



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Aplicação do Conversor BBB-ReSC-M em Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas para Mitigação de Descasamentos Permanentes

Carolina Maria Braga de Souza

João Monlevade, MG
2026

Carolina Maria Braga de Souza

Aplicação do Conversor BBB-ReSC-M em Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas para Mitigação de Descasamentos Permanentes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Caio Meira Amaral da Luz

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729a Souza, Carolina Maria Braga de.

Aplicação do conversor BBB-ReSC-M em matrizes fotovoltaicas
assimétricas para mitigação de descasamentos permanentes.

[manuscrito] / Carolina Maria Braga de Souza. - 2026.

70 f.: il.: color., gráf., tab..

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

CDU 621.383.51:621.314.1

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carolina Maria Braga de Souza

Aplicação do Conversor BBB-ReSC-M em Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas para Mitigação de Descasamentos Permanentes

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 30 de Julho de 2026

Membros da banca

Dr. Caio Meira Amaral da Luz - Universidade Federal de Ouro Preto - DECAT
Dr. Rodrigo Augusto Ricco - Universidade Federal de Ouro Preto - DEELT
Dr. Caio Fernando Teixeira Portela - Universidade Federal de Ouro Preto - DECAT

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 31/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Caio Meira Amaral da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/08/2026, às 15:37, 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 **1178889** e o código CRC **466DCA1D**.

Dedico este trabalho aos meus pais, meus avós, meu noivo e a todos que estiveram comigo durante todos os anos de estudos e dedicação a esta graduação.

Agradecimentos

A Deus e à Nossa Senhora, por me concederem saúde, sabedoria e determinação ao longo desta trajetória, tornando possível a realização deste trabalho e a conclusão da graduação.

*“O homem paciente resiste até o momento oportuno,
e será recompensado no final com alegria.”
Eclesiástico 1, 20*

Resumo

O descasamento permanente entre módulos fotovoltaicos constitui um dos principais fatores responsáveis pela redução da eficiência energética em sistemas fotovoltaicos, comprometendo o aproveitamento da potência disponível. Nesse contexto, este trabalho investiga a aplicação do conversor *Buck-Boost* Bidirecional com Capacitor Chaveado Ressonante (BBB-ReSC) em matrizes fotovoltaicas assimétricas, sendo essa aplicação denominada, neste trabalho, de BBB-ReSC-M. Para isso, emprega-se a técnica de Processamento Diferencial de Potência (DPP) como estratégia para mitigar os efeitos desse fenômeno.

Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos, descasamento entre módulos e as principais técnicas de Processamento Diferencial de Potência descritas na literatura. Em seguida, são apresentados a fundamentação teórica do conversor BBB-ReSC, o dimensionamento de seus componentes elétricos e duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas propostas para avaliação de sua aplicação. A metodologia emprega simulações computacionais desenvolvidas no ambiente MATLAB/Simulink, comparando o desempenho do sistema com o conversor habilitado e desabilitado.

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação do conversor BBB-ReSC nas duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas estudadas proporcionou maior aproveitamento da potência gerada, reduziu os efeitos do descasamento permanente e elevou a eficiência energética do sistema. Dessa forma, os resultados indicam que a aplicação apresenta potencial para utilização em outras configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas, preservando seu desempenho operacional.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos; processamento diferencial de potência; BBB-ReSC; matrizes fotovoltaicas assimétricas; descasamento permanente.

Abstract

Permanent mismatch among photovoltaic modules is one of the main factors responsible for reducing the energy efficiency of photovoltaic systems, compromising the utilization of the available power. In this context, this work investigates the application of the Bidirectional Buck-Boost Resonant Switched-Capacitor (BBB-ReSC) converter to asymmetric photovoltaic arrays, hereafter referred to as BBB-ReSC-M. To this end, Differential Power Processing (DPP) is employed as a strategy to mitigate the effects of this phenomenon.

Initially, a literature review is conducted on photovoltaic systems, module mismatch, and the main Differential Power Processing techniques reported in the literature. Subsequently, the theoretical foundations of the BBB-ReSC converter, the design of its electrical components, and two asymmetric photovoltaic array configurations proposed for evaluating its application are presented. The adopted methodology consists of computational simulations carried out in the MATLAB/Simulink environment, comparing the system performance with the converter enabled and disabled.

The obtained results demonstrate that the application of the BBB-ReSC converter to the two asymmetric photovoltaic array configurations investigated provided greater utilization of the generated power, mitigated the effects of permanent mismatch, and improved the energy efficiency of the system. Therefore, the results indicate that the application has potential for use in other asymmetric photovoltaic array configurations while preserving its operational performance.

Keywords: *photovoltaic systems; differential power processing; BBB-ReSC; asymmetric photovoltaic arrays; permanent mismatch.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Construção de um arranjo fotovoltaico.	2
Figura 2 – Comparação entre uma matriz fotovoltaica simétrica e uma matriz fotovoltaica assimétrica.	3
Figura 3 – Circuito elétrico da célula fotovoltaica.	7
Figura 4 – Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.	8
Figura 5 – Região de polarização reversa da curva I-V.	9
Figura 6 – Série fotovoltaica composta por três módulos uniformemente iluminados.	10
Figura 7 – Série fotovoltaica composta por três módulos não uniformemente iluminados.	11
Figura 8 – Módulos degradados.	12
Figura 9 – Operação da <i>string</i> fotovoltaica em condição de descasamento.	12
Figura 10 – Operação do conversor DPP na equalização das tensões dos módulos fotovoltaicos.	15
Figura 11 – Principais arquiteturas de Processamento Diferencial de Potência aplicadas a sistemas fotovoltaicos.	15
Figura 12 – Topologias de desviadores de corrente FV-FV	17
Figura 13 – Topologias de desviadores de corrente FV-bus	18
Figura 14 – Topologia Híbrida de desviador de corrente	18
Figura 15 – Estrutura do conversor <i>Buck-Boost</i> Bidirecional.	19
Figura 16 – Estrutura do conversor a Capacitor Chaveado Ressonante.	20
Figura 17 – Tipos de interconexões entre os módulos fotovoltaicos	22
Figura 18 – Conversor BBB-ReSC aplicado a uma matriz fotovoltaica.	23
Figura 19 – Principais topologias utilizadas em conversores DPP.	27
Figura 20 – Arquitetura BBB-ReSC para diferentes quantidades de módulos fotovoltaicos.	28
Figura 21 – Topologia BBB-ReSC com indutor L_{f1} e composta por quatro módulos fotovoltaicos divididos em dois grupos.	29
Figura 22 – BBB-ReSC-M segregado em 2 grupos	30
Figura 23 – Implementação computacional do conversor BBB-ReSC-M em matriz fotovoltaica assimétrica com os parâmetros dimensionados.	35
Figura 24 – Exemplos de associações assimétricas de painéis fotovoltaicos.	40
Figura 25 – Configuração 1 do sistema fotovoltaico assimétrico com o conversor BBB-ReSC-M.	42
Figura 26 – Formas de onda da corrente, tensão e potência para a Configuração 1.	43
Figura 27 – Comportamento da corrente na Configuração 1.	44
Figura 28 – Comportamento da tensão na Configuração 1.	44

Figura 29 – Comportamento da potência na Configuração 1.	45
Figura 30 – Configuração 2 do sistema fotovoltaico assimétrico com o conversor BBB-ReSC-M.	45
Figura 31 – Formas de onda da corrente, tensão e potência para a Configuração 2. .	46
Figura 32 – Comportamento da corrente na Configuração 2 antes e após a desabi- litação do conversor BBB-ReSC-M.	47
Figura 33 – Comportamento da tensão na Configuração 2 antes e após a desabili- tação do conversor BBB-ReSC-M.	48
Figura 34 – Comportamento da potência na Configuração 2 antes e após a desabi- litação do conversor BBB-ReSC-M.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados elétricos dos módulos fotovoltaicos RSM020P e KMP-10 em condições padrão de teste (STC).	33
Tabela 2 – Especificações do conversor BBB-ReSC-M para aplicação em matriz fotovoltaica assimétrica nas condições padrão de teste (STC).	34
Tabela 3 – Síntese dos resultados obtidos em ambiente simulacional.	49

Lista de siglas e abreviaturas

BBB	<i>Buck-Boost</i> Bidirecional
BBB-ReSC	<i>Buck-Boost</i> Bidirecional com Capacitor Chaveado Ressonante
BBB-ReSC-M	<i>Buck-Boost</i> Bidirecional com Capacitor Chaveado Ressonante aplicado a Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas
DPP	Processamento Diferencial da Potência (DPP , do inglês <i>Differential Power Processing</i>)
FV	Fotovoltaico (FV)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC , do inglês <i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
MME	Ministério de Minas e Energia (MME)
ReSC	Conversor a Capacitor Chaveado Ressonante (ReSC , do inglês <i>Resonant Switched Capacitor</i>)
TCT	Conexão Total-Cruzada (TCT , do inglês <i>total cross-tied</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e Justificativa	3
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivo Geral	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Fundamentação Teórica	6
2.1.1	Conceitos Básicos de Sistemas fotovoltaicos	6
2.1.2	Problema do Descasamento	10
2.2	Estratégias de Mitigação do Descasamento	13
2.2.1	Processamento Diferencial de Potência	14
2.2.1.1	FV-FV	16
2.2.1.2	FV-bus	16
2.2.1.3	Híbrida	18
2.2.1.4	BBB-ReSC	19
2.3	Interconexão Entre os Módulos	20
2.4	Topologia Adotada	22
2.5	Considerações Finais	24
3	TOPOLOGIAS BASE	25
3.1	Conceitos Básicos	25
3.1.1	Conversor <i>Buck-boost</i> Bidirecional - BBB	25
3.1.2	Conversor a Capacitor Chaveado Ressonante - ReSC	26
3.1.3	Conversor BBB-ReSC	26
3.2	Conversor BBB-ReSC-M	29
3.3	Considerações Finais	32
4	DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES PARA APLICAÇÃO DO CONVERSOR BBB-RESC	33
4.1	Especificações de Projeto	33
4.2	Dimensionamento do Indutor	35
4.3	Dimensionamento dos Capacitores do Conversor	36
4.4	Dimensionamento do Tanque Ressonante do Conversor ReSC	38
4.5	Considerações Finais	39

5	AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL, RESULTADOS E DISCUS-	
	SÃO	40
5.1	BBB-ReSC-M em Configuração Assimétrica	40
5.2	Metodologia de Avaliação	41
5.3	Configuração 1	41
5.3.1	Definição do Arranjo e Cálculo de R_{MPP}	41
5.3.2	Resultados e Discussão	42
5.4	Configuração 2	45
5.4.1	Definição do Arranjo e Cálculo de R_{MPP}	45
5.4.2	Resultados e Discussão	46
5.5	Comparação Entre as Configurações	49
5.6	Considerações Finais	49
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52

1 Introdução

Este trabalho investiga a aplicação do conversor [BBB-ReSC-M](#) em matrizes fotovoltaicas assimétricas como estratégia para mitigar os efeitos do descasamento permanente entre módulos fotovoltaicos. Embora a topologia [BBB-ReSC](#) tenha sido previamente proposta na literatura e apresente elevado potencial para aplicações baseadas em Processamento Diferencial de Potência ([DPP](#)), sua utilização em matrizes fotovoltaicas assimétricas ainda não havia sido investigada.

Nesse contexto, mantém-se a estrutura original do conversor, sem modificações em sua topologia ou estratégia de operação, direcionando a contribuição deste trabalho para a avaliação de sua aplicação em diferentes configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas. Assim, busca-se analisar a capacidade do [BBB-ReSC-M](#) de preservar suas características operacionais, mitigar os efeitos do descasamento permanente e aumentar o aproveitamento energético do sistema.

1.1 Contextualização

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea, motivando o desenvolvimento de políticas públicas e pesquisas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima ([IPCC](#), do inglês *The Intergovernmental Panel on Climate Change*), as atividades humanas intensificaram o aquecimento global, tornando urgente a adoção de medidas capazes de promover uma transição para modelos energéticos mais sustentáveis ([CLIMA, 2023](#)). Nesse contexto, a ampliação da participação das fontes renováveis e o aumento da eficiência energética destacam-se como estratégias fundamentais para a mitigação dos impactos ambientais.

Em consonância com essas diretrizes, a transição energética vem sendo impulsionada em diversos países, incluindo o Brasil. Segundo o Ministério de Minas e Energia ([MME](#)), esse processo consiste na substituição gradual de fontes fósseis por fontes renováveis, como solar, eólica, hidráulica e biomassa, reduzindo as emissões de dióxido de carbono e promovendo uma matriz elétrica mais sustentável ([ENERGIA, 2023](#)). Entre essas tecnologias, a geração solar fotovoltaica destaca-se pelo crescimento acelerado e pela contínua redução dos custos de implantação, tornando-se uma das principais alternativas para expansão da geração distribuída e centralizada de energia elétrica ([CLIMA, 2023](#)).

O efeito fotovoltaico foi identificado em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou a geração de uma diferença de potencial em placas metálicas expostas à luz solar. Essa descoberta possibilitou o desenvolvimento das primeiras células fotovoltaicas e estabeleceu os fundamentos para a conversão direta da energia solar em energia elétrica.

([BECQUEREL, 1839](#); [WILLIAMS, 1960](#)). Desde então, sucessivos avanços tecnológicos consolidaram a geração fotovoltaica como uma das principais fontes renováveis utilizadas atualmente.

As células fotovoltaicas constituem o elemento básico dessa tecnologia, sendo responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Fabricadas predominantemente a partir de silício cristalino, apresentam baixa tensão individual e, por esse motivo, são interligadas em série e em paralelo para formar módulos fotovoltaicos capazes de fornecer níveis adequados de tensão e corrente. A Figura 1 ilustra a composição de um arranjo fotovoltaico. A energia gerada em corrente contínua é posteriormente convertida em corrente alternada por meio de um inversor, possibilitando sua utilização nas instalações elétricas convencionais.

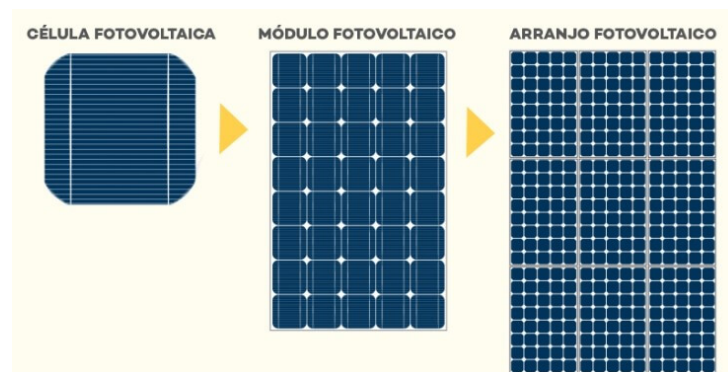


Figura 1 – Construção de um arranjo fotovoltaico.

Fonte: ([NEOSOLAR, 2022](#))

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: conectados à rede (*on-grid*), isolados (*off-grid*) e híbridos. Os sistemas *on-grid* operam interligados à rede elétrica, permitindo a injeção do excedente de energia na rede de distribuição. Os sistemas *off-grid* funcionam de forma autônoma, utilizando bancos de baterias para armazenamento de energia, enquanto os sistemas híbridos combinam as características das duas configurações, associando a conexão com a rede ao armazenamento em baterias. A escolha da configuração depende das características da instalação, da disponibilidade da rede elétrica e dos requisitos de operação do sistema.

Independentemente da configuração adotada, o desempenho do sistema fotovoltaico está diretamente relacionado à forma como os módulos são organizados no arranjo. Em aplicações práticas, a conexão em série é amplamente empregada para elevar o nível de tensão disponível na saída do gerador fotovoltaico. Nessa configuração, o terminal positivo de um módulo é conectado ao terminal negativo do módulo subsequente, resultando na soma das tensões individuais, enquanto a corrente permanece praticamente constante ao longo da série ([CRESESB, 2014](#)). Essa característica torna a conexão em série adequada para atender às exigências dos inversores e aumentar a eficiência da conversão de energia.

Entretanto, embora essa configuração proporcione vantagens operacionais, ela também torna o sistema mais sensível às condições de descasamento entre os módulos fotovoltaicos. Diferenças de irradiância, temperatura, envelhecimento ou sombreamento parcial podem reduzir significativamente a potência entregue pelo arranjo, comprometendo o desempenho global do sistema. Esse problema motivou o desenvolvimento de diferentes técnicas de mitigação, entre elas o Processamento Diferencial de Potência (DPP), tema central deste trabalho.

Além das condições de operação, a própria organização dos módulos no arranjo pode contribuir para o surgimento de diferenças elétricas entre seus ramos. Nesse contexto, destacam-se os arranjos fotovoltaicos assimétricos, caracterizados pela distribuição não uniforme de módulos entre os diferentes ramos. A Figura 2 apresenta uma comparação entre um arranjo fotovoltaico simétrico e um arranjo fotovoltaico assimétrico, evidenciando a principal diferença estrutural entre essas configurações.



(a) Matriz fotovoltaica simétrica.



(b) Matriz fotovoltaica assimétrica.

Figura 2 – Comparação entre uma matriz fotovoltaica simétrica e uma matriz fotovoltaica assimétrica.

Fonte: Energybras; Pixabay (2017);

1.2 Motivação e Justificativa

O desempenho de um sistema fotovoltaico está diretamente relacionado às condições de operação dos módulos que compõem o arranjo. Em aplicações reais, fatores como variações de irradiância, temperatura, sombreamento parcial, acúmulo de sujeira e envelhecimento dos módulos podem provocar diferenças nas características elétricas entre os elementos do sistema, dando origem ao fenômeno conhecido como descasamento (*mismatch*).

Além desses fatores, a configuração elétrica do arranjo fotovoltaico influencia diretamente a forma como os efeitos do descasamento se propagam pelo sistema. Em matrizes fotovoltaicas assimétricas, compostas por grupos de módulos com diferentes características elétricas, torna-se ainda mais importante a utilização de estratégias capazes de redistribuir a potência diferencial entre os grupos, preservando a eficiência global do arranjo.

O descasamento pode ser classificado como permanente ou temporário. O descasamento permanente está associado às características intrínsecas dos módulos, como tolerâncias de fabricação, degradação ao longo do tempo e diferenças de configuração do arranjo fotovoltaico. Já o descasamento temporário decorre de alterações nas condições de operação, como sombreamento parcial, variações de irradiância, diferenças de temperatura e acúmulo de sujeira sobre os módulos.

Independentemente de sua origem, o descasamento compromete a operação do sistema fotovoltaico no ponto de máxima potência, reduzindo a energia entregue à carga. Em situações mais severas, especialmente sob sombreamento parcial, podem ocorrer tensões reversas em módulos menos irradiados, favorecendo a formação de pontos quentes (*hot spots*). Nessas condições, parte da potência gerada pelo arranjo passa a ser dissipada na forma de calor, podendo acelerar a degradação dos módulos e reduzir sua vida útil (LUZ, 2018).

Com o objetivo de minimizar esses efeitos, diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos. Entre as soluções mais difundidas para o descasamento temporário destacam-se os módulos *half-cell*, os sistemas com microinversores e os diodos de *bypass*.

- **Módulos *half-cell***

Consistem na divisão das células do módulo em duas partes eletricamente independentes, reduzindo as perdas provocadas pelo sombreamento parcial e as perdas ôhmicas. Como desvantagens, apresentam maior complexidade construtiva e custo mais elevado.

- **Sistemas com microinversores**

Nessa arquitetura, cada módulo fotovoltaico possui um inversor dedicado, permitindo o rastreamento individual do ponto de máxima potência. Embora essa solução reduza os efeitos do descasamento, seu custo de implantação e manutenção é superior ao das arquiteturas convencionais.

- **Diodos de *bypass***

Conectados em paralelo aos módulos fotovoltaicos, os diodos de *bypass* evitam a circulação de corrente reversa durante situações de sombreamento, protegendo os módulos contra a formação de *hot spots*. Apesar de sua ampla utilização, essa estratégia contorna o módulo afetado, reduzindo a potência disponível e provocando deformações na curva característica do arranjo.

Embora essas técnicas apresentem bons resultados na mitigação dos descasamentos temporários, elas não atuam de forma eficiente sobre os descasamentos permanentes, motivando o desenvolvimento de estratégias baseadas no Processamento Diferencial de Potência (DPP). Nessa abordagem, conversores eletrônicos são conectados em paralelo aos módulos fotovoltaicos para redistribuir a potência diferencial entre eles, permitindo

que o arranjo opere mais próximo do ponto de máxima potência mesmo sob condições de descasamento.

Entre as arquiteturas de [DPP](#) propostas na literatura, destaca-se a topologia [BBB-ReSC](#), apresentada por ([LUZ, 2023](#)), que demonstrou ganhos de eficiência quando aplicada a séries fotovoltaicas compostas por quatro, seis e oito módulos. Neste trabalho, investiga-se sua aplicação em matrizes fotovoltaicas assimétricas, denominada [BBB-ReSC-M](#), com o objetivo de avaliar seu desempenho sob diferentes configurações de arranjo.

Dando continuidade a essa pesquisa, o presente trabalho propõe a aplicação do conversor [BBB-ReSC-M](#) em matrizes fotovoltaicas assimétricas, mantendo sua estrutura original e investigando seu desempenho em diferentes configurações de arranjos fotovoltaicos. Dessa forma, busca-se avaliar a capacidade da topologia em mitigar os efeitos do descasamento e maximizar o aproveitamento da potência gerada sem a necessidade de modificações em sua arquitetura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar o desempenho do conversor [BBB-ReSC-M](#) aplicado a matrizes fotovoltaicas assimétricas, avaliando sua capacidade de realizar o Processamento Diferencial de Potência ([DPP](#)), mitigar os efeitos do descasamento permanente e maximizar o aproveitamento da potência gerada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos, descasamento entre módulos e técnicas de [DPP](#);
- Apresentar os fundamentos teóricos e o princípio de funcionamento do conversor [BBB-ReSC-M](#);
- Propor duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas para aplicação do conversor [BBB-ReSC-M](#);
- Implementar, no ambiente MATLAB/Simulink, as configurações propostas utilizando o conversor [BBB-ReSC-M](#);
- Avaliar computacionalmente o desempenho da aplicação proposta por meio da comparação entre a operação do sistema com o conversor habilitado e desabilitado;
- Verificar a capacidade do conversor [BBB-ReSC-M](#) de mitigar os efeitos do descasamento e maximizar o aproveitamento da potência em matrizes fotovoltaicas assimétricas.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta os principais fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são revisados os conceitos básicos relacionados aos sistemas fotovoltaicos e ao comportamento elétrico dos módulos [FV](#). Em seguida, são discutidos os efeitos do descasamento entre módulos, suas consequências sobre o desempenho dos arranjos fotovoltaicos e as principais estratégias de mitigação propostas na literatura. Por fim, são apresentadas as arquiteturas baseadas em [DPP](#), que fundamentam a modelagem do conversor [BBB-ReSC-M](#) e sua posterior aplicação em matrizes fotovoltaicas assimétricas.

2.1 Fundamentação Teórica

A compreensão dos fenômenos que influenciam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos requer o conhecimento de seus princípios de funcionamento e das características elétricas que governam a operação dos módulos. Nesta seção, são apresentados os conceitos fundamentais que servirão de base para a análise do descasamento e das técnicas de mitigação abordadas nas seções seguintes.

2.1.1 Conceitos Básicos de Sistemas fotovoltaicos

Para compreender o comportamento elétrico dos sistemas fotovoltaicos, é necessário analisar a relação entre a tensão e a corrente nos terminais dos módulos. Para essa finalidade, utiliza-se o circuito elétrico equivalente ilustrado na [Figura 3](#), derivado do modelo físico da célula fotovoltaica e amplamente empregado para descrever seu comportamento elétrico ([COELHO; CONGER; MARTINS, 2009](#); [VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009b](#)). Diversos modelos foram propostos desde a descoberta do efeito fotovoltaico; entretanto, o modelo de um diodo permanece como o mais difundido na literatura devido ao seu equilíbrio entre simplicidade e precisão, sendo ilustrado na [Figura 3](#) ([VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a](#)).

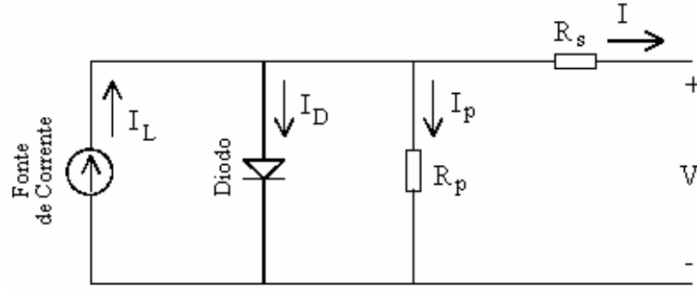


Figura 3 – Circuito elétrico da célula fotovoltaica.

Fonte: Cabral et al. (2004).

A relação entre a tensão (V) e a corrente (I) nos terminais do módulo fotovoltaico é obtida por meio da aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff ao circuito elétrico equivalente, resultando na expressão apresentada em (2.1).

$$I = I_L - I_D - I_p. \quad (2.1)$$

Conforme apresentado em (COELHO; CONGER; MARTINS, 2009), essa expressão pode ser expandida de forma a contemplar todos os parâmetros que influenciam o comportamento elétrico da célula. Assim, obtém-se a equação geral que descreve o funcionamento da célula ou do módulo fotovoltaico, apresentada em (2.2).

$$I = \frac{S}{S_{\text{ref}}} [I_{L,\text{ref}} + K_I (T - T_{\text{ref}})] - I_0 \left[e^{\frac{(V + R_s I)}{n_s a V_t}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_p} \right). \quad (2.2)$$

Conforme estabelecido pela norma IEC 60904-3:2016, as Condições Padrão de Teste (STC, do inglês *Standard Test Conditions*) correspondem à irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e espectro solar de referência AM1.5.

Sendo:

- I_L – Corrente fotogerada pela incidência da radiação solar (A);
- I_D – Corrente que atravessa o diodo (A);
- I_p – Corrente de fuga na resistência paralela (A);
- I – Corrente de saída da célula fotovoltaica (A);
- V – Tensão nos terminais da célula (V);
- R_s – Resistência série equivalente (Ω);
- R_p – Resistência paralela equivalente (Ω);

Observa-se que a Equação (2.2) estabelece a relação entre a tensão e a corrente do módulo fotovoltaico. Entretanto, para sua completa utilização, é necessário determinar todos os parâmetros envolvidos. Parte dessas informações pode ser obtida diretamente nos *datasheets* dos fabricantes. Contudo, cinco parâmetros não são normalmente fornecidos: I_{phref} , I_0 , a , R_S e R_p . Além disso, trata-se de uma equação transcendental, cuja solução exige a utilização de métodos numéricos iterativos para a determinação desses parâmetros (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009a).

Uma vez determinados todos os parâmetros, torna-se possível construir as curvas características do módulo fotovoltaico. A Figura 4 apresenta uma curva típica I-V e sua correspondente curva P-V, fundamentais para a compreensão do fenômeno do descasamento discutido na próxima seção.

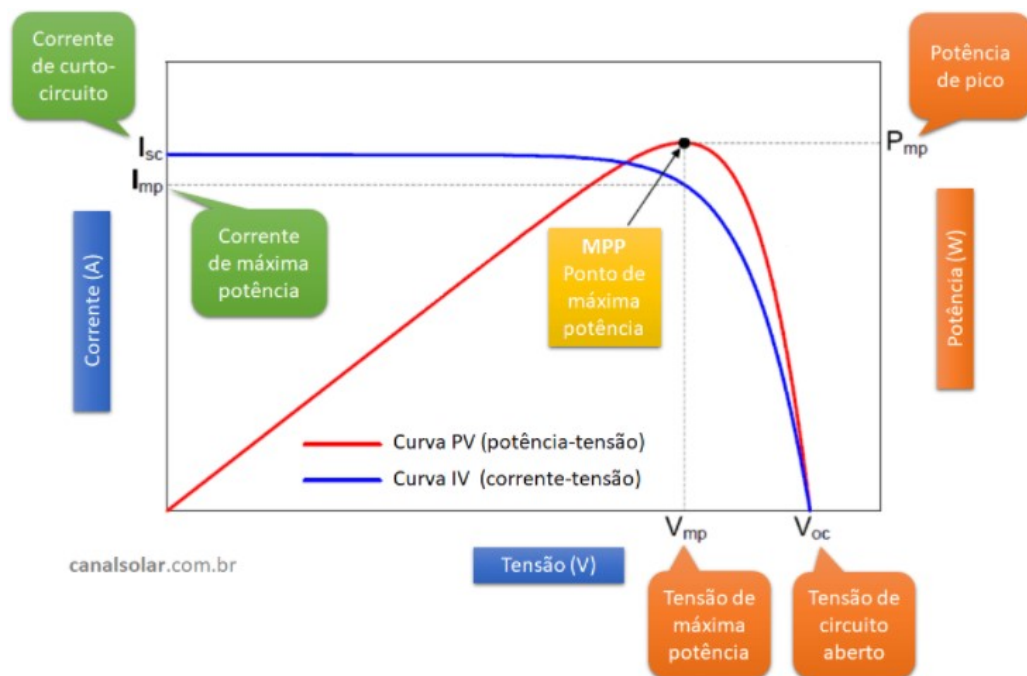


Figura 4 – Curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.

Fonte: Canal Solar

Das curvas apresentadas, destacam-se cinco pontos característicos:

- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): corrente fornecida pelo módulo quando seus terminais são curto-circuitados, representando a máxima corrente gerada para uma determinada condição de operação;
- Corrente no ponto de máxima potência (I_{MP}): corrente correspondente ao ponto de máxima potência do módulo;
- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): tensão medida nos terminais do módulo em circuito aberto, representando a máxima tensão gerada;

- Tensão no ponto de máxima potência (V_{MP}): tensão correspondente ao ponto de máxima potência;
- Potência máxima (P_{MP}): maior potência que pode ser fornecida pelo módulo para uma determinada condição de operação.

Embora a Figura 4 apresente os principais pontos de operação das curvas I-V e P-V, ela não contempla a região de polarização reversa, ilustrada na Figura 5. Essa região possui papel fundamental na compreensão dos efeitos do descasamento em sistemas fotovoltaicos.

Na polarização reversa, o diodo interno da célula fotovoltaica é submetido a uma tensão aplicada em sentido oposto ao de condução, isto é, o cátodo apresenta potencial mais positivo que o ânodo. Nessa condição, o diodo bloqueia praticamente toda a circulação de corrente, permitindo apenas uma corrente de fuga de pequena magnitude. Entretanto, caso a tensão reversa ultrapasse o valor de ruptura do diodo, ocorre uma condução intensa que pode provocar danos permanentes ao dispositivo caso não existam mecanismos adequados de proteção.

Em módulos fotovoltaicos submetidos a condições de descasamento, essa região assume especial importância, pois módulos parcialmente sombreados ou com características elétricas distintas podem ser forçados a operar sob polarização reversa. Nessa situação, o módulo deixa de fornecer potência ao sistema e passa a dissipar energia na forma de calor, fenômeno diretamente associado à formação de pontos quentes (*hot spots*) e à degradação prematura dos módulos fotovoltaicos. Por esse motivo, a compreensão da região de polarização reversa constitui um dos fundamentos para o estudo das técnicas de mitigação do descasamento, abordadas na seção seguinte.

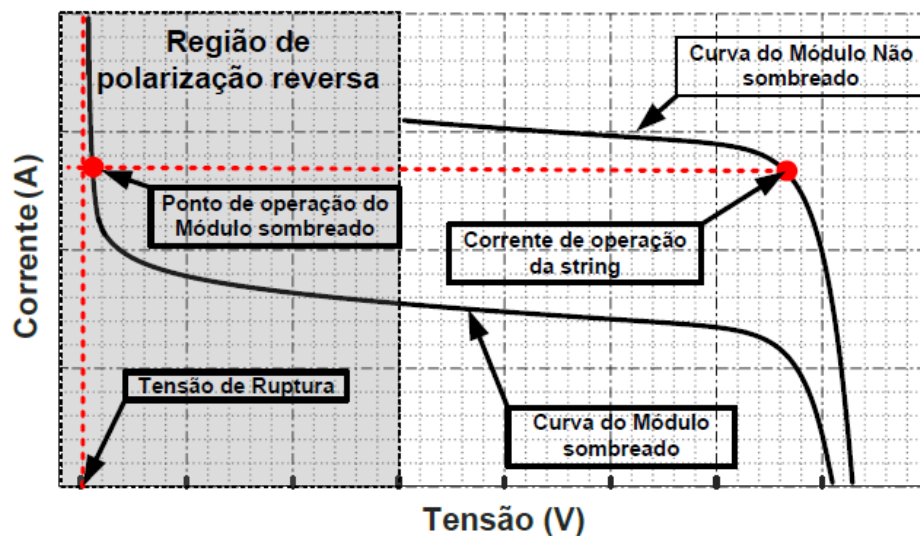


Figura 5 – Região de polarização reversa da curva I-V.

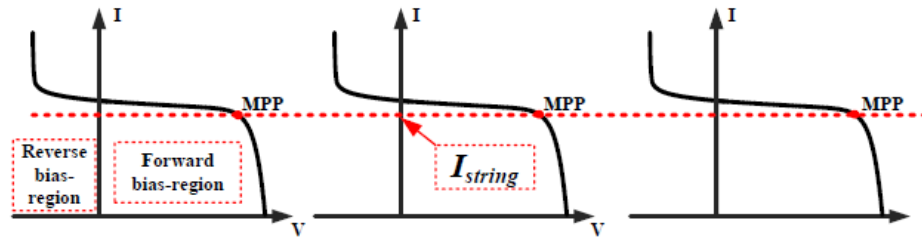
Fonte: Adaptado de (LUZ; RIBEIRO; TOFOLI, 2022)

2.1.2 Problema do Descasamento

A fim de compreender o fenômeno do descasamento, considera-se inicialmente uma série fotovoltaica composta por três módulos, conforme ilustrado na Figura 6a. Para que seja extraída a máxima potência de uma *string* fotovoltaica, todos os módulos que a compõem devem fornecer o mesmo nível de corrente. Nessas condições, cada módulo opera em seu respectivo ponto de máxima potência, conforme ilustrado na Figura 6b, possibilitando a máxima extração de potência da série fotovoltaica.



(a) Série fotovoltaica



(b) Ponto de operação dos módulos

Figura 6 – Série fotovoltaica composta por três módulos uniformemente iluminados.

Fonte: Do autor.

Quando um dos módulos passa a apresentar características elétricas diferentes das demais unidades da série, seja em decorrência de descasamentos permanentes ou temporários, estabelece-se uma condição de descasamento entre os módulos. Como consequência, a corrente deixa de ser uniforme ao longo da série fotovoltaica, impossibilitando que todos os módulos operem simultaneamente em seus respectivos pontos de máxima potência.

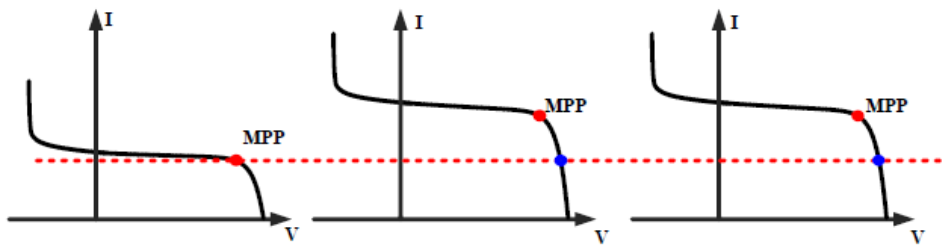
Para fins didáticos, a Figura 7a ilustra uma condição de descasamento provocada por sombreamento parcial. Dependendo da corrente drenada pela carga conectada à série fotovoltaica, duas condições distintas de operação podem ser observadas:

- Na primeira condição, ilustrada pela Figura 7b, o ponto de operação da série fotovoltaica coincide com o ponto de máxima potência do módulo descasado. Consequentemente, a corrente fornecida por esse módulo limita a corrente dos demais módulos da série, impedindo que eles operem em seus respectivos pontos de máxima potência. Embora essa condição provoque redução na potência total fornecida pela série fotovoltaica, não há risco imediato de danos físicos aos módulos.
- Na segunda condição, ilustrada pela Figura 7c, o ponto de operação da série fotovoltaica coincide com o ponto de máxima potência dos módulos não descasados. Nessa

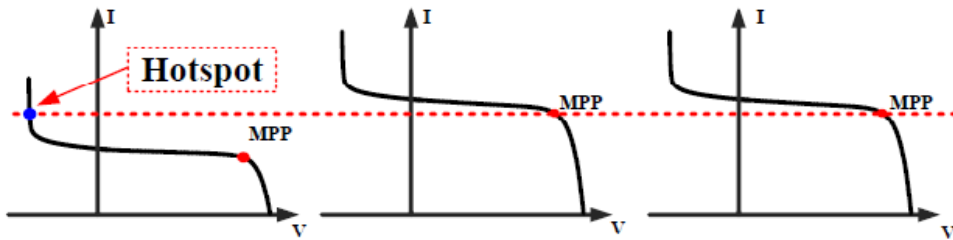
situação, a corrente correspondente ao ponto de máxima potência desses módulos torna-se superior à corrente de curto-circuito do módulo descalado, deslocando seu ponto de operação para a região de polarização reversa, caracterizada por tensões negativas e correntes positivas.



(a) Série fotovoltaica com sombreamento



(b) Ponto de operação com MPP do módulo sombreado



(c) Ponto de operação com MPP dos módulos não sombreados

Figura 7 – Série fotovoltaica composta por três módulos não uniformemente iluminados.

Fonte: Do autor.

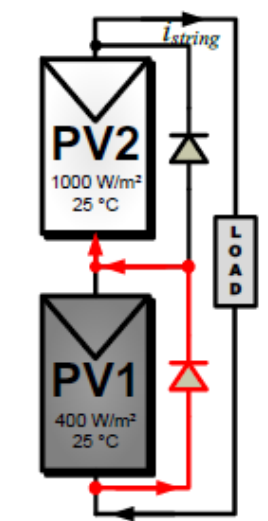
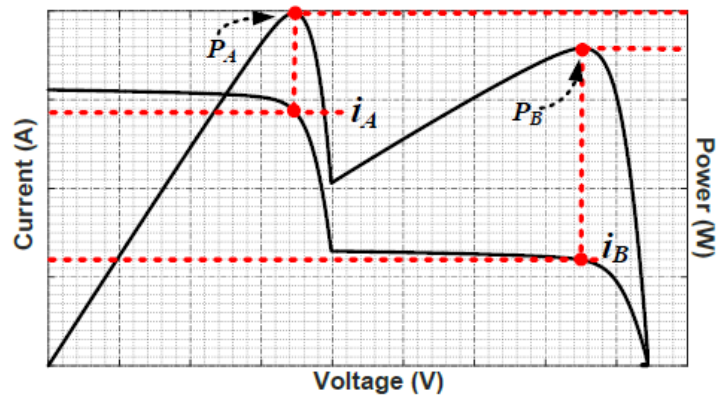
Como consequência, o módulo descalado deixa de fornecer potência ao sistema e passa a dissipar energia na forma de calor, comportando-se temporariamente como uma carga elétrica. Esse fenômeno dá origem aos chamados pontos quentes (*hot spots*), que, em situações severas, podem levar o módulo à tensão de ruptura e provocar sua degradação permanente, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 8 – Módulos degradados.

Fonte: Canal Solar

Com o objetivo de mitigar os efeitos do descasamento e evitar a formação de pontos quentes, utiliza-se, tradicionalmente, o diodo de desvio (*bypass diode*) (GUERRIERO; TRICOLI; DALIENTO, 2019). Nessa estratégia, diodos de junção são conectados em antiparalelo aos módulos fotovoltaicos, conforme ilustrado na Figura 9a. Durante a operação normal do módulo, o diodo de desvio permanece reversamente polarizado e não conduz corrente. Entretanto, quando o módulo passa a operar na região de polarização reversa, o diodo é diretamente polarizado, fornecendo um caminho de baixa resistência para a corrente da série fotovoltaica. Como consequência, o módulo descasado é desviado do circuito, evitando a ocorrência de pontos quentes e reduzindo o risco de danos permanentes ao módulo.

(a) *String* com diodo *bypass*.(b) Características P-V e I-V da *string* com diodo *bypass*.Figura 9 – Operação da *string* fotovoltaica em condição de descasamento.

Fonte: (LUZ; RIBEIRO; TOFOLI, 2022)

Embora essa estratégia elimine os problemas associados à polarização reversa, algumas limitações ainda podem ser observadas:

- Durante a atuação do diodo de desvio, ocorre uma deformação da curva P–V da série fotovoltaica, conforme ilustrado na Figura 9b. Como consequência, os métodos convencionais de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*), como o método Perturba e Observa (P&O) e a Condutância Incremental (CI), tornam-se incapazes, na maioria das situações, de localizar o ponto de máxima potência global, sendo necessária a utilização de algoritmos mais robustos e complexos.
- Outra limitação decorre do fato de que o módulo descasado, embora ainda seja capaz de gerar parte de sua potência, é completamente retirado da operação pelo diodo de desvio. Dessa forma, mesmo quando a série fotovoltaica opera no ponto de máxima potência global, parte da energia disponível deixa de ser aproveitada, reduzindo a potência total entregue pelo sistema.

Na Figura 9b, os níveis de corrente I_A e I_B representam diferentes condições de operação da série fotovoltaica sob descasamento. Para a corrente I_A , o módulo não sombreado opera próximo ao seu ponto de máxima potência, enquanto o módulo sombreado é desviado pelo diodo de *bypass*, deixando de contribuir para a potência fornecida pela série. Por outro lado, para a corrente I_B , o módulo sombreado permanece em operação próximo ao seu ponto de máxima potência, porém sua menor capacidade de geração limita a corrente da série e impede que o módulo não sombreado opere em seu próprio ponto de máxima potência.

Com base nessas observações, verifica-se que o diodo de *bypass* exerce exclusivamente a função de proteger o módulo submetido à polarização reversa, evitando sua degradação física. Entretanto, essa estratégia não recupera a potência que deixa de ser fornecida pelo módulo descasado, uma vez que ele é temporariamente excluído da geração de energia.

Essa limitação motivou o desenvolvimento de técnicas baseadas em Processamento Diferencial de Potência (DPP), capazes de redistribuir a potência entre os módulos fotovoltaicos e reduzir as perdas provocadas pelo descasamento. Essas arquiteturas são apresentadas na seção seguinte e constituem a base para o desenvolvimento das topologias discutidas neste trabalho.

2.2 Estratégias de Mitigação do Descasamento

Encontram-se na literatura especializada diversas soluções na tentativa de mitigar o efeito do descasamento. Essas estratégias podem ser divididas em técnicas passivas e ativas. Dentre as técnicas passivas, pode-se mencionar a interconexão (IC) entre os

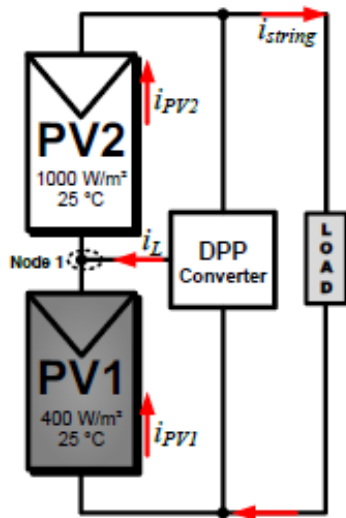
módulos e dentre as técnicas ativas destacam-se as soluções baseadas em eletrônica de potência. Nas próximas seções serão detalhadas cada uma dessas estratégias.

2.2.1 Processamento Diferencial de Potência

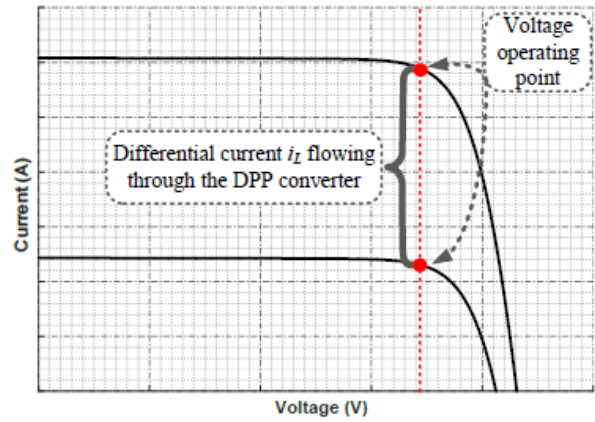
O **DPP** consiste em uma estratégia baseada em eletrônica de potência que tem recebido crescente atenção na literatura por sua elevada eficiência na mitigação dos efeitos do descasamento em sistemas fotovoltaicos (SHENOY et al., 2012; LUZ; RIBEIRO; TOFOLI, 2022). Diferentemente das técnicas convencionais, que apenas protegem os módulos submetidos ao descasamento, essa abordagem permite o processamento seletivo da potência entre módulos adjacentes, favorecendo o melhor aproveitamento da energia disponível no arranjo fotovoltaico.

Nessa estratégia, conversores CC-CC, denominados conversores **DPP**, são conectados em paralelo aos módulos fotovoltaicos, que permanecem interligados em série, conforme ilustrado na Figura 10a. A principal vantagem dessa configuração é que apenas a corrente diferencial, isto é, a diferença entre as correntes geradas por módulos adjacentes, é processada pelo conversor, conforme ilustrado na Figura 10b (LUZ; RIBEIRO; TOFOLI, 2022). Essa corrente é temporariamente armazenada no elemento de armazenamento de energia do conversor e posteriormente transferida ao módulo descasado, promovendo sua compensação.

Como consequência, as tensões dos módulos tendem a permanecer equalizadas, permitindo que cada módulo opere próximo ao seu respectivo ponto de máxima potência. Dessa forma, diferentemente da estratégia baseada em diodos de *bypass*, na qual a potência do módulo descasado deixa de ser aproveitada, o processamento diferencial possibilita o reaproveitamento dessa energia, aumentando a potência total entregue pelo sistema fotovoltaico.



(a) String com DPP

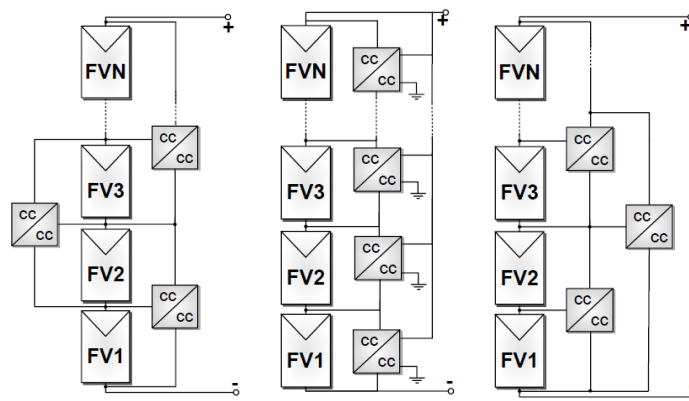


(b) Ilustração das correntes processadas pelo conversor

Figura 10 – Operação do conversor DPP na equalização das tensões dos módulos fotovoltaicos.

Fonte: (LUZ; RIBEIRO; TOFOLI, 2022)

A forma como os conversores DPP são conectados aos módulos fotovoltaicos dá origem a diferentes arquiteturas de processamento diferencial de potência. As principais configurações encontradas na literatura são as arquiteturas FV-FV, FV-bus e híbrida, apresentadas na Figura 11 (LUZ; TOFOLI; RIBEIRO, 2022). Cada uma delas apresenta características próprias, vantagens e limitações, que serão discutidas nas subseções seguintes.



(a) Arquitetura FV-FV (b) Arquitetura FV-bus (c) Arquitetura híbrida

Figura 11 – Principais arquiteturas de Processamento Diferencial de Potência aplicadas a sistemas fotovoltaicos.

Fonte: (LUZ, 2023)

2.2.1.1 FV-FV

Na arquitetura FV-FV, a transferência de potência é realizada diretamente entre módulos fotovoltaicos adjacentes. Como consequência dessa forma de interligação, surge um fenômeno conhecido como acúmulo de corrente desviada, no qual a corrente diferencial processada por um conversor pode se somar à corrente processada pelos conversores subsequentes. Em termos construtivos, essa arquitetura requer a utilização de $N - 1$ conversores DPP para uma série composta por N módulos fotovoltaicos.

Diversas topologias podem ser empregadas como conversores desviadores de corrente nessa arquitetura. Dentre as mais difundidas na literatura, destacam-se o conversor *Buck-Boost* Bidirecional e o Conversor de Capacitores Chaveados, apresentados na Figura 12. Embora ambos tenham como objetivo promover a compensação do descasamento por meio do processamento diferencial de potência, apresentam diferenças significativas quanto à estrutura física, ao princípio de funcionamento e ao desempenho operacional.

O conversor *Buck-Boost* Bidirecional, ilustrado na Figura 12a, utiliza um indutor como elemento armazenador de energia, promovendo a transferência da corrente diferencial entre módulos adjacentes e contribuindo para a equalização de suas tensões. Essa topologia apresenta elevado desempenho na maximização da potência extraída da série fotovoltaica, porém demanda maior número de componentes e uma estratégia de controle mais elaborada, o que aumenta sua complexidade de implementação.

Por sua vez, o Conversor de Capacitores Chaveados, apresentado na Figura 12b, utiliza capacitores como elementos de armazenamento temporário de energia. Seu funcionamento baseia-se no chaveamento periódico desses capacitores, promovendo a equalização das tensões entre módulos adjacentes e, consequentemente, o processamento da corrente diferencial. Entretanto, essa topologia está sujeita à ocorrência de elevados picos de corrente durante as comutações, aumentando as perdas por comutação dissipativa.

Com o objetivo de reduzir essas limitações, foi proposta na literatura a utilização do Conversor de Capacitores Chaveados Ressonantes (ReSC), no qual um indutor é inserido em série com o capacitor, formando um circuito ressonante sintonizado com a frequência de chaveamento. Essa modificação reduz significativamente os picos de corrente e, consequentemente, as perdas de comutação. Apesar dessa melhoria, a arquitetura ainda permanece sujeita ao fenômeno de acúmulo de corrente desviada, característica inerente à configuração FV-FV.

2.2.1.2 FV-bus

Na arquitetura FV-bus, a transferência de potência ocorre entre os módulos fotovoltaicos e o barramento principal da série fotovoltaica. Nessa configuração, cada módulo é associado a um conversor bidirecional, possibilitando sua operação de forma independente ou cooperativa. Na configuração cooperativa, a literatura emprega predominantemente o

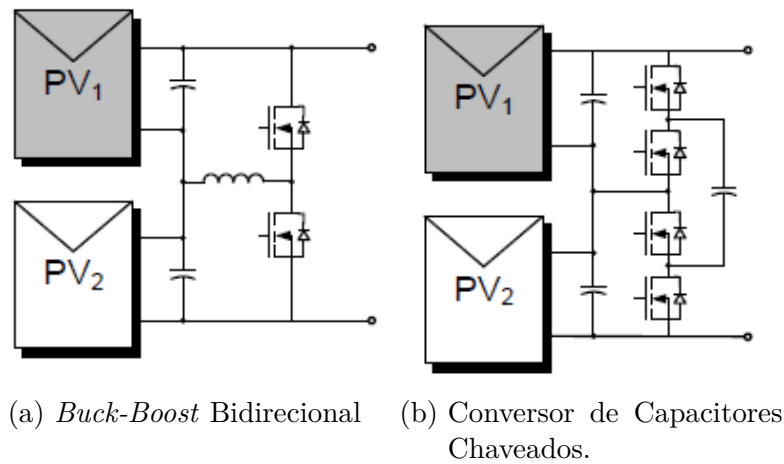


Figura 12 – Topologias de desviadores de corrente FV-FV

Fonte: (SANTOS, 2018)

conversor *Buck-Boost* Bidirecional (BBB), enquanto, na configuração independente, é mais comum a utilização do conversor *flyback* bidirecional (LUZ; TOFOLI; RIBEIRO, 2022). Ambas as configurações são apresentadas na Figura 13.

Devido à conexão direta com o barramento principal, a arquitetura FV-bus elimina o fenômeno de acúmulo de corrente desviada, característico da arquitetura FV-FV. Em contrapartida, os interruptores eletrônicos passam a ser submetidos a maiores esforços de tensão, aspecto que deve ser considerado durante o dimensionamento do conversor.

Na arquitetura FV-bus implementada com conversores BBB, ilustrada na Figura 13a, observa-se uma configuração semelhante à arquitetura FV-FV baseada no mesmo conversor. Entretanto, diferentemente da configuração anterior, cada meia-ponte possui seus terminais positivo e negativo conectados diretamente ao barramento da série fotovoltaica, enquanto os indutores permanecem conectados entre módulos adjacentes. Apesar das vantagens proporcionadas por essa configuração, o elevado esforço de tensão sobre os interruptores continua sendo uma de suas principais limitações.

Por outro lado, a arquitetura FV-bus implementada com conversores *flyback* bidirecionais, apresentada na Figura 13b, também tem como objetivo realizar o processamento diferencial da potência por meio da equalização das tensões entre os módulos fotovoltaicos. Entretanto, diferentemente das demais topologias DPP, nas quais apenas a potência diferencial é processada, o conversor *flyback* adicional encontra-se conectado em cascata, processando toda a potência da série fotovoltaica. Como consequência, exige maior potência nominal e apresenta perdas mais elevadas. Além disso, o esforço de tensão aplicado aos interruptores do lado primário do conversor é equivalente à tensão do módulo ao qual está conectado, característica que pode representar uma limitação dependendo da aplicação considerada.

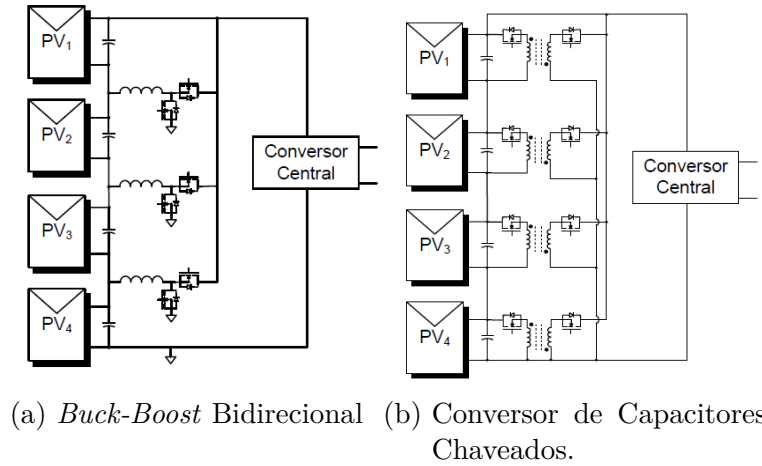


Figura 13 – Topologias de desviadores de corrente FV-bus

Fonte: (SANTOS, 2018)

2.2.1.3 Híbrida

Na arquitetura híbrida, ilustrada na Figura 14, os conversores são conectados tanto entre módulos fotovoltaicos adjacentes quanto entre os módulos e o barramento CC do inversor. Dessa forma, a transferência de potência ocorre parcialmente entre módulos e parcialmente entre os módulos e o barramento principal do sistema.

Essa configuração busca combinar as principais características das arquiteturas FV-FV e FV-bus, conciliando suas vantagens e reduzindo parte de suas limitações. Como resultado, apresenta uma implementação mais equilibrada em termos de número de componentes, facilidade de implementação e desempenho. Além disso, tanto o fenômeno de acúmulo de corrente desviada quanto o elevado esforço de tensão aplicado aos interruptores eletrônicos são atenuados quando comparados às arquiteturas anteriormente apresentadas.

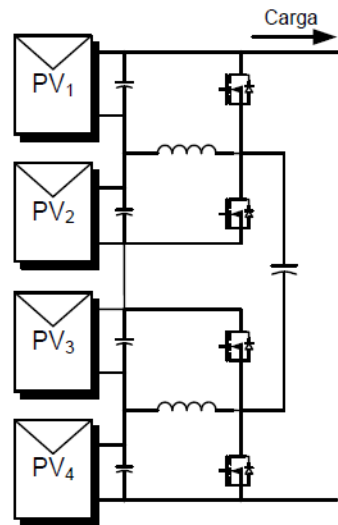


Figura 14 – Topologia Híbrida de desviador de corrente

Fonte: (SANTOS, 2018)

2.2.1.4 BBB-ReSC

Dentre as topologias baseadas em Processamento Diferencial de Potência, destaca-se o conversor BBB-ReSC, proposto por (LUZ; TOFOLI; RIBEIRO, 2022) como uma alternativa para a mitigação dos efeitos do descasamento em sistemas fotovoltaicos. Essa topologia constitui a base para o desenvolvimento do conversor BBB-ReSC-M, empregado neste trabalho. Para compreender seu princípio de funcionamento, torna-se necessário revisar, inicialmente, os conceitos fundamentais dos conversores *Buck-Boost* Bidirecional (BBB) e a Capacitor Chaveado Ressonante (ReSC), apresentados a seguir.

O conversor *Buck-Boost* Bidirecional (BBB) é um conversor CC-CC capaz de operar nos modos elevador (*Boost*) e abaixador (*Buck*) de tensão, permitindo o fluxo bidirecional de potência entre dois barramentos elétricos. Sua principal característica consiste na capacidade de processar energia em ambos os sentidos, possibilitando a transferência controlada de potência conforme as necessidades da aplicação.

A estrutura circuital do conversor é apresentada na Figura 15. Nessa configuração, a corrente do indutor (I_L) pode assumir ambos os sentidos, evidenciando a bidirecionalidade do fluxo de potência. O conversor é constituído por duas chaves semicondutoras (S_1 e S_2), dois capacitores (C_1 e C_2) e um indutor (L), sendo consideradas, na modelagem, as principais não idealidades dos componentes, como as resistências parasitas dos capacitores, das chaves e do indutor, além das quedas de tensão associadas aos diodos intrínsecos dos interruptores (CHU et al., 2017). Essa configuração permite o processamento bidirecional da potência sem a necessidade de estruturas adicionais de conversão, tornando o conversor BBB amplamente empregado em aplicações de Processamento Diferencial de Potência.

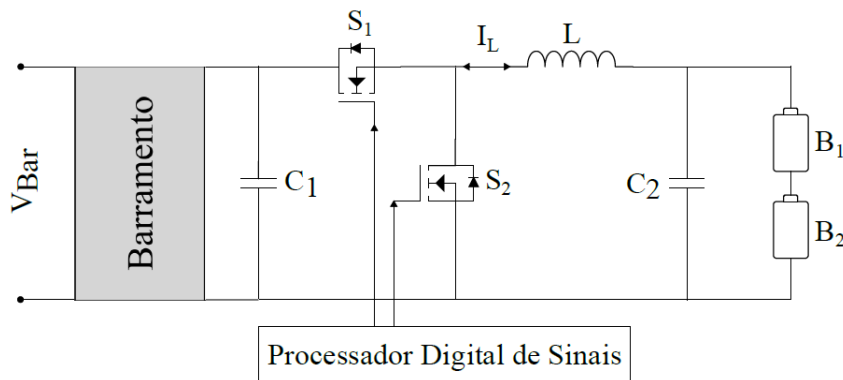


Figura 15 – Estrutura do conversor *Buck-Boost* Bidirecional.

Fonte: (FERRETI; GONSCHOROWSKI; CARDOSO, 2023)

O conversor a Capacitor Chaveado Ressonante (ReSC), por sua vez, corresponde a uma evolução do conversor a Capacitor Chaveado (SC), obtida pela inserção de um indutor em série com o capacitor flutuante. Essa modificação estabelece um circuito ressonante

capaz de reduzir os picos de corrente durante as comutações, minimizando as perdas por chaveamento e proporcionando maior eficiência ao conversor.

Na aplicação em sistemas fotovoltaicos, o conversor ReSC realiza a compensação do descasamento por meio do processamento diferencial da potência entre módulos adjacentes. Entretanto, por operar na arquitetura FV-FV, permanece sujeito ao fenômeno de acúmulo de corrente desviada, característica inerente a essa forma de interconexão.

A Figura 16 apresenta a estrutura simplificada do circuito ressonante, composta pelo capacitor flutuante (C_f), pelo indutor (L_f) e pela resistência equivalente (R_{tot}). Quando a frequência de chaveamento coincide com a frequência natural de ressonância do circuito LC, os efeitos reativos do indutor e do capacitor tendem a se compensar, reduzindo os esforços de comutação e favorecendo uma transferência de energia mais eficiente.

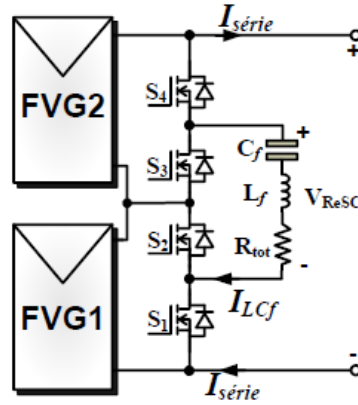


Figura 16 – Estrutura do conversor a Capacitor Chaveado Ressonante.

Fonte: (LUZ, 2023)

2.3 Interconexão Entre os Módulos

Além das técnicas baseadas em eletrônica de potência, a forma de interconexão entre os módulos fotovoltaicos também influencia diretamente o desempenho energético do sistema. Diferentes configurações de conexão apresentam comportamentos distintos frente às condições de descasamento, podendo favorecer uma melhor distribuição da corrente e da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico.

Na literatura são encontradas diversas configurações de interconexão, cada uma desenvolvida com o objetivo de atender diferentes requisitos de instalação, custo, facilidade de implementação e desempenho elétrico. A Figura 17 apresenta as principais arquiteturas empregadas em sistemas fotovoltaicos: série, paralelo, série-paralelo (SP), *total-cross-tied* (TCT), *bridge-link* (BL) e *honey-comb* (HC).

- **Interconexão em Série**

Nessa configuração, os módulos são conectados sequencialmente, formando um único caminho para circulação da corrente elétrica, conforme ilustrado na Figura 17a. Sua

principal vantagem consiste na simplicidade de implementação e no aumento da tensão total do arranjo. Entretanto, por existir apenas um caminho para a corrente, o desempenho da série passa a ser limitado pelo módulo que apresenta menor capacidade de geração, tornando essa configuração mais sensível aos efeitos do descasamento.

- **Interconexão em Paralelo**

Na conexão em paralelo, apresentada na Figura 17b, todos os módulos compartilham a mesma tensão, enquanto suas correntes são somadas. Essa configuração apresenta maior robustez frente ao descasamento, pois a redução de desempenho de um módulo interfere pouco na operação dos demais. Em contrapartida, exige maior capacidade de condução de corrente e um sistema de proteção mais elaborado.

- **Interconexão Série-Paralelo (SP)**

A configuração série-paralelo combina associações em série e em paralelo, buscando um equilíbrio entre os níveis de tensão e corrente do sistema, conforme ilustrado na Figura 17c. Essa arquitetura é amplamente empregada em sistemas fotovoltaicos comerciais por oferecer boa flexibilidade de projeto e adequado aproveitamento energético. Entretanto, seu desempenho ainda pode ser significativamente afetado por condições de descasamento entre os módulos.

- **Interconexão *Total-Cross-Tied* (TCT)**

Na configuração *Total-Cross-Tied* (TCT), apresentada na Figura 17d, os módulos são inicialmente conectados em paralelo e, posteriormente, as linhas resultantes são interligadas em série. Essa arquitetura proporciona melhor distribuição das correntes entre os módulos, reduzindo os efeitos do descasamento e apresentando elevado desempenho energético. Como desvantagem, requer maior quantidade de condutores, aumentando a complexidade de instalação.

- **Interconexão *Bridge-Link* (BL)**

Na arquitetura *Bridge-Link* (BL), ilustrada na Figura 17e, parte das conexões paralelas existentes na configuração TCT é eliminada por meio de ligações alternadas entre os módulos. Essa estratégia reduz a quantidade de cabos empregados e simplifica a instalação, mantendo a capacidade de reduzir as perdas de potência provocadas pelo descasamento entre os módulos em diferentes condições de operação. Entretanto, sua utilização ainda é menos frequente na prática.

- **Interconexão *Honey-Comb* (HC)**

A configuração *Honey-Comb* (HC), apresentada na Figura 17f, possui estrutura semelhante à arquitetura BL, utilizando conexões paralelas alternadas entre os módulos. Seu objetivo é reduzir a quantidade de interligações em relação à configuração

TCT, preservando parte de suas características elétricas. Apesar dessa simplificação construtiva, a redução das conexões também provoca diminuição da capacidade de redistribuição das correntes, resultando em desempenho inferior ao obtido pela arquitetura TCT.

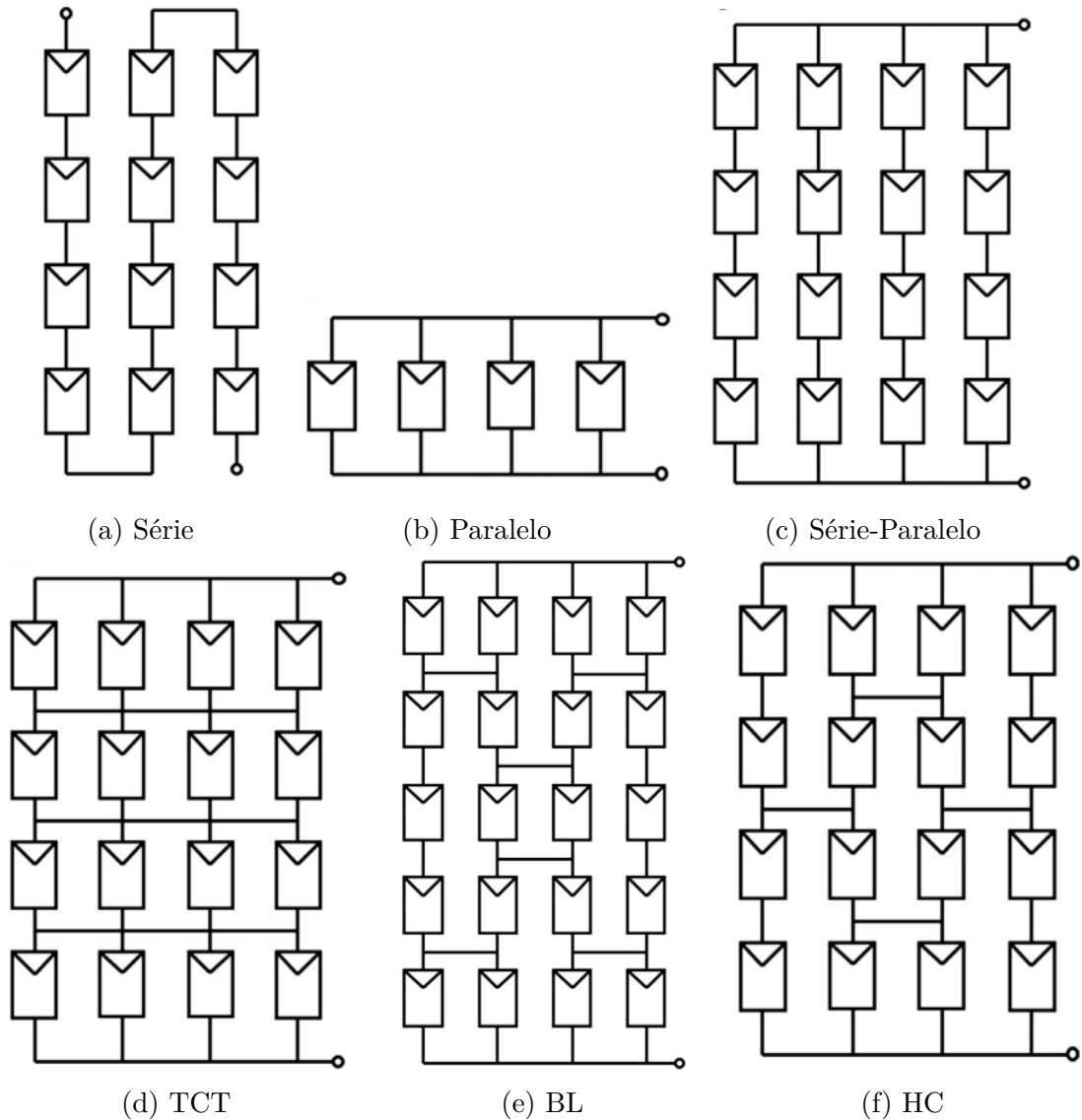


Figura 17 – Tipos de interconexões entre os módulos fotovoltaicos

Fonte: (MANNA et al., 2014)

2.4 Topologia Adotada

A Figura 18 apresenta a topologia BBB-ReSC aplicada a uma matriz fotovoltaica, estrutura adotada como base para o desenvolvimento deste trabalho. O conversor BBB-ReSC é empregado para realizar o Processamento Diferencial de Potência (DPP) entre os módulos fotovoltaicos, permitindo a redistribuição da potência em situações de descasamento.

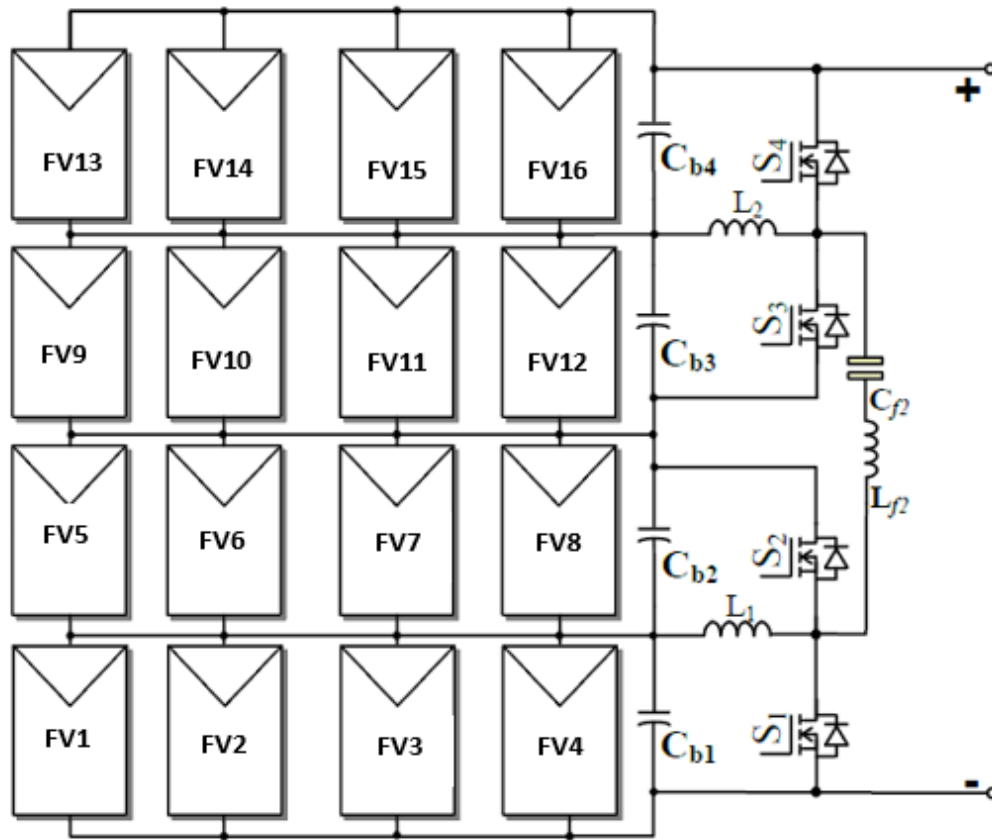


Figura 18 – Conversor BBB-ReSC aplicado a uma matriz fotovoltaica.

Fonte: Do Autor.

Neste trabalho, investiga-se a aplicação do conversor BBB-ReSC em matrizes fotovoltaicas assimétricas, caracterizadas por apresentarem diferentes quantidades de módulos em seus ramos. Essa aplicação é denominada, ao longo deste trabalho, BBB-ReSC-M. Ressalta-se que essa denominação não representa uma nova topologia de conversor, mas identifica a aplicação do BBB-ReSC à matriz fotovoltaica considerada no estudo.

A estrutura e a estratégia de operação do conversor BBB-ReSC são preservadas, sendo analisado seu comportamento diante das diferentes características elétricas decorrentes da assimetria dos arranjos. A utilização do conversor possibilita o processamento da potência diferencial entre os módulos, mantendo a característica de utilização de um único conversor para atuação sobre a matriz fotovoltaica.

Nos capítulos seguintes são apresentados o princípio de funcionamento do conversor BBB-ReSC, o dimensionamento de seus componentes e sua aplicação em duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas consideradas para a avaliação computacional.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados aos sistemas fotovoltaicos e às técnicas empregadas na mitigação dos efeitos do descasamento entre módulos. Inicialmente, foram apresentados os fundamentos do comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos, destacando-se a influência do descasamento sobre o desempenho energético do sistema e as limitações de técnicas convencionais, como a utilização do diodo de *bypass*.

Na sequência, foram discutidos os fundamentos do [DPP](#), bem como as principais arquiteturas e topologias encontradas na literatura para sua aplicação em sistemas fotovoltaicos. Também foram apresentadas diferentes formas de interconexão entre módulos, evidenciando a influência da configuração elétrica sobre o comportamento e o desempenho do arranjo fotovoltaico.

Por fim, foi apresentado o conversor BBB-ReSC e sua aplicação em matrizes fotovoltaicas, estrutura adotada como base para as análises desenvolvidas neste trabalho. A investigação concentra-se em sua aplicação a matrizes fotovoltaicas assimétricas, denominada neste estudo BBB-ReSC-M, com o objetivo de avaliar seu comportamento diante do descasamento permanente e sua capacidade de aumentar o aproveitamento da potência disponível nos módulos fotovoltaicos.

No capítulo seguinte são apresentados o princípio de funcionamento e as características operacionais do conversor BBB-ReSC, fornecendo a fundamentação necessária para seu dimensionamento e posterior aplicação às configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas avaliadas neste trabalho.

3 Topologias Base

Conforme apresentado no Capítulo 2, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para mitigar os efeitos provocados pelo descasamento em sistemas fotovoltaicos. Entre elas, destaca-se o conversor **BBB-ReSC-M**, já apresentado na Figura 18, cuja arquitetura reúne as vantagens das topologias *Buck-Boost* Bidirecional (**BBB**) e Conversor a Capacitor Chaveado Ressonante (**ReSC**, do inglês *Resonant Switched Capacitor*).

Diferentemente da proposta original do conversor, este trabalho não tem como objetivo modificar sua estrutura ou estratégia de controle. A contribuição desta pesquisa consiste em investigar uma nova forma de aplicação do **BBB-ReSC-M**, empregando-o em uma configuração de matriz fotovoltaica assimétrica composta por um número variável de módulos fotovoltaicos.

Assim, este capítulo apresenta inicialmente os conceitos fundamentais das topologias que constituem o conversor **BBB-ReSC-M** e em seguida, é descrito o princípio de funcionamento desse conversor, estabelecendo a base teórica para as análises realizadas nos capítulos seguintes.

3.1 Conceitos Básicos

3.1.1 Conversor *Buck-boost* Bidirecional - BBB

Ao analisar a Figura 15, observa-se que o conversor **BBB** é constituído por dois interruptores controlados e um indutor, responsável pelo armazenamento temporário e pela transferência de energia durante os intervalos de comutação. Na aplicação em Processamento Diferencial de Potência, sua principal função consiste em possibilitar a transferência bidirecional da potência diferencial entre módulos fotovoltaicos adjacentes submetidos a condições de descasamento.

Seu funcionamento ocorre em dois intervalos de comutação. No primeiro intervalo, o interruptor S_1 permanece em condução enquanto S_2 permanece bloqueado, permitindo o armazenamento de energia no campo magnético do indutor. No intervalo seguinte, os estados de condução dos interruptores são invertidos, fazendo com que a energia armazenada no indutor seja transferida ao módulo adjacente por meio do diodo de corpo de S_2 , compensando parcialmente a diferença de corrente entre os módulos.

Dessa forma, o conversor processa apenas a potência diferencial decorrente do descasamento, mantendo ambos os módulos em operação e aumentando o aproveitamento energético da série fotovoltaica. A variação da corrente no indutor é dada pela Equação (3.1), em que D representa a razão cíclica do conversor, f_{sw} a frequência de comu-

tação, L_1 a indutância e V_{OP} a tensão média de operação correspondente às tensões de máxima potência dos módulos adjacentes.

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{OP} D}{L_1 f_{sw}}. \quad (3.1)$$

3.1.2 Conversor a Capacitor Chaveado Ressonante - ReSC

O conversor [ReSC](#), ilustrado na Figura 16, consiste em uma evolução do conversor a capacitor chaveado convencional. Sua principal diferença está na inserção de um indutor em série com o capacitor flutuante, formando um circuito ressonante responsável por realizar a transferência de energia entre grupos adjacentes de módulos fotovoltaicos.

Seu funcionamento ocorre em dois intervalos de comutação. No primeiro intervalo, um conjunto de interruptores conecta o capacitor ao grupo de módulos de maior potencial elétrico, permitindo o armazenamento temporário de energia. No intervalo seguinte, os estados dos interruptores são invertidos e a energia armazenada é transferida ao grupo adjacente por meio do circuito ressonante.

A presença do circuito LC faz com que a corrente de transferência apresente comportamento aproximadamente senoidal, reduzindo os elevados picos de corrente característicos do conversor a capacitor chaveado convencional. Como consequência, são minimizadas as perdas por comutação, a impedância efetiva do conversor e os esforços elétricos impostos aos dispositivos semicondutores, resultando em maior eficiência e melhor desempenho na transferência da potência diferencial.

Essas características tornam o conversor ReSC uma alternativa mais adequada para aplicações de processamento diferencial de potência, especialmente em sistemas fotovoltaicos sujeitos a condições de descasamento, nos quais a elevada eficiência da transferência de energia é um requisito fundamental ([LUZ, 2023](#)).

3.1.3 Conversor BBB-ReSC

Conforme discutido nas seções anteriores, os conversores [BBB](#) e [ReSC](#) figuram entre as principais topologias empregadas em arquiteturas [DPP](#), ilustradas na Figura 19. Embora utilizem elementos distintos para o armazenamento e transferência de energia, ambas apresentam o mesmo objetivo: compensar os efeitos provocados pelo descasamento entre módulos fotovoltaicos, promovendo maior aproveitamento da potência disponível ([LUZ, 2023](#)).

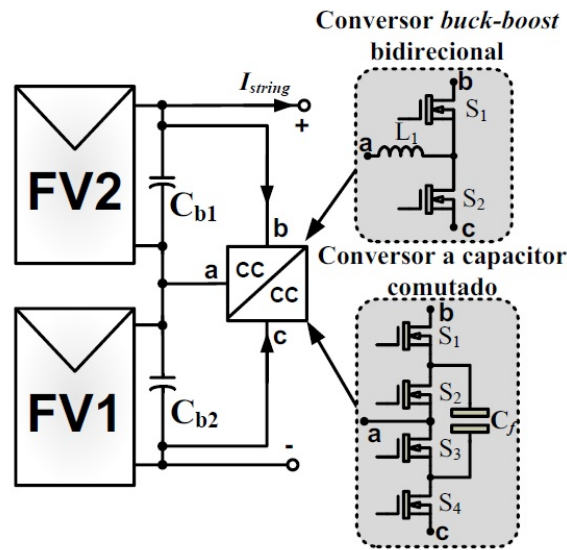
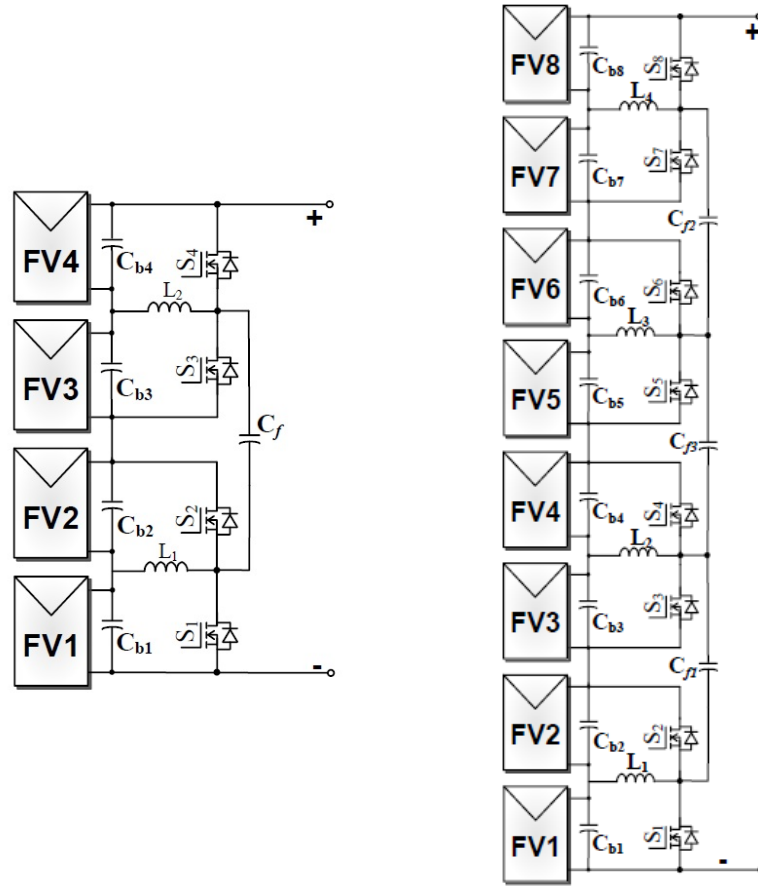


Figura 19 – Principais topologias utilizadas em conversores DPP.

Fonte: (LUZ, 2023)

Partindo desse princípio, Luz (LUZ, 2023) propôs uma nova arquitetura obtida pela combinação das características mais vantajosas dos conversores BBB e ReSC. A concepção dessa estrutura consiste em utilizar o conversor BBB para realizar o processamento diferencial da potência entre módulos pertencentes a um mesmo grupo fotovoltaico, enquanto o conversor ReSC é responsável pela transferência de energia entre grupos adjacentes. Essa estratégia permite reduzir as limitações observadas quando essas topologias são empregadas individualmente, resultando em uma arquitetura mais eficiente para mitigação dos efeitos do descasamento.

A Figura 20 apresenta a arquitetura originalmente proposta para uma série fotovoltaica composta por oito módulos, bem como sua adaptação para uma configuração com quatro módulos, adotada neste trabalho. A interligação entre os grupos é realizada pelo conversor ReSC, responsável pela redistribuição da potência diferencial ao longo da série fotovoltaica.



(a) BBB-ReSC para quatro módulos.

(b) BBB-ReSC para oito módulos.

Figura 20 – Arquitetura BBB-ReSC para diferentes quantidades de módulos fotovoltaicos.

Fonte: (LUZ, 2023)

Durante o desenvolvimento da topologia, verificou-se que a utilização do conversor a capacitor chaveado convencional apresentava limitações relacionadas à impedância efetiva do circuito e às perdas decorrentes da comutação dissipativa. Como forma de superar essas restrições, foi introduzido um pequeno indutor em série com o capacitor flutuante, formando um circuito ressonante e originando a topologia BBB-ReSC, ilustrada na Figura 21 para uma topologia composta por quatro módulos. Essa modificação proporcionou uma transferência de energia mais eficiente, reduzindo as perdas por comutação e os esforços elétricos impostos aos dispositivos semicondutores (LUZ, 2023).

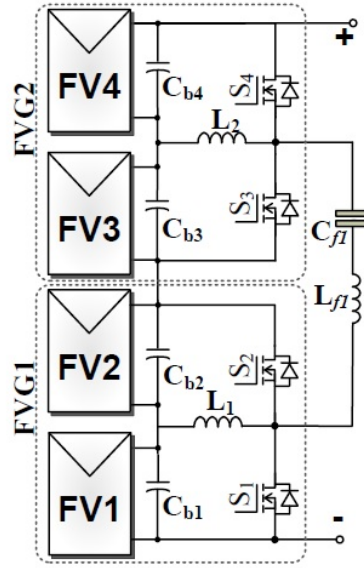


Figura 21 – Topologia BBB-ReSC com indutor L_{f1} e composta por quatro módulos fotovoltaicos divididos em dois grupos.

Fonte: (LUZ, 2023)

O princípio de funcionamento da topologia BBB-ReSC baseia-se na atuação conjunta dos conversores BBB e ReSC. Para facilitar a análise, os módulos foram organizados em dois grupos fotovoltaicos, denominados FVG_1 , FVG_2 , cada um composto por dois módulos conectados a um conversor BBB. Enquanto os conversores BBB realizam a compensação da corrente diferencial entre os módulos pertencentes a um mesmo grupo fotovoltaico, o conversor ReSC promove a transferência de potência entre grupos adjacentes. Dessa forma, a energia decorrente do descasamento é redistribuída ao longo da série fotovoltaica, permitindo que os módulos operem em condições mais próximas de seus respectivos pontos de máxima potência. Em séries compostas por seis ou mais módulos, essa estratégia resulta no fenômeno conhecido como acúmulo de corrente desviada, decorrente da transferência sucessiva da corrente diferencial entre grupos fotovoltaicos adjacentes, aspecto discutido nas seções posteriores (LUZ, 2023).

3.2 Conversor BBB-ReSC-M

Conforme apresentado na Seção 2.4, o conversor BBB-ReSC é associado à matriz fotovoltaica com o objetivo de realizar o Processamento Diferencial de Potência (DPP) entre seus módulos. Neste trabalho, essa aplicação é denominada BBB-ReSC-M, em que a letra “M” faz referência à estrutura matricial do arranjo fotovoltaico.

A aplicação do conversor à matriz preserva a estrutura e o princípio de funcionamento do BBB-ReSC, incluindo suas características operacionais. Entre elas, destaca-se a utilização de um indutor de pequeno valor em série com o capacitor flutuante, formando um circuito ressonante que permite reduzir os picos de corrente durante as transições de

chaveamento e possibilita a comutação sob corrente nula, contribuindo para a redução das perdas de comutação.

Embora o princípio de funcionamento do conversor seja preservado, sua aplicação à matriz fotovoltaica permite realizar o processamento diferencial de potência entre diferentes grupos de módulos por meio de uma única estrutura de conversão. Essa característica possibilita sua utilização em arranjos com diferentes configurações, mantendo o princípio de transferência da potência diferencial entre os módulos submetidos a condições de descasamento.

Para facilitar a análise do princípio de funcionamento e dos diferentes sentidos do fluxo de potência, a matriz fotovoltaica é inicialmente dividida em dois grupos, denominados FFV1 e FFV2. O grupo FFV1 é constituído pelos módulos FV1 a FV8, enquanto o grupo FFV2 é formado pelos módulos FV9 a FV16, conforme ilustrado na Figura 22. Essa divisão possui finalidade didática e permite descrever de forma mais clara a atuação do conversor e a transferência da potência diferencial entre os diferentes grupos da matriz fotovoltaica.

A partir dessa análise, o princípio de operação apresentado nesta seção é posteriormente empregado na avaliação do conversor em matrizes fotovoltaicas assimétricas, nas quais os ramos apresentam diferentes quantidades de módulos e, conseqüentemente, diferentes características elétricas.

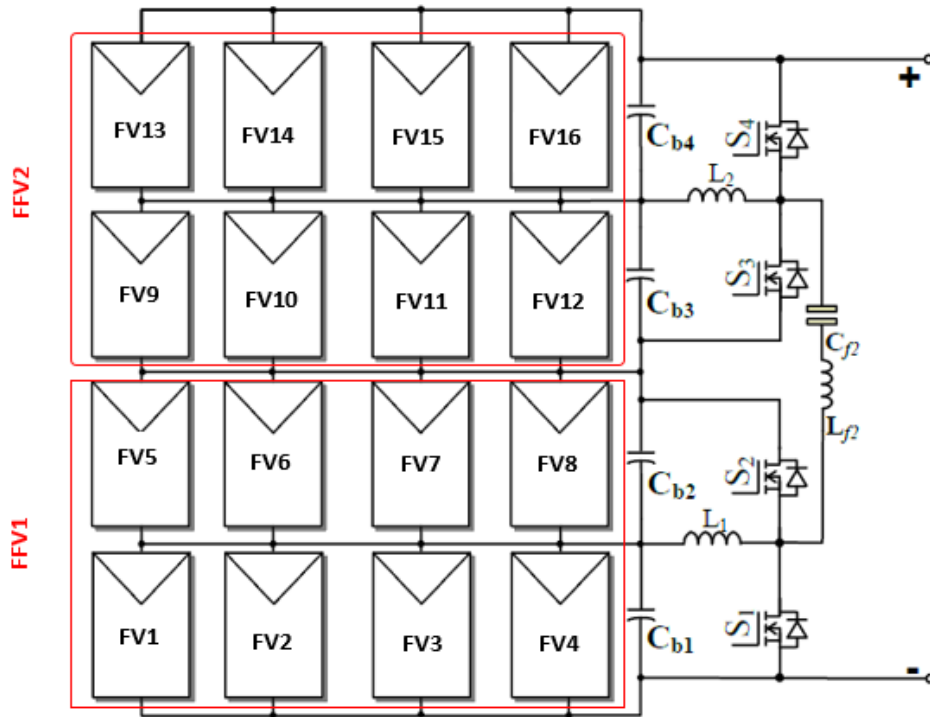


Figura 22 – BBB-ReSC-M segregado em 2 grupos

Fonte: Do Autor

Para cada um dos grupos, assumindo irradiação constante sobre todos os módu-

los, consideram-se duas situações de descasamento. Ressalta-se que os modos de operação descritos a seguir não se restringem à configuração matricial utilizada para exemplificar o funcionamento do conversor BBB-ReSC-M. Embora a análise seja apresentada considerando um arranjo fotovoltaico específico, o mesmo princípio de operação é válido para matrizes fotovoltaicas de diferentes dimensões e configurações, incluindo as matrizes assimétricas propostas neste trabalho. Nesses casos, a atuação do conversor continua sendo determinada exclusivamente pela ocorrência do descasamento entre módulos ou grupos de módulos, independentemente da quantidade de módulos presentes em cada fileira da matriz.

- Na primeira situação, o grupo FFV1 encontra-se descasado em relação ao grupo FFV2, sendo que todos os módulos pertencentes ao grupo FFV1 geram a mesma corrente e potência entre si, porém diferentes daquelas produzidas pelos módulos do grupo FFV2. Nesse caso, para equalizar as tensões de saída dos grupos, o conversor atua por meio do circuito ressonante, fazendo com que a corrente diferencial proveniente do descasamento seja direcionada ao indutor L_{f2} , onde é temporariamente armazenada. Como a corrente total de cada grupo corresponde à soma das correntes geradas por seus respectivos módulos, o conversor processa apenas a parcela diferencial associada ao descasamento, realizando sua transferência entre os grupos e promovendo a equalização energética do arranjo.
- Na segunda situação, apenas um módulo pertencente ao grupo FFV1 encontra-se descasado em relação aos demais módulos do próprio grupo, gerando uma corrente diferente. Nessa condição, o circuito ressonante deixa de atuar como principal elemento de processamento, sendo a corrente diferencial direcionada ao indutor correspondente ao grupo em que ocorre o descasamento. Assim, o indutor L_1 passa a ser responsável pelo processamento diferencial da energia associada a essa condição.

Observa-se, portanto, que a corrente diferencial proveniente do descasamento deixa de limitar a geração do arranjo fotovoltaico, uma vez que é processada pelos elementos armazenadores de energia do conversor. Como consequência, os efeitos negativos do descasamento são significativamente reduzidos, permitindo que os módulos operem mais próximos de seus respectivos pontos de máxima potência. Dessa forma, obtém-se um aumento da potência efetivamente entregue à carga e uma melhoria do desempenho global do sistema fotovoltaico. Esse princípio de funcionamento permanece válido tanto para matrizes simétricas quanto para matrizes assimétricas, desde que seja mantida a estratégia de processamento diferencial de potência empregada pelo conversor BBB-ReSC-M.

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos teóricos das principais topologias que compõem o conversor BBB-ReSC-M, bem como seu princípio de funcionamento. A análise realizada evidenciou que a combinação dos conversores *Buck-Boost* Bidirecional (BBB) e Capacitor Chaveado Ressonante (ReSC) reúne as vantagens de ambas as estruturas, permitindo o processamento diferencial de potência de forma eficiente. Em comparação às técnicas convencionais, como a utilização de diodos de *bypass*, essa abordagem possibilita não apenas a proteção dos módulos fotovoltaicos, mas também um melhor aproveitamento da energia disponível, reduzindo os impactos provocados pelo descasamento entre módulos.

Os conceitos apresentados neste capítulo constituem a base teórica para as etapas seguintes deste trabalho. No Capítulo 4, são apresentados os critérios de dimensionamento do conversor BBB-ReSC-M, enquanto no Capítulo 5 é introduzida a proposta desta pesquisa, que consiste na aplicação desse conversor em uma configuração de matriz fotovoltaica assimétrica, cuja eficácia será posteriormente avaliada por meio de simulações computacionais.

4 Dimensionamento dos Componentes para Aplicação do Conversor BBB-ReSC

O dimensionamento dos componentes empregados na aplicação do conversor BBB-ReSC é realizado com base nos critérios estabelecidos para seu funcionamento, considerando as características elétricas das configurações fotovoltaicas avaliadas neste trabalho. A definição adequada desses parâmetros é necessária para assegurar a operação do conversor nas condições consideradas e permitir o adequado processamento da potência diferencial entre os módulos fotovoltaicos.

Neste trabalho, são adotados os critérios de dimensionamento apresentados na literatura para o conversor BBB-ReSC, adequando-se os valores dos componentes às condições elétricas das matrizes fotovoltaicas analisadas. Os parâmetros são determinados a partir das características dos módulos empregados e das condições estabelecidas para as simulações computacionais.

Os valores obtidos são apresentados nas seções seguintes e utilizados na implementação do modelo computacional desenvolvido no ambiente MATLAB/Simulink. Sempre que possível, são considerados valores comerciais de componentes.

Para a realização dos cálculos, foram considerados os módulos fotovoltaicos RSM020P, do fabricante Resun, e KMP-10, do fabricante Komaes Solar, cujas principais características elétricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados elétricos dos módulos fotovoltaicos RSM020P e KMP-10 em condições padrão de teste (STC).

Parâmetro	RSM020P	KMP-10
Potência nominal ($P_{\max}$)	20 W	10 W
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,60 V	21,7 V
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	1,23 A	0,62 A
Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp})	18,20 V	17,4 V
Corrente no ponto de máxima potência (I_{mp})	1,10 A	0,58 A

STC: irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25°C e massa de ar AM1.5, conforme EN 60904-3.

4.1 Especificações de Projeto

O dimensionamento do conversor BBB-ReSC-M foi realizado com base nas especificações elétricas dos módulos fotovoltaicos apresentados na Tabela 1 e nos parâmetros de projeto resumidos na Tabela 2. Esses parâmetros servem como referência para o cálculo dos principais componentes do conversor e para a implementação do modelo computacional utilizado nas simulações.

Tabela 2 – Especificações do conversor BBB-ReSC-M para aplicação em matriz fotovoltaica assimétrica nas condições padrão de teste (STC).

Parâmetro	Símbolo	Valor
Frequência de chaveamento	f_s	50 kHz
Razão cíclica	D	0,5
Tensão média dos módulos	V_{OP}	17,8 V
Corrente diferencial máxima	ΔI	0,55 A
Ondulação máxima de corrente	ΔI_L	10%
Capacitor flutuante	C_f	1 μ F
Capacitor de barramento	C_b	100 μ F
Indutor flutuante	L_f	10 μ H

STC: irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25°C e massa de ar AM1.5, conforme EN 60904-3.

A frequência de chaveamento foi fixada em 50 kHz, valor amplamente empregado em conversores de média potência por representar um compromisso entre a redução das dimensões dos componentes magnéticos e a limitação das perdas de chaveamento. Adicionalmente, adotou-se uma ondulação máxima de corrente correspondente a 10% da corrente diferencial processada pelo conversor, visando reduzir os esforços elétricos sobre os componentes e garantir condições adequadas de operação.

A tensão média de operação (V_{OP}) foi obtida a partir da média das tensões de máxima potência dos módulos fotovoltaicos adjacentes ao conversor. Entretanto, a resistência equivalente no ponto de máxima potência (R_{MPP}) não é determinada neste capítulo, uma vez que seu valor depende diretamente da configuração da matriz fotovoltaica e das características elétricas dos módulos utilizados em cada estudo de caso. Dessa forma, seu cálculo será realizado durante a definição das configurações simulacionais, apresentadas no capítulo seguinte.

Após o dimensionamento dos componentes, os valores obtidos foram implementados no modelo computacional desenvolvido no MATLAB/Simulink. A Figura 23 apresenta uma das configurações do conversor BBB-ReSC-M já parametrizada, evidenciando os principais componentes elétricos e os respectivos valores utilizados nas simulações. Essa representação estabelece uma relação direta entre o dimensionamento teórico apresentado neste capítulo e sua implementação no ambiente computacional.

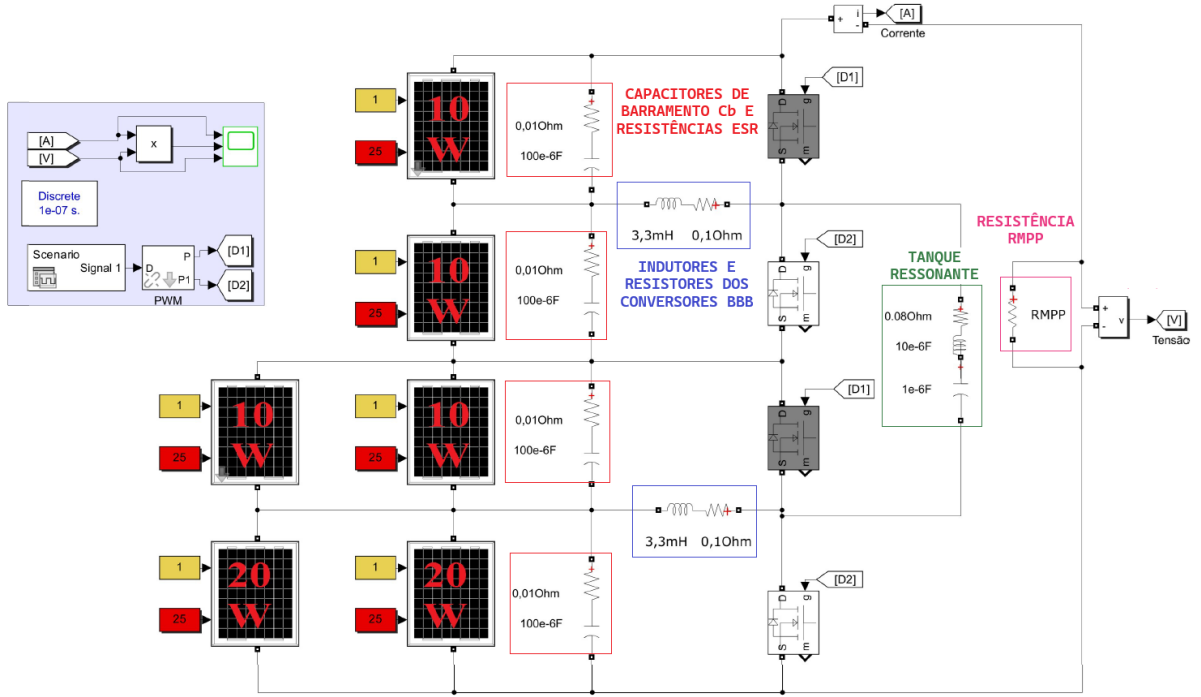


Figura 23 – Implementação computacional do conversor BBB-ReSC-M em matriz fotovoltaica assimétrica com os parâmetros dimensionados.

Fonte: Do Autor

4.2 Dimensionamento do Indutor

O indutor constitui o principal elemento armazenador de energia do conversor. Durante a etapa em que um dos interruptores permanece conduzindo, o indutor acumula a energia proveniente da diferença de corrente existente entre dois módulos fotovoltaicos adjacentes. Posteriormente, durante a etapa complementar de chaveamento, essa energia é transferida ao módulo de menor corrente, promovendo a equalização das potências processadas.

O valor da indutância exerce influência direta sobre a ondulação de corrente, o esforço dos dispositivos semicondutores e a resposta dinâmica do conversor. Valores reduzidos de indutância provocam elevados níveis de ripple de corrente, enquanto valores excessivamente elevados aumentam o volume físico do componente e reduzem a velocidade de resposta do sistema.

Considerando operação em regime permanente e condução contínua, o valor mínimo da indutância pode ser obtido por meio da Equação (4.1).

$$L = \frac{DV_{OP}}{\Delta I_L f_s}. \quad (4.1)$$

em que

- L representa a indutância do conversor;

- D é a razão cíclica;
- V_{OP} corresponde à tensão média dos módulos adjacentes;
- ΔI_L representa a ondulação admissível de corrente;
- f_s corresponde à frequência de chaveamento.

A ondulação máxima de corrente foi limitada a 10% da corrente diferencial nominal, sendo determinada por

$$\Delta I_L = 0,1 \cdot \Delta I$$

Substituindo os valores de projeto,

$$\Delta I_L = 0,1 \times 0,55 = 0,055 \text{ A}$$

Aplicando os parâmetros de projeto na Equação 4.1, obtém-se

$$L = \frac{0,5 \times 17,8}{0,055 \times 50 \times 10^3} = 3,24 \times 10^{-3} \text{ H}$$

ou

$$L \approx 3,3 \text{ mH}.$$

Assim, foi especificado um indutor comercial de aproximadamente $3,3 \text{ mH}$, capaz de suportar a corrente diferencial máxima prevista sem atingir saturação magnética. A utilização desse valor garante uma ondulação de corrente inferior a 10%, proporcionando menor esforço elétrico aos dispositivos semicondutores e maior estabilidade durante o processamento diferencial de potência.

4.3 Dimensionamento dos Capacitores do Conversor

Os capacitores de barramento, representados por C_b , têm como principal função estabilizar a tensão nos terminais dos módulos fotovoltaicos durante o chaveamento do conversor. Além disso, esses componentes absorvem as componentes alternadas da corrente, reduzindo a ondulação de tensão aplicada aos módulos e contribuindo para uma operação mais estável do sistema fotovoltaico.

Em regime permanente, a corrente média que circula pelo capacitor ao longo de um período de chaveamento é nula. Entretanto, durante cada etapa de operação do conversor, ocorre uma troca de energia entre os indutores e os capacitores, tornando necessária a correta especificação da capacitância.

O dimensionamento de C_b pode ser realizado a partir da relação fundamental do capacitor, dada por

$$i_C = C_b \frac{dv_C}{dt}, \quad (4.2)$$

em que i_C representa a corrente que circula pelo capacitor e v_C corresponde à tensão em seus terminais.

Considerando que, durante o intervalo de condução, a corrente que atravessa o capacitor pode ser aproximada pela corrente média do indutor, admite-se

$$i_C \approx I_L.$$

Assumindo uma variação aproximadamente linear da tensão do capacitor durante o intervalo de condução DT_s , a Equação (4.2) pode ser escrita como

$$I_L = C_b \frac{\Delta V_C}{DT_s},$$

em que D corresponde à razão cíclica, T_s representa o período de chaveamento e ΔV_C é a máxima ondulação admissível de tensão no capacitor.

Como o período de chaveamento é definido por

$$T_s = \frac{1}{f_s},$$

a ondulação de tensão pode ser expressa por

$$\Delta V_C = \frac{I_L D}{C_b f_s}.$$

Isolando a capacitância, obtém-se a expressão utilizada para o dimensionamento do capacitor de barramento:

$$C_b = \frac{I_L D}{\Delta V_C f_s}. \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3):

- C_b representa a capacitância mínima do capacitor de barramento;
- I_L representa a corrente média do indutor;
- D corresponde à razão cíclica do conversor;
- ΔV_C representa a máxima ondulação admissível de tensão;
- f_s corresponde à frequência de chaveamento.

Para o presente projeto, admitiu-se uma ondulação máxima correspondente a aproximadamente 2% da tensão média de operação dos módulos fotovoltaicos. Dessa forma,

$$\Delta V_C = 0,02 \times 17,8 = 0,356 \text{ V}.$$

Substituindo os parâmetros de projeto na Equação (4.3), obtém-se

$$C_b = \frac{0,55 \times 0,5}{0,356 \times 50 \times 10^3} = 15,4 \mu\text{F}.$$

O valor obtido corresponde à capacitância mínima necessária para que a ondulação de tensão permaneça dentro do limite estabelecido. Contudo, para a implementação do modelo, foram adotados capacitores comerciais de $100 \mu\text{F}$. A utilização de uma capacitância superior ao valor mínimo calculado proporciona uma margem adicional de projeto, reduz a ondulação de tensão e melhora o comportamento transitório do conversor diante de variações nas condições de operação do sistema fotovoltaico.

Para representar as perdas internas associadas aos capacitores, foram inseridos resistores de $0,01 \Omega$ em série com cada componente. Esses resistores modelam, de forma simplificada, a resistência série equivalente, (do inglês, *Equivalent Series Resistance* – ESR) dos capacitores reais.

4.4 Dimensionamento do Tanque Ressonante do Conversor ReSC

O conversor ReSC é responsável pela equalização de tensão entre os diferentes grupos fotovoltaicos conectados ao sistema. Diferentemente do conversor BBB, cuja transferência de energia ocorre por meio de um único indutor, o conversor ReSC utiliza um circuito ressonante LC, permitindo uma transferência de energia praticamente senoidal e reduzindo significativamente as perdas de comutação.

O funcionamento adequado do tanque ressonante depende diretamente da correta escolha dos valores da indutância e da capacitância, uma vez que esses elementos determinam a frequência natural de ressonância do circuito.

A frequência de ressonância é determinada por

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}. \quad (4.4)$$

Como o conversor BBB-ReSC-M compartilha os mesmos interruptores de potência, adotou-se que a frequência de ressonância seja igual à frequência de chaveamento do sistema, isto é,

$$f_r = f_s = 50\text{kHz}.$$

Inicialmente fixa-se o capacitor ressonante em

$$C_f = 1 \mu\text{F},$$

valor amplamente empregado em aplicações dessa faixa de potência devido à sua disponibilidade comercial e reduzidas perdas dielétricas.

Isolando a indutância na Equação (4.4), obtém-se

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_f}.$$

Substituindo os valores de projeto,

$$L_f = \frac{1}{(2\pi \cdot 50 \times 10^3)^2 \cdot 1 \times 10^{-6}},$$

resultando em

$$L_f \approx 10 \mu H.$$

Assim, especificou-se um indutor comercial de $10 \mu H$, valor suficiente para garantir a operação ressonante do conversor dentro da frequência estabelecida em projeto.

A correta sintonia do circuito LC reduz significativamente os esforços de corrente durante as comutações, diminuindo as perdas de chaveamento dos dispositivos semicondutores e aumentando a eficiência global do conversor.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os critérios de dimensionamento dos principais componentes empregados no conversor BBB-ReSC. Os procedimentos adotados permitiram definir os parâmetros necessários para sua implementação computacional, considerando as condições de operação estabelecidas para as análises desenvolvidas neste trabalho.

Os parâmetros apresentados constituem a base para a aplicação do conversor às configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas avaliadas neste trabalho. Ressalta-se que a denominação BBB-ReSC-M é utilizada para identificar a aplicação do conversor BBB-ReSC à estrutura matricial do arranjo fotovoltaico, sem representar uma nova topologia de conversor ou alteração em seu princípio de funcionamento.

No capítulo seguinte, essa aplicação é avaliada em duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas, com o objetivo de analisar, por meio de simulações computacionais, o comportamento do sistema diante do descasamento permanente e o aproveitamento da potência disponível nos arranjos considerados.

5 Avaliação Computacional, Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta a aplicação do conversor [BBB-ReSC](#) em duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas, denominada neste trabalho [BBB-ReSC-M](#). Para cada configuração, são descritos o arranjo adotado, a potência teórica esperada, o cálculo da resistência equivalente no ponto de máxima potência e os resultados obtidos por meio de simulações no MATLAB/Simulink. A análise compara a operação do sistema com o conversor habilitado e desabilitado, permitindo avaliar seu desempenho quando aplicado às configurações assimétricas propostas.

5.1 BBB-ReSC-M em Configuração Assimétrica

Mesmo com a utilização de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, como o algoritmo Perturba e Observa (P&O), diferenças permanentes entre as características elétricas dos módulos podem comprometer o aproveitamento energético de uma série fotovoltaica. Nesse contexto, a aplicação do conversor BBB-ReSC-M em matrizes assimétricas permite processar a potência diferencial resultante dessas diferenças sem exigir alterações na estrutura original do conversor.

A Figura 24 apresenta exemplos de associações assimétricas que podem ocorrer em instalações fotovoltaicas. Essas configurações podem resultar da ampliação de sistemas existentes, da substituição de módulos indisponíveis no mercado ou da necessidade de adaptação à área disponível para instalação. Com base nesse princípio, foram definidas duas configurações para a avaliação computacional desenvolvida neste trabalho.



(a) 8 painéis



(b) 11 painéis



(c) 22 painéis

Figura 24 – Exemplos de associações assimétricas de painéis fotovoltaicos.

Fonte: Pixabay (2017); LASolar (2025); Vecteezy (2026).

5.2 Metodologia de Avaliação

As duas configurações foram modeladas e parametrizadas no ambiente MATLAB/*Simulink*. Em cada simulação, o intervalo de 0 a 0,3 s corresponde à operação com o conversor BBB-ReSC-M habilitado. No instante de 0,3 s, os sinais PWM são interrompidos, desabilitando o conversor até 0,6 s. Esse procedimento permite comparar a potência fornecida pelo arranjo com e sem a atuação do conversor.

O aproveitamento relativo à potência teórica é determinado pela Equação (5.1), em que P_{obtida} representa a potência medida na simulação e P_{projeto} corresponde à potência teórica do arranjo.

$$A_P = \frac{P_{\text{obtida}}}{P_{\text{projeto}}} \times 100. \quad (5.1)$$

O ganho percentual proporcionado pelo conversor é calculado em relação à condição em que ele permanece desabilitado, conforme a Equação (5.2).

$$G = \frac{P_{\text{com}} - P_{\text{sem}}}{P_{\text{sem}}} \times 100. \quad (5.2)$$

A resistência equivalente no ponto de máxima potência (R_{MPP}) depende da disposição dos módulos e de suas características elétricas. Por esse motivo, seu valor é calculado separadamente para cada configuração. A corrente e a tensão equivalentes da série são obtidas pelas Equações (5.3) e (5.4), respectivamente, enquanto a resistência ótima da carga é determinada pela Equação (5.5).

$$I_{\text{série_MPP}} = \frac{\sum_{n=1}^4 I_{MPP_n}}{4} [\text{A}], \quad (5.3)$$

$$V_{\text{série_MPP}} = \sum_{n=1}^4 V_{MPP_n} [\text{V}], \quad (5.4)$$

$$R_{MPP} = \frac{V_{\text{série_MPP}}}{I_{\text{série_MPP}}} [\Omega]. \quad (5.5)$$

5.3 Configuração 1

5.3.1 Definição do Arranjo e Cálculo de R_{MPP}

A Configuração 1, apresentada na Figura 25, é composta por seis módulos fotovoltaicos: quatro módulos KMP-10, com potência nominal de 10 W, e dois módulos RSM020P, com potência nominal de 20 W. A soma das potências individuais resulta em uma potência teórica de 80 W. Essa associação representa uma condição de assimetria decorrente da utilização conjunta de módulos com diferentes especificações elétricas.

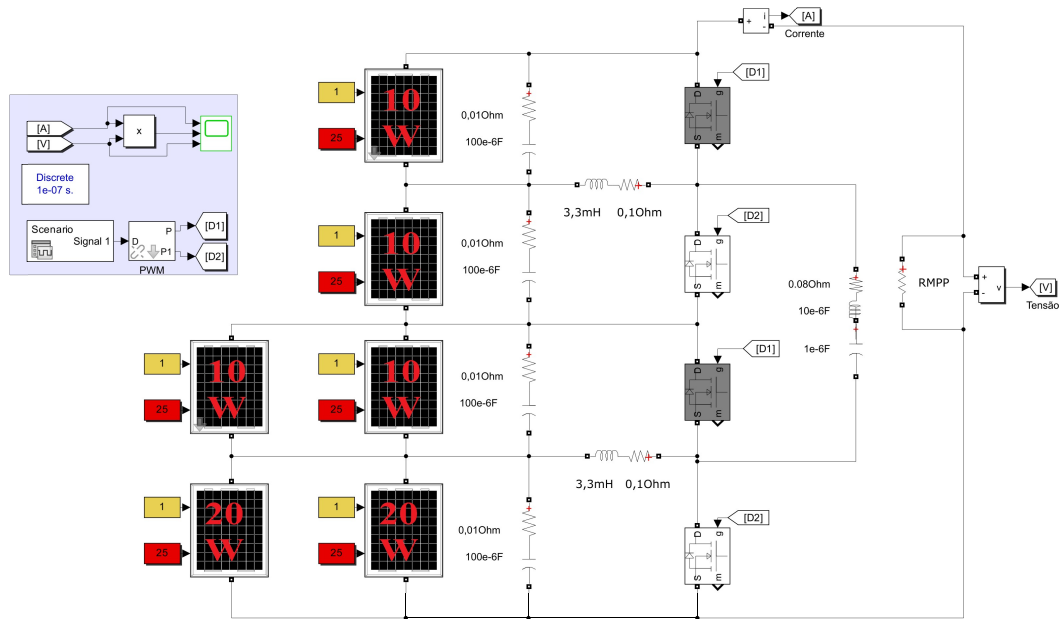


Figura 25 – Configuração 1 do sistema fotovoltaico assimétrico com o conversor BBB-ReSC-M.

Aplicando-se as Equações (5.3), (5.4) e (5.5), obtêm-se os parâmetros equivalentes no ponto de máxima potência:

$$I_{\text{série_MPP}} = 1,13 \text{ A},$$

$$V_{\text{série_MPP}} = 70,4 \text{ V},$$

$$R_{\text{MPP}} = \frac{70,4}{1,13} = 62,3 \Omega.$$

Para a implementação computacional, adotou-se o valor comercial de 62Ω .

5.3.2 Resultados e Discussão

A Figura 26 apresenta, de forma conjunta, as formas de onda de corrente, tensão e potência obtidas para a Configuração 1, permitindo uma visão geral do comportamento do sistema ao longo de todo o intervalo de simulação. Observa-se a alteração das grandezas elétricas no instante de 0,3 s, correspondente à desabilitação do conversor BBB-ReSC-M, conforme estabelecido na metodologia de avaliação.

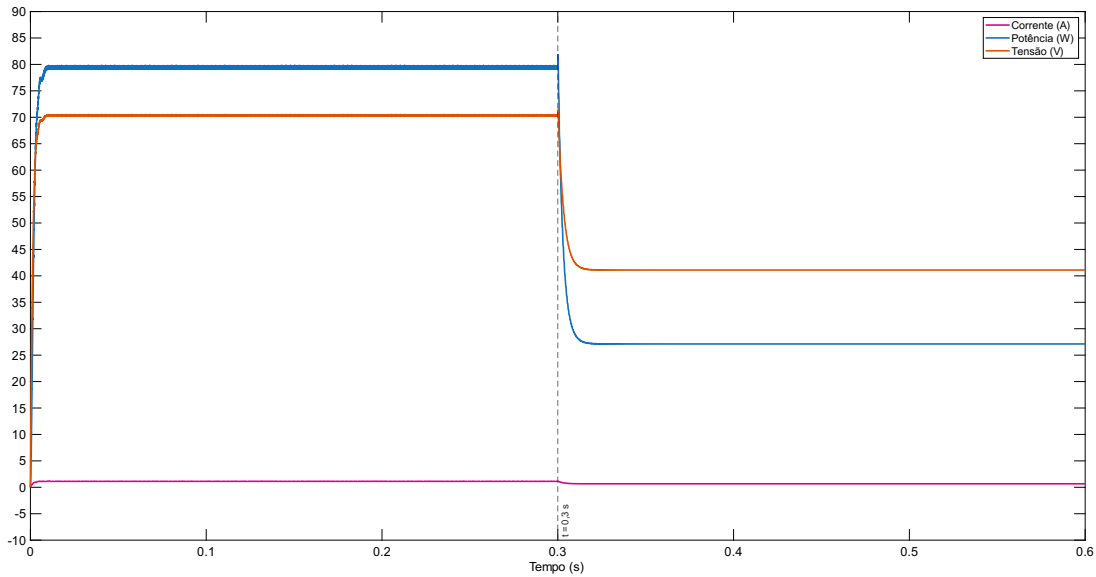


Figura 26 – Formas de onda da corrente, tensão e potência para a Configuração 1.

Fonte: Do autor.

Entre 0 e 0,3 s, com o conversor habilitado, a potência estabiliza em aproximadamente 79,5 W. Esse valor corresponde a 99,38% da potência teórica de 80 W, indicando operação muito próxima da condição prevista para o arranjo. Após 0,3 s, a interrupção dos sinais PWM desabilita o conversor e a potência é reduzida para aproximadamente 27,0 W, o que representa apenas 33,75% da potência de projeto.

A atuação do conversor acrescenta 52,5 W à potência entregue. Em relação à condição sem o conversor, esse acréscimo equivale a um ganho de 194,44%, tornando a potência obtida aproximadamente 2,94 vezes maior. A diferença entre os dois intervalos evidencia a contribuição do [BBB-ReSC-M](#) para o aproveitamento da potência disponível nessa configuração assimétrica.

Além da análise da potência, as formas de onda de corrente e tensão permitem avaliar a alteração do ponto de operação do arranjo decorrente da desabilitação do conversor. Com o [BBB-ReSC-M](#) habilitado, a corrente e a tensão estabilizam-se em aproximadamente 1,13 A e 70,53 V, respectivamente. Após a desabilitação do conversor em 0,3 s, essas grandezas passam a operar em aproximadamente 0,66 A e 41,10 V, estabelecendo um novo ponto de operação para o sistema.

A redução simultânea da tensão e da corrente após a desabilitação do conversor resulta na redução da potência de aproximadamente 79,5 W para 27,0 W. As formas de onda individuais apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29 permitem visualizar com maior clareza os valores alcançados em regime permanente nos dois intervalos de operação. Observa-se ainda que, após o período transitório associado à mudança de condição em 0,3 s, as grandezas atingem novos valores estáveis, tanto com o conversor habilitado quanto após sua desabilitação.

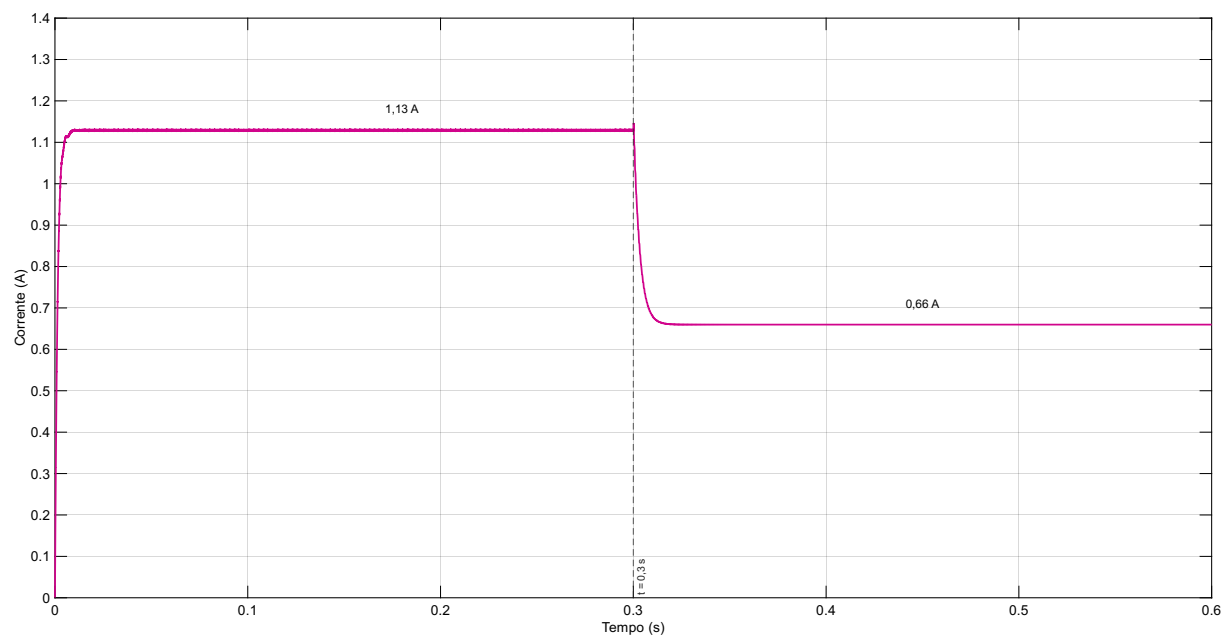


Figura 27 – Comportamento da corrente na Configuração 1.

Fonte: Do autor.

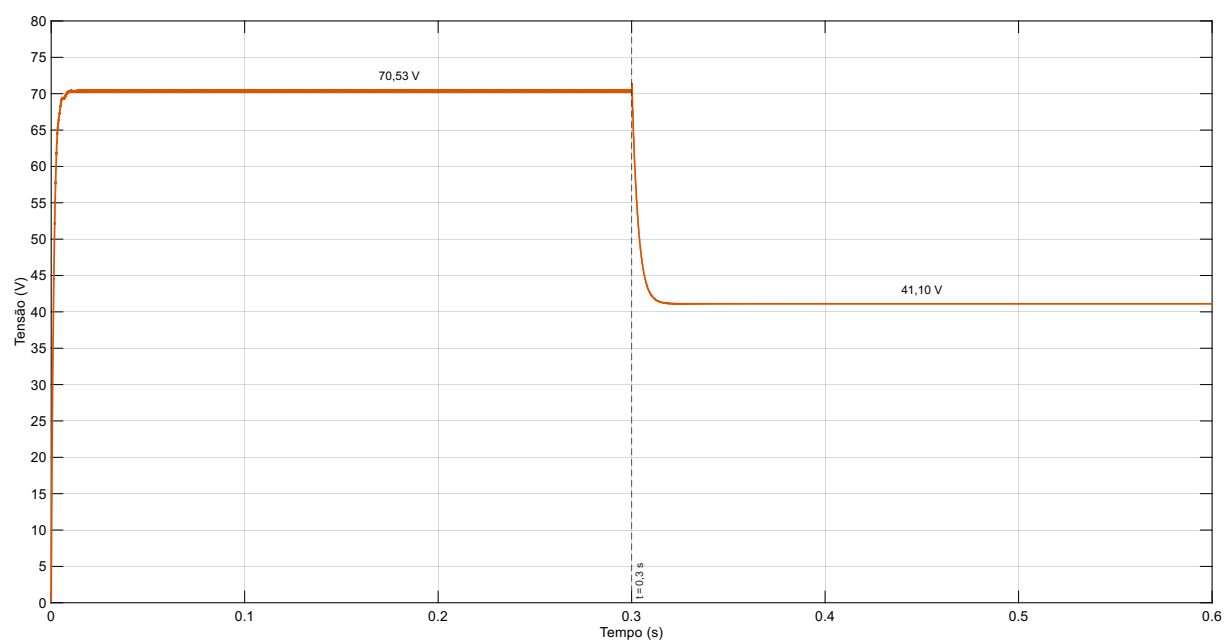


Figura 28 – Comportamento da tensão na Configuração 1.

Fonte: Do autor.

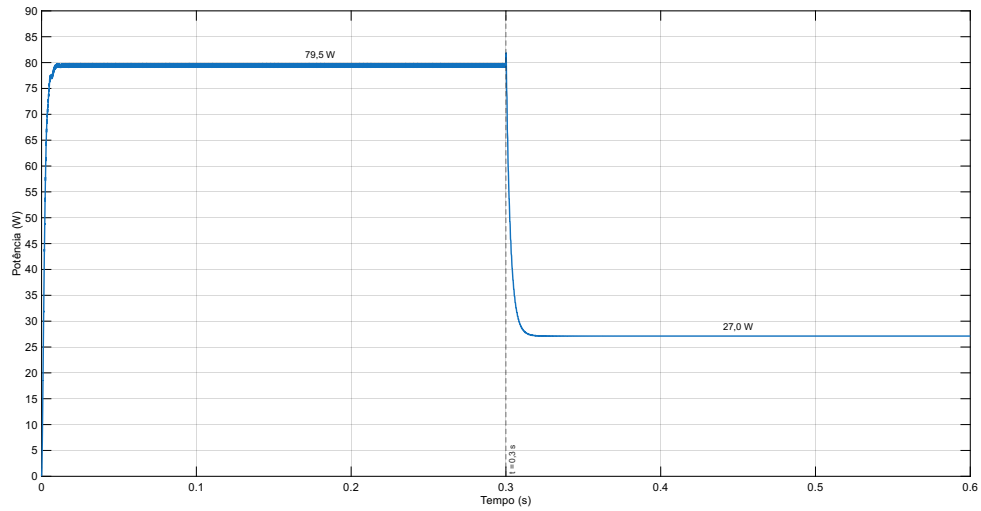


Figura 29 – Comportamento da potência na Configuração 1.

Fonte: Do autor.

5.4 Configuração 2

5.4.1 Definição do Arranjo e Cálculo de R_{MPP}

A Configuração 2, ilustrada na Figura 30, é composta por doze módulos RSM020P, cada um com potência nominal de 20 W, distribuídos de forma assimétrica entre os ramos do sistema. A potência teórica total dessa associação é de 240 W.

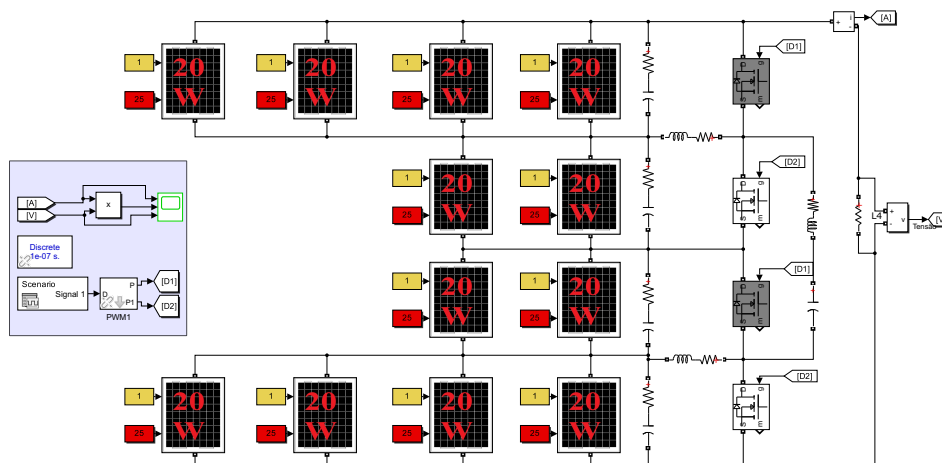


Figura 30 – Configuração 2 do sistema fotovoltaico assimétrico com o conversor BBB-ReSC-M.

Para essa disposição, os parâmetros equivalentes no ponto de máxima potência são:

$$I_{\text{série_MPP}} = 3,3 \text{ A},$$

$$V_{\text{série_MPP}} = 72,8 \text{ V},$$

$$R_{MPP} = \frac{72,8}{3,3} = 22,06 \Omega.$$

Nas simulações, foi empregado o valor comercial de 22Ω .

5.4.2 Resultados e Discussão

De forma análoga à análise realizada para a Configuração 1, a Figura 31 apresenta conjuntamente as formas de onda de corrente, tensão e potência obtidas para a Configuração 2, permitindo uma visão geral do comportamento do sistema ao longo de todo o intervalo de simulação. Observa-se a alteração das grandezas elétricas no instante de 0,3 s, correspondente à desabilitação do conversor **BBB-ReSC-M**, conforme estabelecido na metodologia de avaliação. Para possibilitar uma análise mais detalhada do comportamento de cada grandeza e facilitar a identificação dos respectivos valores em regime permanente, as formas de onda são posteriormente apresentadas de maneira individual.

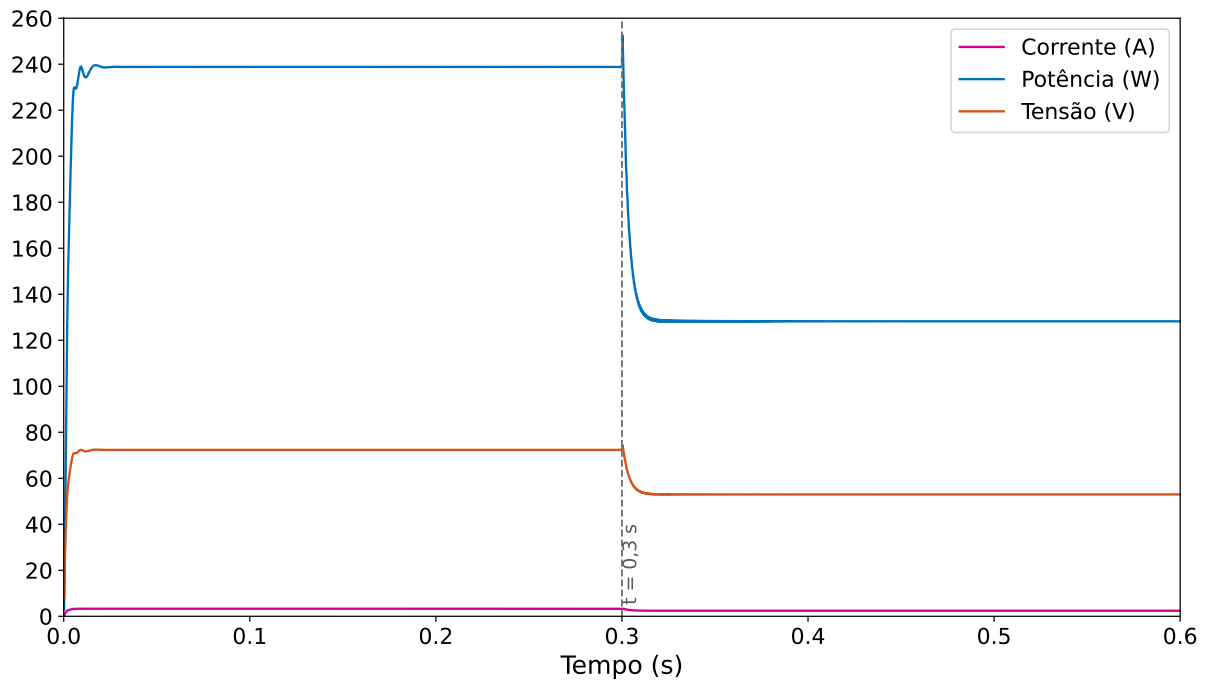


Figura 31 – Formas de onda da corrente, tensão e potência para a Configuração 2.

Fonte: Do autor.

Entre 0 e 0,3 s, com o conversor habilitado, a potência estabiliza em aproximadamente 238,8 W. Esse valor corresponde a 99,50% da potência teórica de 240 W, indicando

operação muito próxima da condição prevista para o arranjo. Após 0,3 s, a interrupção dos sinais PWM desabilita o conversor e a potência é reduzida para aproximadamente 128,2 W, correspondendo a 53,42% da potência teórica.

A atuação do conversor acrescenta 110,6 W à potência entregue. Em relação à condição sem o conversor, esse acréscimo equivale a um ganho de 86,27%, tornando a potência obtida aproximadamente 1,86 vezes maior. A diferença entre os dois intervalos evidencia a contribuição do [BBB-ReSC-M](#) para o aproveitamento da potência disponível na Configuração 2.

Além da análise da potência, as formas de onda de corrente e tensão apresentam comportamento estável em regime permanente nos dois intervalos de operação. A alteração observada em 0,3 s decorre da desabilitação do conversor, estabelecendo um novo ponto de operação para o arranjo. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam individualmente essas grandezas, permitindo uma análise mais detalhada dos valores obtidos antes e após essa transição.

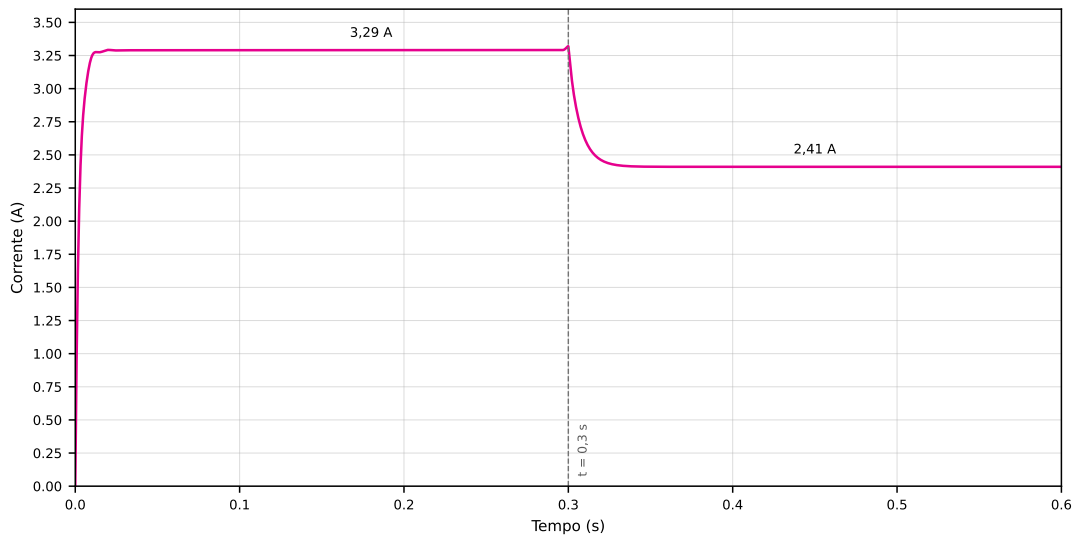


Figura 32 – Comportamento da corrente na Configuração 2 antes e após a desabilitação do conversor [BBB-ReSC-M](#).

Fonte: Do autor.

Conforme apresentado na Figura 32, com o conversor habilitado, a corrente estabiliza em aproximadamente 3,29 A. Após sua desabilitação em 0,3 s, observa-se a redução da corrente para aproximadamente 2,41 A. A diferença de 0,88 A entre os dois pontos de operação evidencia a alteração na corrente fornecida pelo arranjo após a retirada da atuação do conversor.

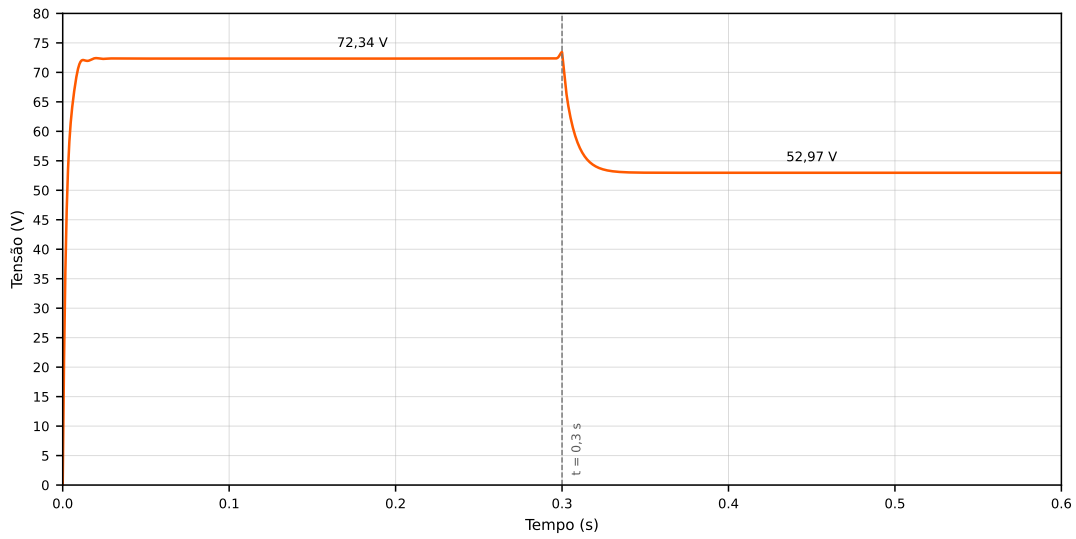


Figura 33 – Comportamento da tensão na Configuração 2 antes e após a desabilitação do conversor BBB-ReSC-M.

Fonte: Do autor.

A Figura 33 mostra que a tensão permanece em aproximadamente 72,34 V durante o intervalo em que o conversor está habilitado. Após sua desabilitação, a tensão se estabelece em aproximadamente 52,97 V, correspondendo a uma redução de 19,37 V. Assim como observado para a corrente, o sistema alcança um novo regime permanente após a transição em 0,3 s.

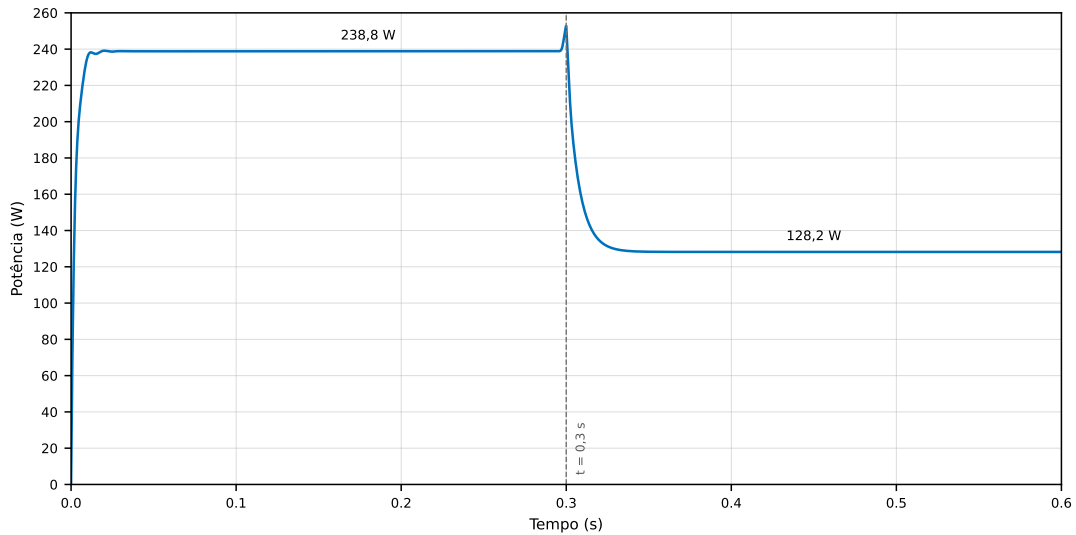


Figura 34 – Comportamento da potência na Configuração 2 antes e após a desabilitação do conversor BBB-ReSC-M.

Fonte: Do autor.

A Figura 34 evidencia individualmente a variação da potência entre os dois intervalos de operação. Com o conversor habilitado, a potência permanece próxima do valor teórico da configuração, atingindo aproximadamente 238,8 W. Após sua desabilitação, o

novo ponto de operação é estabelecido em aproximadamente 128,2 W. A redução simultânea da tensão e da corrente observada nas Figuras 32 e 33 resulta, portanto, na redução da potência entregue pelo arranjo.

Os resultados obtidos para a Configuração 2 mostram que, nas condições simuladas, a aplicação do conversor possibilitou maior aproveitamento da potência disponível no arranjo assimétrico. O comportamento observado também é coerente com aquele verificado na Configuração 1, embora os valores de tensão, corrente, potência e ganho sejam específicos de cada configuração analisada.

5.5 Comparação Entre as Configurações

A Tabela 3 sintetiza os principais resultados dos dois estudos de caso e permite comparar o desempenho da aplicação proposta em condições distintas de assimetria.

Tabela 3 – Síntese dos resultados obtidos em ambiente simulacional.

Parâmetro	Configuração 1	Configuração 2
Potência de projeto (W)	80,0	240,0
Potência com conversor (W)	79,5	238,8
Potência sem conversor (W)	27,0	128,2
Aproveitamento com conversor (%)	99,38	99,50
Aproveitamento sem conversor (%)	33,75	53,42
Ganho de potência (W)	52,5	110,6
Ganho percentual (%)	194,44	86,27
Relação entre as potências	2,94 vezes	1,86 vezes

Nas duas configurações, a potência fornecida com o conversor habilitado permaneceu próxima do valor teórico, correspondendo a um aproveitamento de 99,38% e 99,50% da potência teórica nas Configurações 1 e 2, respectivamente. Em contrapartida, a desativação do BBB-ReSC-M provocou reduções expressivas na potência entregue, embora em proporções distintas devido às características elétricas e à disposição dos módulos de cada arranjo.

As Figuras 26 e 31 também apresentam comportamentos transitórios diferentes. Essa variação é esperada, pois cada configuração possui valores próprios de potência, resistência equivalente e distribuição dos módulos. Apesar dessas particularidades, ambos os sistemas alcançam o regime permanente e, com o conversor habilitado, apresentam potência muito próxima aos respectivos valores teóricos.

5.6 Considerações Finais

A avaliação conjunta dos estudos de caso indica que o BBB-ReSC pode ser aplicado, sem modificações em sua estrutura original, às duas configurações de matrizes fo-

tovoltaicas assimétricas avaliadas neste trabalho. Em ambas as configurações, a aplicação denominada **BBB-ReSC-M** permitiu que a potência entregue permanecesse muito próxima da potência teórica, enquanto a desativação do conversor resultou em redução significativa do aproveitamento da potência disponível.

Os ganhos de potência de 194,44% e 86,27%, associados ao aproveitamento de 99,38% e 99,50% da potência teórica nas Configurações 1 e 2, respectivamente, evidenciam a contribuição do conversor para o aproveitamento da potência disponível nas condições simuladas. Esses resultados demonstram a aplicabilidade do conversor **BBB-ReSC** nas duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas avaliadas e estabelecem uma base consistente para futuras avaliações experimentais.

6 Conclusão

Este trabalho avaliou uma nova aplicação do conversor [BBB-ReSC](#) em matrizes fotovoltaicas assimétricas submetidas a condições de descasamento permanente, sendo essa aplicação denominada, neste trabalho, [BBB-ReSC-M](#). A proposta consistiu em empregar a estrutura original do conversor, sem modificações em seu princípio de funcionamento, em arranjos com diferentes quantidades e distribuições de módulos, avaliando sua capacidade de realizar o Processamento Diferencial da Potência ([DPP](#), do inglês *Differential Power Processing*) e aumentar o aproveitamento da potência disponível no sistema.

Nas duas configurações avaliadas, a aplicação do conversor possibilitou maior aproveitamento da potência disponível quando comparada à condição em que o conversor permaneceu desabilitado. Na Configuração 1, foram obtidos 79,5 W dos 80 W teóricos, correspondendo a um aproveitamento de 99,38%, enquanto, sem a atuação do conversor, a potência foi reduzida para 27,0 W. Na Configuração 2, foram obtidos 238,8 W dos 240 W teóricos, correspondendo a um aproveitamento de 99,50%, enquanto a potência sem o conversor foi de 128,2 W.

Os ganhos de potência observados foram de 194,44% e 86,27% para as Configurações 1 e 2, respectivamente. Esses resultados indicam que, nas condições simuladas, a aplicação do conversor [BBB-ReSC](#) contribuiu para mitigar os efeitos do descasamento permanente e aumentar o aproveitamento da potência disponível nas duas matrizes fotovoltaicas assimétricas analisadas.

Além disso, a aplicação foi realizada sem modificações na estrutura original do conversor, preservando seu princípio de funcionamento nas duas configurações avaliadas. A interconexão adotada permitiu realizar a conexão entre os diferentes grupos de módulos fotovoltaicos sem a utilização de um conversor *Buck-Boost* Bidirecional adicional.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade do conversor [BBB-ReSC](#) às duas configurações de matrizes fotovoltaicas assimétricas avaliadas neste trabalho e estabelecem uma base para a investigação dessa aplicação em outras configurações e condições de operação.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a realização de ensaios experimentais com o protótipo do conversor, a fim de verificar, em condições reais de operação, os resultados obtidos por meio das simulações computacionais.

Referências

- BECQUEREL, M. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, v. 9, p. 561–567, 1839.
- CABRAL, C. V. T. et al. Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico. In: *Proceedings do 5º Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER)*. Campinas, SP, Brasil: [s.n.], 2004. Acesso em: 07 ago. 2026. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200019&lng=en&nrm=abn.
- CHU, G. et al. Bidirectional flyback based isolated-port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications. *Solar Energy*, Elsevier, v. 158, p. 929–940, 2017.
- CLIMA, P. I. sobre Mudança do. *Sexto relatório de Avaliação*. 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- COELHO, R. F.; CONGER, F.; MARTINS, D. C. A proposed photovoltaic module and array mathematical modeling destined to simulation. In: IEEE. *2009 IEEE international symposium on industrial electronics*. [S.l.], 2009. p. 1624–1629.
- CRESESB, C. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014. <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=481>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- ENERGIA, M. de Minas e. *Transição energética: a mudança de energia que o planeta precisa*. 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-a-mudanca-de-energia-que-o-planeta-precisa>. Acesso em: 12 jun. 2026.
- FERRETI, L.; GONSCHOROWSKI, E.; CARDOSO, R. *Projeto do conversor buck-boost bidirecional para aplicações em sistemas de armazenamento de energia*. 2023. Apresentação de Seminário. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- GUERRIERO, P.; TRICOLI, P.; DALIENTO, S. A bypass circuit for avoiding the hot spot in pv modules. *Solar Energy*, Elsevier, v. 181, p. 430–438, 2019.
- LUZ, C. M.; TOFOLI, F. L.; RIBEIRO, E. R. Novel differential power processing topology for the mitigation of mismatch in photovoltaic systems. *Electronics Letters*, Wiley Online Library, v. 58, n. 2, p. 67–69, 2022.
- LUZ, C. M. A. da. *Análise Comparativa de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos Sob Condição de Sombreamento Parcial*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2018. 120 páginas.
- LUZ, C. M. A. da. *Proposta de uma Topologia para Processamento Diferencial da Potência em Sistemas Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023. 120 páginas.

- LUZ, C. M. A. da; RIBEIRO, E. R.; TOFOLI, F. L. Analysis of the pv-to-pv architecture with a bidirectional buck-boost converter under shading conditions. *Solar Energy*, Elsevier, v. 232, p. 102–119, 2022.
- MANNA, D. L. et al. Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 33, p. 412–426, 2014.
- NEOSOLAR, C. *PLACA SOLAR FOTOVOLTAICA: TUDO SOBRE*. 2022. <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 15 jun. 2026.
- SANTOS, C. H. G. dos. Desviadores de corrente de arquitetura híbrida para compensação de sombreamento parcial em associações série de módulos fotovoltaicos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- SHENOY, P. S. et al. Differential power processing for increased energy production and reliability of photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 28, n. 6, p. 2968–2979, 2012.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. In: IEEE. *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.], 2009. p. 1244–1254.
- WILLIAMS, R. Becquerel photovoltaic effect in binary compounds. *The journal of Chemical physics*, AIP Publishing, v. 32, n. 5, p. 1505–1514, 1960.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Aplicação do Conversor BBB-ReSC-M em Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas para Mitigação de Descasamentos Permanentes é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 6 de setembro de 2026.

Carolina Maria Braga de Souza



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pelo aluno Carolina Maria Braga de Souza, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado Aplicação do Conversor BBB-ReSC-M em Matrizes Fotovoltaicas Assimétricas para Mitigação de Descasamentos Permanentes quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa (Anexo IV), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X) devidamente assinado.

João Monlevade, 6 de setembro de 2026.

Caio Meira Amaral da Luz