

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONVERSOR *BUCK-BOOST* BIDIRECIONAL HÍBRIDO A
CAPACITOR CHAVEADO RESSONANTE PARA
PROCESSAMENTO DIFERENCIAL DE POTÊNCIA EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

CAIO MEIRA AMARAL DA LUZ

Orientador: Prof. Dr. Enio Roberto Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Lessa Tofoli

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Itajubá

AGOSTO DE 2023

“Aos outros, dou o direito de ser como são. A mim, dou o dever de ser cada dia melhor.”

Francisco Cândido Xavier

Dedico esse trabalho a minha mãe, que sempre foi exemplo de força, superação e caráter na minha vida.

Resumo da tese submetido à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Elétrica.

CONVERSOR *BUCK-BOOST* BIDIRECIONAL HÍBRIDO A CAPACITOR CHAVEADO RESSONANTE PARA PROCESSAMENTO DIFERENCIAL DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Caio Meira Amaral da Luz

AGOSTO de 2023

Orientador: Prof. Dr. Enio Roberto Ribeiro.

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Lessa Tofoli.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Palavras chaves: sistemas fotovoltaicos, processamento parcial de potência, descasamento.

Número de Páginas: 137.

RESUMO

Na maioria das aplicações práticas, os módulos fotovoltaicos (FV) devem ser conectados em série para alcançar determinado nível tensão desejado para uma dada aplicação. Um problema que frequentemente acomete esse tipo de conexão é o descasamento entre os módulos. Este pode ser causado por vários fatores, que podem ser classificados como permanentes ou temporários. Para mitigar esse problema, os diodos de desvio são a técnica mais amplamente utilizada devido à sua fácil implementação. No entanto, essa técnica é adequada apenas para descasamentos temporários. Para descasamentos permanentes, técnicas mais sofisticadas de mitigação são necessárias. Nesse contexto, o conceito de processamento diferencial da potência (DPP) tem surgido como uma boa solução para lidar com esse tipo de problema. Isso é decorrente do seu baixo custo, facilidade de implementação e alto desempenho. Para isso, conversores CC-CC, denominado conversores DPP, são conectados entre os módulos PV adjacentes. A forma como esses conversores DPP são conectados ao longo da série de PV origina quatro arquiteturas principais: FV-FV, FV-Bus, híbrida e em progressão. Dessa forma, o

objetivo deste estudo é desenvolver e implementar uma nova topologia denominado BBB-ReSC. A mesma consiste em uma arquitetura híbrida que incorpora elementos tanto dos conversores *buck-boost* bidirecional quanto do conversor a capacitor chaveado. Notavelmente, a topologia proposta atenua problemas importantes que afetam tanto a arquiteturas PV-PV quanto a PV-*Bus*. Especificamente, há uma atenuação do problema do acúmulo de corrente desviada presente nas arquiteturas PV-PV e uma atenuação dos elevados esforços de tensão inerentes das arquiteturas PV-*Bus*. Outra questão importante é que a operação com comutação dissipativa nos semicondutores dos conversores SC pode levar a altas perdas de comutação e baixa eficiência. Por sua vez, a solução introduzida, consiste na substituição do conversor a capacitor chaveado pela sua versão ressonante. Assim, tem-se uma operação com comutação suave, mitigando essas perdas indesejadas. Para demonstrar a eficácia da topologia BBB-ReSC, foram realizados testes utilizando séries FV compostas por quatro, seis e oito módulos FV. Esses testes foram realizados por meio de simulações em ambiente MATLAB/Simulink®, bem como com o uso de um protótipo experimental. Os resultados experimentais mostraram uma recuperação energética de até 50% para as séries FV compostas por quatro módulos e de 33% para as séries FV compostas por seis módulos.

Abstract of Thesis presented to the Federal University of Itajubá as a partial requirement for the degree of Doctor in Electrical Engineering

SWITCHED-CAPACITOR-BASED HYBRID RESONANT BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CONVERTER FOR DIFFERENTIAL POWER PROCESSING IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Caio Meira Amaral da Luz

AUGUST, 2023

Advisor: Professor Enio Roberto Ribeiro, Dr.

Co-Advisor: Professor Fernando Lessa Tofoli, Dr.

Concentration area: Automation and Industrial Electrical Systems

Number of pages: 137.

Keywords: photovoltaic systems, differential power processing, mismatch.

ABSTRACT

In most practical applications, photovoltaic (PV) modules should be connected in series to reach a desired voltage level for a specific application. An important problem that frequently affects this type of connection is mismatch among the modules. It can be caused by several factors that can be classified into permanent or temporary. To mitigate this problem, bypass diodes are the most widely used technique owing to its simple implementation. However, this technique is only appropriate for temporary mismatch. In permanent mismatch, more sophisticated mitigation techniques are required. In this context, the concept of differential power processing (DPP) has emerged as a prominent solution for permanent mismatch owing to its low cost, simple implementation, and high performance. For this purpose, DC-DC converters, named DPP converter, are connected between the adjacent PV modules. The way these DPP converters are connected along the PV series originates four main architectures: PV-PV, PV-Bus, hybrid, and ladder. In this way, the aim of this study is to develop and implement a novel topology named BBB-ReSC. It consists of a hybrid architecture that incorporates elements from both BBB and SC converters. Notably, it tackles key challenges that impact the PV-to-PV and PV-to-

Bus architectures. Specifically, it addresses issues like the diverted current accumulation in the PV-to-PV architecture and high voltage stresses associated with the PV-to-Bus architecture. Another important issue is that the hard-switching operation of semiconductors in SC converters may lead to high switching losses and poor efficiency. In turn, the introduced solution referred to as ReSC converter provides operation under soft-switching conditions while mitigating such undesirable losses. To demonstrate the effectiveness of the BBB-ReSC topology, tests using PV strings composed of four, six, and eight FV modules were conducted. These tests were performed through simulations in MATLAB/Simulink® environment, as well as with the use of an experimental prototype. The experimental results have shown an improvement in harvested energy of up to 50% for the PV string consisting of four modules and 33% for the PV string with six modules.

Sumário

1. Introdução geral	1
1.1 Definição do problema.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	5
1.3 Produção bibliográfica do autor.....	7
1.4 Organização Textual.....	9
2. Revisão bibliográfica	10
2.1 Considerações iniciais.....	10
2.2 Análise do descasamento e operação do diodo de desvio.....	10
2.3 Estratégias de mitigação do descasamento.....	13
2.4 Processamento diferencial de potência.....	16
2.4.1 Arquiteturas FV-FV.....	18
2.4.2 Arquiteturas FV- <i>bus</i>	24
2.4.3 Arquiteturas híbridas.....	27
2.4.4 Arquiteturas em progressão.....	30
2.5 Comparação entre as topologias.....	32
2.6 Considerações parciais.....	35
3. Topologia híbrida de processamento diferencial de potência proposta	37
3.1 Considerações iniciais.....	37
3.2 Concepção da topologia BBB-ReSC.....	37
3.2.1 Funcionamento do conversor <i>buck-boost</i> bidirecional.....	40
3.2.2 Funcionamento do conversor a capacitor chaveado.....	43
3.2.3 Impedância efetiva do conversor a capacitor chaveado.....	46
3.2.4 Corrente desviada pelo conversor SC.....	49
3.2.5 Funcionamento do conversor a capacitor chaveado ressonante.....	50
3.2.6 Impedância efetiva do conversor a capacitor chaveado ressonante.....	54
3.2.7 Corrente desviada pelo conversor ReSC.....	57
3.2.8 Comparação de Z_{EFF} entre os conversores SC e ReSC.....	58
3.3 Topologia BBB-ReSC.....	59
3.4 Conclusões parciais.....	67

4.	Resultados de simulação	69
4.1	Considerações iniciais.....	69
4.2	Especificações dos módulos fotovoltaicos	69
4.2.1	Dimensionamento dos elementos da topologia BBB-ReSC.....	71
4.3	Avaliação e análise da topologia BBB-ReSC.....	73
4.3.1	Análise do conversor para uma série FV com quatro módulos.....	74
❖	Situação 1	75
4.3.2	Análise do conversor para uma série FV com seis módulos	81
❖	Situação 1	83
❖	Situação 2	87
4.3.3	Análise do conversor para uma série FV com oito módulos.....	90
❖	Situação 1	92
4.4	Comparação do conversor BBB-ReSC com outras topologias DPP	97
4.4.1	Arquitetura FV-FV com conversores <i>buck-boost</i> bidirecionais	98
❖	Situação 1	101
❖	Situação 2	102
4.4.2	Arquitetura híbrida com conversores <i>buck-boost</i> bidirecional e a capacitor chaveado (ERC)	103
❖	Situação 1	104
❖	Situação 2	106
4.4.3	Comparação	107
❖	Análise da recuperação energética	108
❖	Análise dos aspectos construtivos e operacionais	109
4.5	Conclusões parciais.....	111
5.	Resultados experimentais	112
5.1	Considerações iniciais.....	112
5.2	Circuitos auxiliares	112
5.3	Avaliação experimental da topologia BBB-ReSC.....	114
5.3.1	Análise do conversor para uma série FV com quatro módulos.....	116
❖	Situação 1	117
❖	Situação 2	119
5.3.2	Análise do conversor para uma série FV com seis módulos	121
❖	Situação 1	122

❖ Situação 2	124
5.4 Conclusões parciais.....	127
6. Conclusões finais e proposta de continuidade	128

Lista de figuras

Fig. 1.1 – Topologias de conversores DPP: (a) Topologia BBB-ReSC. (b) Topologia de origem. (c) Arquitetura PV-to-PV com conversores BBB.	6
Fig. 2.1 - Operação da série FV em condição de descasamento: (a) Série FV sem diodos de desvio. (b) Característica da curva $I-V$ de cada módulo sem diodos de desvio. (c) Série FV com diodos de desvio. (d) Características $P-V$ e $I-V$ da série FV com diodo de desvio.	11
Fig. 2.2 - Fluxograma dos métodos de mitigação do sombreamento.	13
Fig. 2.3 - Tipos de arquiteturas DPP: (a) Arquitetura FV-FV. (b) Arquitetura FV- <i>bus</i> . (c) Arquitetura híbrida.	17
Fig. 2.4 - Curvas de potência.	18
Fig. 2.5 - Arquitetura FV-FV com conversores BBB.	19
Fig. 2.6 - Arquiteturas FV-FV: (a) Arquitetura FV-FV com conversores SC. (b) Arquitetura FV-FV com conversores ReSC.	20
Fig. 2.7 - Estrutura completa da arquitetura FV-FV com conversores buck-boost bidirecionais para n módulos fotovoltaicos.	21
Fig. 2.8 - arquitetura FV-FV comporta por quatro módulos e três conversores DPP.	23
Fig. 2.9 - Arquitetura FV- <i>bus</i> com conversores BBB.	25
Fig. 2.10 - Arquitetura FV- <i>bus</i> com conversores flyback.	27
Fig. 2.11 - Arquitetura Híbrida com conversor <i>buck-boost</i> bidirecionais.	28
Fig. 2.12 - Arquitetura híbrida com conversores <i>buck-boost</i> bidirecional e a capacitor chaveado: (a) estrutura com quatro módulos. (b) Extensão da estrutura para oito módulos.	29
Fig. 2.13 – Arquitetura com conversores <i>buck-boost</i> de múltiplos estágios.	31
Fig. 2.14 – Arquitetura em progressão: (a) Com conversor a capacitor chaveado. (b) Com conversor a capacitor chaveado ressonante.	32
Fig. 2.15 - Mapa em radar as topologias DPP apresentadas.	35
Fig. 3.1 – Principais topologias adotadas em conversores DPP.	38

Fig. 3.2 – Concepção da topologia BBB-ReSC: (a) Substituição do conversor BBB pelo SC. (b) Nova conexão.....	38
Fig. 3.3 – Estrutura BBB-ReSC: (a) Seis módulos. (b) dez módulos.....	39
Fig. 3.4 – Operação do conversor BBB: (a) Módulos FV1 e FV2 conectados ao conversor BBB. (b) Primeiro intervalo. (c) Segundo intervalo.....	40
Fig. 3.5 - Formas de onda do conversor BBB.	41
Fig. 3.6 - Operação do conversor SC: (a) Módulos FVG1 e FVG2 conectados ao conversor SC. (b) Primeiro intervalo. (c) Segundo intervalo.....	43
Fig. 3.7 - Formas de onda do conversor a capacitor chaveado.....	44
Fig. 3.8 - Circuito equivalente.	45
Fig. 3.9 - Circuito equivalente.	46
Fig. 3.10 - Curva de impedância efetiva para o conversor a capacitor chaveado. ...	49
Fig. 3.11 - Estrutura do conversor a capacitor chaveado ressonante.....	50
Fig. 3.12 - Formas de onda do conversor a capacitor chaveado ressonante.....	51
Fig. 3.13 – Representação simplificada do conversor com circuito ressonante para a análise de Fourier.....	52
Fig. 3.14 - Subcircuito do conversor ReSC.	54
Fig. 3.15 - Forma de onda da corrente que flui pelo subcircuito RLC.....	55
Fig. 3.16 - Curva de impedância efetiva para o conversor a capacitor chaveado ressonante.	56
Fig. 3.17 - Impedância efetiva em função do fator de qualidade.	56
Fig. 3.18 - Comparação entre as impedâncias efetiva dos conversores SC e ReSC.	58
Fig. 3.19 – Topologia BBB-ReSC: (a) Estrutura com 4 módulos. b) Estrutura com 6 módulos. c) Estrutura com 8 módulos.....	59
Fig. 3.20 - Funcionamento da topologia BBB-ReSC para situação com o grupo FVG1 descasado: (a) Operação intervalo entre $[t_0, t_1]$. (b) Operação intervalo entre $[t_1, t_2]$	61
Fig. 3.21 - Formas de onda para a primeira situação analisada do conversor proposto.	62
Fig. 3.22 - Funcionamento da topologia BBB-ReSC para situação com um módulo descasado no grupo FVG1: (a) Operação intervalo entre $[t_0, t_1]$. (b) Operação intervalo entre $[t_1, t_2]$	64
Fig. 3.23 - Formas de onda para a segunda situação analisada do conversor proposto.	65

Fig. 4.1 - Diagrama de blocos do módulo modelo RSM020P em ambiente MATLAB/Simulink.	70
Fig. 4.2 - Diagrama de blocos do módulo modelo KS-10 em ambiente MATLAB/Simulink.	70
Fig. 4.3 - Curva I-V dos módulos empregados nos testes.	71
Fig. 4.4 – Implementação da topologia BBB-ReSC em ambiente Simulink para a análise computacional em uma série FV composta por quatro módulos.	75
Fig. 4.5 – Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 1 com quatro módulos fotovoltaicos.	76
Fig. 4.6 – Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por quatro módulos na situação 1.	78
Fig. 4.7 - Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 2 com quatro módulos fotovoltaicos.	79
Fig. 4.8 - Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por quatro módulos na situação 2.	82
Fig. 4.9 - Implementação da topologia BBB-ReSC em ambiente Simulink para a análise computacional em uma série FV composta por seis módulos.	83
Fig. 4.10 - Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 1 com seis módulos fotovoltaicos.	85
Fig. 4.11 - Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por seis módulos na situação 1.	86
Fig. 4.12 - Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 2 com seis módulos fotovoltaicos.	88
Fig. 4.13 - Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por seis módulos na situação 2.	90
Fig. 4.14 - Implementação da topologia BBB-ReSC em ambiente Simulink para a análise computacional em uma série FV composta por oito módulos.	91
Fig. 4.15 - Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 1 com oito módulos fotovoltaicos.	93
Fig. 4.16 - Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por oito módulos na situação 1.	95
Fig. 4.17 - Principais formas ondas da topologia BBB-ReSC para situação 2 com oito módulos fotovoltaicos.	96

Fig. 4.18 - Potência, tensão e corrente de saída nos terminais da série FV composta por oito módulos na situação 1.	99
Fig. 4.19 - Implementação da arquitetura FV-FV com conversores BBB em ambiente Simulink para a análise computacional em uma série FV composta por oito módulos.	100
Fig. 4.20 – Corrente que fluem pelos indutores dos conversores BBB para situação 1: (a) Valores obtidos por meio de simulação computacional. (b) Valores obtidos pelo equacionamento.	102
Fig. 4.21 - Corrente que fluem pelos indutores dos conversores BBB para situação 2: (a) Valores obtidos por meio de simulação computacional. (b) Valores obtidos pelo equacionamento.	103
Fig. 4.22 - Implementação da arquitetura híbrida com conversores buck-boost bidirecional e a capacitor chaveado em ambiente Simulink para a análise computacional em uma série FV composta por oito módulos.	104
Fig. 4.23 - Principais formas ondas do ERC para situação 1 com oito módulos fotovoltaicos.	105
Fig. 4.24 - Principais formas ondas do ERC para situação 2 com oito módulos fotovoltaicos.	107
Fig. 4.25 - Recuperação energética promovida pelas estruturas de DPP para situação 1.	108
Fig. 4.26 - Recuperação energética promovida pelas estruturas de DPP para situação 2.	109
Fig. 5.1 - Diagrama esquemático do CI SG3525 para um PWM de 50kHz.	113
Fig. 5.2 – Esquemático do circuito de acionamento dos MOSFETs do grupo FVG1.	114
Fig. 5.3 – Protótipo da topologia BBB-ReSC utilizado nos testes práticos.	114
Fig. 5.4 – Série FV empregada nos testes e principais instrumentos de medição. .	115
Fig. 5.5 - Curvas V-I dos módulos fotovoltaicos obtidas durante os testes experimentais para 1050W/m ² e 45 °C.	115
Fig. 5.6 – Vista detalhada da bancada de testes.	116
Fig. 5.7 – Corrente através do circuito ressonante ReSC1 (vermelho), tensão entre dreno e fonte de S1 (verde), tensão entre dreno e fonte de S2 (azul).	117
Fig. 5.8 – Tensão do grupo de módulos FVG1 (verde) e FVG2 (azul).	118

Fig. 5.9 – Corrente através do indutor de conversor BBB do grupo FVG1 (vermelho).	118
Fig. 5.10 – Tensão (azul), corrente (vermelho), Potência (ciano) da série FV antes e após a operação da topologia BBB-ReSC.	119
Fig. 5.11 - Corrente através do indutor de conversor BBB do grupo FVG1 (vermelho).	120
Fig. 5.12 – Corrente através do circuito ressonante ReSC1 (vermelho), tensão entre dreno e fonte de S1 (verde), tensão entre dreno e fonte de S2 (azul).	120
Fig. 5.13 - Tensão do grupo de módulos FVG1 (verde) e FVG2 (azul).	121
Fig. 5.14 – Tensão (azul), corrente (vermelho), Potência (ciano) da série FV antes e após a operação da topologia BBB-ReSC.	121
Fig. 5.15 - Corrente através do circuito ressonante ReSC1 (vermelho), corrente através do circuito ressonante ReSC2 (roxo), tensão entre dreno e fonte de S1 (verde), tensão entre dreno e fonte de S2 (azul).	122
Fig. 5.16 - Tensão do grupo de módulos FVG1 (verde), FVG2 (azul), FVG3 (roxo).	123
Fig. 5.17 - Corrente através do indutor de conversor BBB do grupo FVG1 (vermelho).	123
Fig. 5.18 - Tensão (azul), corrente (vermelho), Potência (ciano) da série FV antes e após a operação da topologia BBB-ReSC.	124
Fig. 5.19 - Corrente através do indutor de conversor BBB do grupo FVG1 (vermelho).	125
Fig. 5.20 - Corrente através do circuito ressonante ReSC1 (vermelho), corrente através do circuito ressonante ReSC2 (roxo), tensão entre dreno e fonte de S1 (verde), tensão entre dreno e fonte de S2 (azul).	125
Fig. 5.21 - Tensão do grupo de módulos FVG1 (verde), FVG2 (azul), FVG3 (roxo).	126
Fig. 5.22 - Tensão (azul), corrente (vermelho), Potência (ciano) da série FV antes e após a operação da topologia BBB-ReSC.	127

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Quadro resumo das topologias DPP para N módulos FV.	35
Tabela 4.1 - Características elétricas dos módulos RSM020P e KS-10.....	70
Tabela 4.2 – Especificações dos conversores da topologia BBB-ReSC.	73
Tabela 4.3 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação com uma série com 4 módulos.	78
Tabela 4.4 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação 2 com uma série com 4 módulos.	81
Tabela 4.5 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação 1 com uma série com 6 módulos.	86
Tabela 4.6 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação 2 com uma série com 6 módulos.	89
Tabela 4.7 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação 1 com uma série com 8 módulos.	95
Tabela 4.8 - Comparação entre os valores calculados e simulados para a situação 1 com uma série com 8 módulos.	98
Tabela 5.1 - Comparação entre as correntes calculadas, simuladas e obtidos experimentalmente para a primeira condição.	118
Tabela 5.2 - Comparação entre as correntes calculadas, simuladas e obtidos experimentalmente para a segunda condição.	120
Tabela 5.3 - Comparação entre as correntes calculadas, simuladas e obtidos experimentalmente para a segunda condição.	124
Tabela 5.4 - Comparação entre as correntes calculadas, simuladas e obtidos experimentalmente para a segunda condição.	126

Lista de abreviaturas e símbolos

- AAR. *Matriz adaptativa reconfigurável*
- BBB. *Buck-boost bidirecionais*
- BBB-ReSC. *Topologia proposta*
- BL. *Conectado em ponte*
- C_f . *Capacitor flutuante*
- D . *Razão cíclica*
- DCOP. *Otimizador de potência*
- DMPPT. *Seguidor do ponto de máxima potência distribuído*
- DPP. *Processamento diferencial de potência*
- EAR. *Matriz de reconfiguração elétrica*
- ERC. *Circuito de recuperação energética*
- ESR. *Resistência série equivalente*
- FSL. *Limite de comutação rápida*
- f_{sw} . *Frequência de comutação*
- FV, 2, *Fotovoltaico*
- GCC. *Circuito de controle de geração*
- Isérie. *Corrente de saída da série fotovoltaica*
- MIC. *Módulo integrado ao conversor*
- MOSFET. *Transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico*
- MPP. *Ponto de máxima potência*
- MPPT. *Seguimento do ponto de máxima potência*
- P&O. *Método perturba e observa*
- P_{ideal} . *Potência ideal*
- PWM. *Modulação por largura de pulso*
- R_{MPP} . *Resistência de máxima potência*
- RSP. *Conexão série-paralelo reconfigurável*
- RTCT. *Conexão total-cruzada reconfigurável*
- SC. *Capacitor chaveado*
- SSL. *Limite de comutação lenta*

STC. *Condição de teste padrão*
TBJ. *Transistor bipolar de junção*
TCT. *Conexão total-cruzada*
 V_{FVG} . *Tensão do grupo de módulos*
 V_{MPP} . *Tensão de máxima potência*
ZCS. *Comutação sob corrente nula*
 Z_{EFF} . *Impedância efetiva*

Referências bibliográficas

- [1] C. A. Nobre, J. Reid, and A. P. S. Veiga, "Fundamentos científicos das mudanças climáticas," *São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE*, 2012.
- [2] R. L. Nascimento, "Energia solar no Brasil: situação e perspectivas," *Brasília. Câmara dos Deputados*, 2017.
- [3] M. Kasper, D. Bortis, and J. W. Kolar, "Classification and comparative evaluation of PV panel-integrated DC–DC converter concepts," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 2511-2526, 2014.
- [4] A. Dolara, G. C. Lazaroiu, S. Leva, and G. Manzolini, "Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules," *Energy*, vol. 55, pp. 466-475, 2013.
- [5] K. A. K. Niazi, Y. Yang, and D. Sera, "Review of mismatch mitigation techniques for PV modules," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, pp. 2035-2050, 2019.
- [6] A. Sherwani and J. Usmani, "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 540-544, 2010.
- [7] W. Herrmann, W. Wiesner, and W. Vaassen, "Hot spot investigations on PV modules-new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes," in *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*, 1997, pp. 1129-1132.
- [8] S. Ahsan, K. A. K. Niazi, H. A. Khan, and Y. Yang, "Hotspots and performance evaluation of crystalline-silicon and thin-film photovoltaic modules," *Microelectronics Reliability*, vol. 88, pp. 1014-1018, 2018.
- [9] O. Khan and W. Xiao, "Review and qualitative analysis of submodule-level distributed power electronic solutions in PV power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 516-528, 2017.

- [10] S. Qin, C. B. Barth, and R. C. Pilawa-Podgurski, "Enhancing microinverter energy capture with submodule differential power processing," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 3575-3585, 2016.
- [11] G. R. Walker and J. C. Pierce, "Photovoltaic DC-DC module integrated converter for novel cascaded and bypass grid connection topologies—Design and optimization," in *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, pp. 1-7.
- [12] P. S. Shenoy, K. A. Kim, B. B. Johnson, and P. T. Krein, "Differential power processing for increased energy production and reliability of photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 2968-2979, 2013.
- [13] S. Qin, S. T. Cady, A. D. Domínguez-García, and R. C. Pilawa-Podgurski, "A distributed approach to MPPT for PV sub-module differential power processing," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 2778-2785.
- [14] Z. Ye, H. Wen, G. Chu, and X. Li, "Minimum-power-tracking for PV-PV differential power processing systems," in *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017, pp. 696-700.
- [15] Z. Qiu, K. Sun, and H. Wu, "Cascaded power balancing mechanism based on resonant switched capacitor topology for photovoltaic systems," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 3514-3520.
- [16] K. Kesarwani, R. Sangwan, and J. T. Stauth, "Resonant-switched capacitor converters for chip-scale power delivery: Design and implementation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 6966-6977, 2014.
- [17] G. Chu, H. Wen, L. Jiang, Y. Hu, and X. Li, "Bidirectional flyback based isolated-port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications," *Solar Energy*, vol. 158, pp. 929-940, 2017.
- [18] R. Kadri, J.-P. Gaubert, and G. Champenois, "Nondissipative string current diverter for solving the cascaded DC-DC converter connection problem in photovoltaic power generation system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 1249-1258, 2011.
- [19] I. Shams, S. Mekhilef, and K. S. Tey, "Advancement of voltage equalizer topologies for serially connected solar modules as partial shading mitigation

- technique: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, p. 124824, 2021.
- [20] S. Qin, S. T. Cady, A. D. Dominguez-Garcia, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "A distributed approach to maximum power point tracking for photovoltaic submodule differential power processing," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 2024-2040, 2014.
- [21] V. d'Alessandro, P. Guerriero, and S. Daliento, "A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, pp. 405-413, 2013.
- [22] K. A. Kim and P. T. Krein, "Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, pp. 1435-1441, 2015.
- [23] F. Belhachat and C. Larbes, "Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions," *Solar Energy*, vol. 120, pp. 399-418, 2015.
- [24] Y.-J. Wang and P.-C. Hsu, "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells," *Energy*, vol. 36, pp. 3069-3078, 2011.
- [25] L. Gao, R. A. Dougal, S. Liu, and A. P. Iotova, "Parallel-connected solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 56, pp. 1548-1556, 2009.
- [26] N. D. Kaushika and N. K. Gautam, "Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, pp. 127-134, 2003.
- [27] I. Mehedi, Z. Salam, M. Ramli, V. Chin, H. Bassi, M. Rawa, *et al.*, "Critical evaluation and review of partial shading mitigation methods for grid-connected PV system using hardware solutions: The module-level and array-level approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111138, 2021.
- [28] Z. M. Salameh and F. Dagher, "The effect of electrical array reconfiguration on the performance of a PV-powered volumetric water pump," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, pp. 653-658, 1990.

- [29] G. Velasco-Quesada, F. Guinjoan-Gispert, R. Piqué-López, M. Román-Lumbreras, and A. Conesa-Roca, "Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4319-4331, 2009.
- [30] P. dos Santos, E. M. Vicente, and E. R. Ribeiro, "Relationship between the shading position and the output power of a photovoltaic panel," in *XI Brazilian Power Electronics Conference*, 2011, pp. 676-681.
- [31] P. dos Santos, E. M. Vicente, and E. R. Ribeiro, "Reconfiguration methodology of shaded photovoltaic panels to maximize the produced energy," in *XI Brazilian power electronics conference*, 2011, pp. 700-706.
- [32] G. Velasco, F. Guinjoan, and R. Piqué, "Grid-connected PV systems energy extraction improvement by means of an electric array reconfiguration (EAR) strategy: Operating principle and experimental results," in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1983-1988.
- [33] A. Ghaffari, S. Seshagiri, and M. Krstić, "Multivariable maximum power point tracking for photovoltaic micro-converters using extremum seeking," *Control Engineering Practice*, vol. 35, pp. 83-91, 2015.
- [34] S. V. Dhople, J. L. Ehlmann, A. Davoudi, and P. L. Chapman, "Multiple-input boost converter to minimize power losses due to partial shading in photovoltaic modules," in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 2633-2636.
- [35] H. Luo, H. Wen, X. Li, L. Jiang, and Y. Hu, "Synchronous buck converter based low-cost and high-efficiency sub-module DMPPT PV system under partial shading conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 126, pp. 473-487, 2016.
- [36] G. R. Walker and P. C. Sernia, "Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1130-1139, 2004.
- [37] R. S. Balog, Y. Kuai, and G. Uhrhan, "A photovoltaic module thermal model using observed insolation and meteorological data to support a long life, highly reliable module-integrated inverter design by predicting expected operating temperature," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 3343-3349.

- [38] H.-J. Chiu, Y.-K. Lo, C.-Y. Yang, S.-J. Cheng, C.-M. Huang, C.-C. Chuang, *et al.*, "A module-integrated isolated solar microinverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 781-788, 2012.
- [39] R. Bell and R. C. Pilawa-Podgurski, "Decoupled and distributed maximum power point tracking of series-connected photovoltaic submodules using differential power processing," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, pp. 881-891, 2015.
- [40] C. Schaefer and J. T. Stauth, "Multilevel power-point-tracking for variable-conversion-ratio photovoltaic ladder converters," in *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2013, pp. 1-7.
- [41] M. M. Escribano, M. G. Solano, Í. de la Parra Laita, J. M. Alvarez, L. Marroyo, and E. L. Pigueiras, "Module temperature dispersion within a large PV array: Observations at the amareleja PV plant," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, pp. 1725-1731, 2018.
- [42] G. Chu, H. Wen, and Y. Hu, "Control method for flyback based submodule integrated converter with differential power processing structure," in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 684-689.
- [43] S. Ben-Yaakov, A. Blumenfeld, A. Cervera, and M. Evzelman, "Design and evaluation of a modular resonant switched capacitors equalizer for PV panels," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 4129-4136.
- [44] A. Blumenfeld, A. Cervera, and M. M. Peretz, "Enhanced differential power processor for PV systems: Resonant switched-capacitor gyrator converter with local MPPT," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, pp. 883-892, 2014.
- [45] M. Gokdag, M. Akbaba, and O. Gulbudak, "Switched-capacitor converter for PV modules under partial shading and mismatch conditions," *Solar Energy*, vol. 170, pp. 723-731, 2018.
- [46] J. T. Stauth, K. Kesarwani, and C. Schaefer, "A distributed photovoltaic energy optimization system based on a sub-module resonant switched-capacitor implementation," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012, pp. LS2d. 2-1-LS2d. 2-6.

- [47] C. Schaefer, K. Kesarwani, and J. T. Stauth, "A coupled-inductor multi-level ladder converter for sub-module PV power management," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013, pp. 732-737.
- [48] M. Kasper, S. Herden, D. Bortis, and J. W. Kolar, "Impact of PV string shading conditions on panel voltage equalizing converters and optimization of a single converter system with overcurrent protection," in *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, pp. 1-10.
- [49] C. M. A. da Luz, E. R. Ribeiro, and F. L. Tofoli, "Analysis of the PV-to-PV architecture with a bidirectional Buck-Boost converter under shading conditions," *Solar Energy*, vol. 232, pp. 102-119, 2022.
- [50] C. H. dos Santos, P. F. Donoso-Garcia, and S. I. S. Junior, "A comparative analysis of voltage equalizers for partial shading compensation in PV arrays," *Eletrônica de Potência*, vol. 24, pp. 323-335, 2019.
- [51] G. Chu, H. Wen, Z. Ye, and X. Li, "Design and optimization of the PV-virtual-bus differential power processing photovoltaic systems," in *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017, pp. 674-679.
- [52] C. Santos, P. Donoso-Garcia, S. S. Júnior, and A. Magalhães, "Cascaded Cell String Current Diverter For Improvement Of Photovoltaic Solar Array Under Partial Shading Problems," *Eletrônica de Potência*, vol. 20, pp. 272-282, 2015.
- [53] Z. Salam and M. Ramli, "A simple circuit to improve the power yield of PV array during partial shading," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1622-1626.
- [54] M. Z. Ramli and Z. Salam, "A simple energy recovery scheme to harvest the energy from shaded photovoltaic modules during partial shading," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 6458-6471, 2014.
- [55] T. Shimizu, O. Hashimoto, and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, pp. 704-711, 2003.
- [56] R. L. Boylestad, *Introductory circuit analysis*: Pearson Education India, 2003.
- [57] K. Kesarwani and J. T. Stauth, "A comparative theoretical analysis of distributed ladder converters for sub-module PV energy optimization," in *2012 IEEE 13th*

- Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2012, pp. 1-6.
- [58] M. Jabbari, "Unified analysis of switched-resonator converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 1364-1376, 2010.
- [59] K. A. K. Niazi, Y. Yang, J. He, A. Z. Khan, and D. Sera, "Switched-Capacitor-Inductor-based Differential Power Converter for Solar PV Modules," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 4613-4618.
- [60] J. W. Kimball and P. T. Krein, "Analysis and design of switched capacitor converters," in *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.*, 2005, pp. 1473-1477.
- [61] C. K. Alexander and M. N. Sadiku, *Fundamentos de circuitos elétricos*: AMGH Editora, 2013.
- [62] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1244-1254.
- [63] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1198-1208, 2009.
- [64] I. Barbi, C. H. I. Font, and R. L. Alves, "Projeto físico de indutores e transformadores," *Documento Interno (INEP-2002)*, 2002.