, n. 6, p. 980–989, 2002.