

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIANA CUNHA NEVES

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE SECUNDÁRIO EM
MICRORREDES CC**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2023**

JULIANA CUNHA NEVES

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE SECUNDÁRIO EM
MICRORREDES CC**

**STUDY AND IMPLEMENTATION OF SECONDARY CONTROL IN DC
MICROGRIDS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de “Mestra em Engenharia Elétrica”, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Sergio Augusto Oliveira Da Silva.

Coorientador(a): Leonardo Poltronieri Sampaio.

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite *download* e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



JULIANA CUNHA NEVES

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE SECUNDÁRIO EM MICRORREDES CC

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sistemas Eletrônicos Industriais.

Data de aprovação: 20 de Outubro de 2023

Dr. Sergio Augusto Oliveira Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Moacyr Aureliano Gomes De Brito, Doutorado - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul(Ufms)

Sebastian De Jesus Manrique Machado, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Wesley Angelino De Souza, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho a Lola Maria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que tem sido meu sustento em todas as situações.

Aos meus amados pais, Léo e Aparecida, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional que sempre me proporcionaram. Sua crença constante em mim e o apoio inabalável às minhas escolhas têm sido um pilar fundamental em minha jornada. Reconheço também o esforço incansável que fizeram para garantir que eu tivesse acesso à melhor formação possível, demonstrando um comprometimento admirável com o meu crescimento e desenvolvimento. Sou verdadeiramente abençoada por ter vocês como meus pais e sou grata por cada sacrifício que fizeram por mim.

Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva pelo ensinamento, dedicação, paciência, motivação e conversas ao longo desta jornada. Obrigada por confiar esse desafio a mim!

Aos Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio, Prof. Dr. Sebastián de Jesús Manrique Machado e Prof. Dr. Wesley Angelino de Souza pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Ao grupo de pesquisa do LEPQER pelos auxílios, explicações e ideias, em especial a Dr. Rafaela Dizaró Silveira e Me. Anderson Dionizio cujas contribuições foram peças-chave para a realização deste trabalho.

Ao meu querido amigo João Paulo, quero transmitir minha sincera gratidão por sempre ter estado ao meu lado em todos os momentos. Obrigado por ser uma base e um refúgio constante.

E ao meu grande amigo e amor, Allan, quero agradecer por seu apoio inabalável e presença diária. Suas palavras de encorajamento têm sido uma luz constante em minha jornada.

“O mar em que tu navegas é a saga que tu segue as cegas” (Black Alien)

RESUMO

NEVES, Juliana Cunha. **Estudo e implementação de controle secundário em microrredes CC**. 2023. 157f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2023.

A ampliação da geração distribuída (GD) e a integração de tecnologias de informação ao sistema elétrico têm transformado a dinâmica de geração e consumo de energia. Nesse cenário, as microrredes emergem como soluções promissoras para uma integração mais eficiente da GD à rede elétrica. Embora os sistemas de distribuição predominantes sejam baseados em corrente alternada, a crescente demanda por cargas em corrente contínua (CC) e a existência de fontes de energia renováveis em CC motivam a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas de distribuição em CC. Desta forma este trabalho aborda o uso de microrredes CC com principal abordagem no controle secundário. Uma microrrede avançada é capaz de integrar GDs, sistemas de armazenamento de energia e cargas de maneira eficiente. No entanto, para que isso seja viável é necessário o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento e controle. As microrredes CC são entidades gerenciadas por meio de uma estrutura hierárquica de controle composta por três níveis de controle, sendo eles, o controle primário, o secundário e o terciário. O controle secundário, foco deste trabalho, desempenha basicamente duas funções: 1) compartilhamento de potência/corrente; e 2) regulação da tensão CC. Uma das principais questões relacionadas ao controle secundário em microrredes CC é a implementação de uma rede de comunicação eficiente para trocar informações entre as unidades conversoras que constituem a topologia da microrrede CC. Sendo assim, este trabalho visa estudar, implementar e validar, por meios de experimentações práticas, uma proposta de comunicação baseada em uma abordagem distribuída para o uma técnica inovadora de compartilhamento de potência/corrente baseada em alocação de potência com base em fatores de proporção previamente definidos entre os conversores formadores de uma microrrede CC. Isso possibilita um melhor compartilhamento de energia entre os conversores, promovendo uma operação mais estável e eficiente da microrrede. A avaliação dos resultados de simulação é conduzida por meio do software Matlab®, utilizando o *toolbox TrueTime* no ambiente do Simulink, permitindo a simulação de atrasos e falhas de comunicação, além de resultados experimentais, utilizando um protótipo. Ao analisar duas topologias de comunicação, o estudo desvenda como a microrrede responde a variações de carga, perturbações e falhas de comunicação. As análises enfatizam a eficácia do controle secundário em assegurar a estabilidade do barramento CC ao corrigir desvios e de distribuição eficiente de potência através da abordagem proposta.

Palavras-chave: Compartilhamento de potência/corrente; Controle Hierárquico; Controle Secundário; Microrredes CC; Rede de Comunicação.

ABSTRACT

NEVES, Juliana Cunha. **Study and implementation of secondary control in DC microgrids**. 2023. 157f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2023.

The growing increase of distributed generation (DG) coupled with the integration of information technologies into the electrical grid has revolutionized energy production and consumption dynamics. With in this context, microgrids are emerging as promising solutions for efficiently incorporating DG into the power grid. Despite the prevalence of alternating current in distribution systems, the growing demand for direct current (DC) loads and the presence of DC-based renewable energy sources are driving research and development in DC distribution systems. This study focuses on the utilization of DC microgrids with a primary emphasis on secondary control. An advanced microgrid seamlessly integrates DG, energy storage systems, and loads. However, this integration hinges on the formulation of effective control management strategies. DC microgrids are managed through a hierarchical control structure consisting of three levels: primary, secondary, and tertiary control. This work zeroes in on secondary control, which primarily serves two functions: 1) distribution of power/current, and 2) adjustment of DC voltage. A key challenge in implementing secondary control within DC microgrids is establishing an efficient communication network for information exchange among the converter units that compose the microgrid's topology. Hence, the objective of this research is to study, implement, and validate a communication methodology based on a distributed approach for an innovative power/current sharing technique among the converters within a DC microgrid. This communication framework enhances energy distribution between converters, consequently fostering stability and efficiency in microgrid operations. The evaluation of simulation results is performed using Matlab® software, employing the TrueTime toolbox within the Simulink environment. This approach facilitates the simulation of communication delays and failures, complemented by experimental outcomes using a prototype. When analyzing two communication topologies, the study unveils how the microgrid responds to load variations, disturbances, and communication failures. The analyses highlight the effectiveness of the secondary control in ensuring the stability of the DC bus by correcting deviations and in achieving efficient power distribution through the proposed approach.

Keywords: Power/current sharing; Hierarchical Control; Secondary Control; DC microgrids; Communication Network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de controle hierárquico de uma microrrede.....	22
Figura 2 - Estrutura básica de uma microrrede.	26
Figura 3 - Microrrede CC em topologia radial simples.	29
Figura 4 - Microrrede CC em topologia radial múltiplas.	30
Figura 5 - Microrrede CC em topologia anel.....	31
Figura 6 - Estrutura do controle hierárquico para microrredes CC.....	32
Figura 7 - Diagrama típico do controle por <i>droop</i> em um conversor CC/CC.....	34
Figura 8 - Circuito Equivalente.	35
Figura 9 - Estrutura da estratégia de controle centralizada.	37
Figura 10 - Estrutura da estratégia de controle descentralizada.	38
Figura 11 - Estrutura da estratégia de controle distribuída.....	38
Figura 12 - Diagrama de implementação do controle secundário <i>voltage shifting</i>	41
Figura 13 - Diagrama da implementação do controle secundário <i>slope adjusting</i>	42
Figura 14 - Diagrama da implementação do controle secundário apresentado em Lu et al., (2014).	43
Figura 15 - Diagrama da implementação do controle secundário apresentado em Anand, Fernandes e Guerrero (2012).	44
Figura 16 - Diagrama da estratégia de controle secundário proposta em Wang et al. (2016).....	45
Figura 17 - Diagrama da estratégia de controle secundário proposta em Nasirian et al. (2014).....	45
Figura 18 - Diagrama do controle proposto.....	48
Figura 19 - Arquitetura de comunicação em camadas.	54
Figura 20 - Estrutura da rede Modbus.....	61
Figura 21 - Formatos típicos de frame de dados UART.	65
Figura 22 - Formato do quadro SCI.....	70
Figura 23 - Diagrama de blocos da topologia C1 da microrrede CC em estudo.	72
Figura 24 - Diagrama de blocos da topologia C2 da microrrede CC em estudo.	73
Figura 25 - Circuito equivalente conversor CC/CC bidirecional.....	74
Figura 26 - Topologia do conversor CA/CC bidirecional.	75
Figura 27 - Circuito equivalente do conversor CA/CC.....	76
Figura 28 – Conversor <i>boost</i> em análise.....	77
Figura 29 - Topologia de rede de comunicação em linha.....	79
Figura 30 - Topologia de rede de comunicação em anel.	80
Figura 31 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 1. ...	87
Figura 32 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 1 - Linha. ...	90
Figura 33 - Ajuste da resistência de droop δRD_j e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVO_j Cenário 1 - Linha.	90
Figura 34 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 1 - Anel... ..	92
Figura 35 - Ajuste da resistência de droop δRD_j e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVO_j Cenário 1 - Anel.	93

Figura 36 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 2...	95
Figura 37 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 2 - Linha.	97
Figura 38 - Ajuste da resistência de droop δRDj e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVOj Cenário 2 - Linha.	98
Figura 39 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 2 - Anel...	99
Figura 40 - Ajuste da resistência de droop δRDj e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVOj Cenário 2 - Anel.....	100
Figura 41 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 3.	102
Figura 42 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 3 - Linha.	105
Figura 43 - Ajuste da resistência de droop δRDj e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVOj Cenário 3 - Linha.	106
Figura 44 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 3 - Anel.	108
Figura 45 - Ajuste da resistência de droop δRDj e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δVOj Cenário 3 - Anel.....	109
Figura 46 - Protótipo da microrrede CC.	111
Figura 47 - Protótipo da comunicação.....	112
Figura 48 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 1: Tensão de saída dos.....	113
Figura 49 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 1 – Linha: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).....	115
Figura 50 - Ajuste da resistência de droop (R_{DB1} , R_{DB2} , R_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (V_{OB1} , V_{OB2} , V_{OCIR}) do cenário 1 - Linha.	116
Figura 51 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 1 – Anel: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).....	118
Figura 52 - Ajuste da resistência de droop (R_{DB1} , R_{DB2} , R_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (V_{OB1} , V_{OB2} , V_{OCIR}) do cenário 1 - Anel.....	120
Figura 53 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 2: Tensão de saída dos.....	122
Figura 54 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 2 – Linha: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).....	125
Figura 55 - Ajuste da resistência de droop (δR_{DB1} , δR_{DB2} , δR_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (δV_{OB1} , δV_{OB2} , δV_{OCIR}) do cenário 2 - Linha.	126
Figura 56 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 2 – Anel: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).....	127

Figura 57 - Ajuste da resistência de <i>droop</i> ($\delta RDB1, \delta RDB2, \delta RDCIR$) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC ($\delta VOB1, \delta VOB2, \delta VOCIR$) do cenário 2 - Anel.....	129
Figura 58 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 3: Tensão de saída dos.....	131
Figura 59 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 3 – Linha: Tensão de saída dos conversores ($vB1, vB2, vCIR$); correntes de saída dos conversores ($iB1, iB2, iCIR$) e potência de saída dos conversores ($PB1, PB2, PCIR$) (30s/div).....	133
Figura 60 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 3 – Anel: Tensão de saída dos conversores ($vB1, vB2, vCIR$); correntes de saída dos conversores ($iB1, iB2, iCIR$) e potência de saída dos conversores ($PB1, PB2, PCIR$) (30s/div).....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do controle secundário da microrrede CC.	47
Tabela 2 - GPIO configuráveis para SCIA, SCIB e SCIC.	70
Tabela 3 - Especificações de simulação e experimental dos cenários explorados. ..	82
Tabela 4 - Especificações de simulação e experimental da microrrede CC.	83
Tabela 5 - Especificações de simulação e experimental dos conversores CC/CC e CA/CC da microrrede CC.	84
Tabela 6 - Situações avaliadas na microrrede CC em estudo.	85
Tabela 7 – Parâmetros de comunicação <i>True Time</i>	86
Tabela 8 - Modos de operação controle primário: Cenário 1.	86
Tabela 9 - Desempenho numérico do controle primário em regime permanente: Cenário 1.	87
Tabela 10 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 1.	88
Tabela 11 - Modos de operação controle secundário: Cenário 1.	89
Tabela 12 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 - Linha.	91
Tabela 13 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Linha.	91
Tabela 14 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 - Anel.	93
Tabela 15 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Anel.	94
Tabela 16 - Modos de operação controle primário: Cenário 2.	94
Tabela 17 - Desempenho numéricos em regime permanente do controle primário do cenário 2.	95
Tabela 18 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 2.	96
Tabela 19 - Modos de operação controle secundário: Cenário 2.	96
Tabela 20 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 - Linha.	98
Tabela 21 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Linha.	99
Tabela 22 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 - Anel.	101
Tabela 23 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Anel.	101
Tabela 24 - Modos de operação controle primário: Cenário 3.	102
Tabela 25 - Desempenho numéricos em regime permanente do controle primário do cenário 3.	103
Tabela 26 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 3.	104
Tabela 27 - Modos de operação controle secundário: Cenário 3.	104

Tabela 28 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 - Linha.....	107
Tabela 29 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Linha.....	107
Tabela 30 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 - Anel.	109
Tabela 31 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Anel.....	110
Tabela 32 – Parâmetros de comunicação do módulo SCI.	112
Tabela 33 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 1.....	113
Tabela 34 - Erros experimentais obtidos do controle primário em regime permanente: Cenário 1.....	113
Tabela 35 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 1 - Linha.	116
Tabela 36 - Erros obtidos experimentais do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Linha.....	117
Tabela 37 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 1 - Anel.....	119
Tabela 38 - Erros obtidos experimentais do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Anel.....	120
Tabela 39 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 2.....	121
Tabela 40 - Erros obtidos experimentais do controle primário em regime permanente: Cenário 2.....	122
Tabela 41 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 2 - Linha.	124
Tabela 42 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Linha.....	126
Tabela 43 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 2 - Anel.....	128
Tabela 44 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Anel.....	129
Tabela 45 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 3.....	130
Tabela 46 – Erros experimentais obtidos do controle primário em regime permanente: Cenário 3.....	131
Tabela 47 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 3 - Linha.	133
Tabela 48 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Linha.....	134
Tabela 49 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 3 - Anel.....	136

Tabela 50 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Anel.....	137
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bps	Bits por segundo
BRR	<i>Baud Rate Register</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i>
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
FER	Fontes de Energias Renováveis
FIFO	<i>First In/First Out</i>
FPB	Filtro Passa-Baixa
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LAN	<i>Local Area Network</i>
LSPCLK	<i>Low Speed Peripheral Clock</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NAN	<i>Neighborhood Area Networks</i>
NRZ	<i>non-return to-zero</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&O	<i>Perturb and Observe</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PLC	<i>Power line communication</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RED	Recursos Elétricos Distribuídos

SAE	Sistemas de Armazenamento de Energia
SCI	<i>Serial Communication Interface</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMA	Sistemas Multiagentes
SOC	<i>State of Charge</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
STP	<i>Shielded Twisted Pair</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
WAN	<i>Wide Area Networks</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA	19
1.2 PROPOSTA DO TRABALHO	23
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 Objetivo Geral	24
1.3.2 Objetivos Específicos	24
1.4 CONTRIBUIÇÕES	24
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
CAPÍTULO 2 – MICRORREDES	26
2.1 MICRORREDES CC	26
2.2 TOPOLOGIAS DE MICRORREDES CC	28
2.3 CONTROLE HIERÁRQUICO	31
2.3.1 Controle em nível primário	33
2.3.2 Controle em nível secundário	36
2.3.3 Controle em nível terciário	36
2.4 ABORDAGENS DE IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE	37
2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	39
CAPÍTULO 3 – CONTROLE EM NÍVEL SECUNDÁRIO	40
3.1 DESVIO DE TENSÃO NO BARRAMENTO CC	40
3.2 COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA/CARGA	41
3.2.1 Técnica <i>Voltage Shifting</i>	41
3.2.2 Técnica <i>Slope Adjusting</i>	42
3.3 TÉCNICAS DE CONTROLE EM NÍVEL SECUNDÁRIO	42
3.4 DESENVOLVIMENTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SECUNDÁRIO	47
3.4.1 Princípio de funcionamento do controle proposto para o compartilhamento de corrente/potência	48
3.4.2 Controle dos desvios de tensão do barramento CC	50
3.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	51
CAPÍTULO 4 – REDES DE COMUNICAÇÃO	52
4.1 REQUISITOS E PARÂMETROS DE COMUNICAÇÃO	52
4.2 ARQUITETURA DE REDES DE COMUNICAÇÃO	54
4.2.1 Redes da área de instalação próxima do consumidor: (HAN), (BAN) e (IAN)	55
4.2.2 <i>Neighborhood Area Networks</i> (NAN)	55

4.2.3 Wide Area Networks (WAN)	55
4.3 INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO	56
4.3.1 Comunicação com fio	56
4.3.1.1 Power line communication (PLC).....	56
4.3.1.2 Cabo de par trançado	57
4.3.1.2 Fibra óptica	58
4.3.2 Comunicação sem fio	58
4.3.2.1 ZigBee	58
4.3.2.2 Wi-Fi Local.....	59
4.3.2.3 Wireless Mesh	60
4.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	61
4.4.1 Modbus.....	61
4.4.2 Distributed Network Protocol version 3.3 (DNP3)	62
4.4.3 Controller Area Network - CAN.....	64
4.4.4 Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART).....	64
4.5 NORMAS DE COMUNICAÇÃO.....	65
4.5.1 IEC 61850.....	66
4.5.2 IEEE P2030	67
4.5.3 Padrão RS-232	67
4.5.4 Padrão RS-485	68
4.6 DESENVOLVIMENTO DA REDE DE COMUNICAÇÃO	68
4.6.1 Módulo SCI	69
4.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	71
CAPÍTULO 5 – MICRORREDE CC EM ESTUDO	72
5.1 ESTRUTURA DA TOPOLOGIA DA MICRORREDE CC EM ESTUDO	72
5.2 MODELAGEM DOS CONVERSORES ESTÁTICOS	74
5.2.1 Modelo do conversor CC/CC controlado em modo tensão por <i>droop</i>	74
5.2.2 Modelo do conversor de interface CA/CC.....	75
5.2.2.1 Modelagem do barramento CC do conversor CA/CC	76
5.2.3 Modelo do conversor CC/CC operando em MPPT	77
5.3 TOPOLOGIAS DA REDE DE COMUNICAÇÃO.....	78
5.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	80
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E	
EXPERIMENTAIS.....	81
6.1 CENÁRIOS AVALIADOS	81
6.2 PARÂMETROS DOS SISTEMAS EM ESTUDO	83
6.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	84

6.3.1 Cenário 1: Controle primário	86
6.3.2 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em linha	88
6.3.3 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em anel	92
6.3.4 Cenário 2: Controle primário	94
6.3.5 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em linha	96
6.3.6 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em anel	99
6.3.7 Cenário 3: Controle primário	101
6.3.8 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em linha	104
6.3.9 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em anel	107
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	110
6.4.1 Cenário 1: Controle primário	112
6.4.2 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em linha	114
6.4.3 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em anel	117
6.4.4 Cenário 2: Controle primário	121
6.4.5 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em linha	122
6.4.6 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em anel	127
6.4.7 Cenário 3: Controle primário	129
6.4.8 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em linha	131
6.4.9 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em anel	134
6.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	137
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	139
7.1 CONCLUSÕES	139
7.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	140
REFERÊNCIAS	141
APÊNDICES	149
APÊNDICE A – TOOLBOX TRUE TIME	150
A.1 BLOCO <i>KERNEL TRUE TIME</i>	150
A.2 DIAGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRUETIME	151
APÊNDICE B – Modelo Equivalente da Célula Fotovoltaica	153
APÊNDICE C – Técnica de Seguimento do Ponto de Máxima Potência P&O	155
APÊNDICE D – Projetos dos Controladores	156

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

Com a população mundial em constante expansão, a demanda por energia tem aumentado exponencialmente. As estimativas apontam que a população global alcançará 8,55 bilhões até 2030 (BBC NEWS BRASIL, 2022). No entanto, o aumento na demanda de energia não se limita apenas ao crescimento populacional. Além desse fator, outros elementos têm contribuído para essa crescente necessidade energética.

O avanço tecnológico e a crescente eletrificação de diversos setores desempenham um papel significativo no aumento da demanda por energia. À medida que a tecnologia evolui, mais dispositivos eletrônicos são incorporados ao nosso cotidiano, e a eletrificação de setores como transporte e aquecimento se torna mais comum (NREL, 2017). Essa mudança em direção a uma sociedade cada vez mais eletrificada resulta em um consumo energético adicional, criando uma pressão adicional sobre os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica convencionais.

Dentre as fontes de geração, 67% da matriz energética mundial é composta por combustíveis fósseis, energia nuclear ou grandes centrais hidrelétricas (GOMES DE OLIVEIRA; GUIMARAES TRINDADE, 2018). Cada uma destas fontes tem seu respectivo impacto ambiental, que agrava o cenário de um possível colapso do ecossistema, devido ao aumento da poluição e o reflexo nas mudanças climáticas (EIA, 2019; CHANG et al., 2021). Com isso, a dependência dos países em relação ao suprimento de energia elétrica e a preocupação de soluções ao fomento do planejamento energético em conjunto com a questão de preservação ambiental têm resultado na inserção de fontes de energia alternativas e renováveis, tais como a solar e a eólica, por exemplo.

Em decorrência do aumento do uso de tais fontes, surgiu a generalização e advento da Geração Distribuída (GD). Essas Fontes de Energias Renováveis (FER) como solar, eólica e biomassa têm agregado possíveis soluções atuais para o planejamento de sistemas elétricos, tais como diversificação da matriz energética, redução dos impactos ambientais e avanço tecnológico (OLADE, 2017).

Apesar dos avanços tecnológicos, a adoção de sistemas de GD apresenta uma desvantagem significativa relacionada à segurança do sistema elétrico, a possibilidade de interrupção do fornecimento de energia em alta intensidade torna o sistema extremamente vulnerável, especialmente em momentos de maior consumo de energia (POURBEIK; KUNDUR; TAYLOR, 2006). Essa vulnerabilidade precisa ser analisada e mitigada para garantir a confiabilidade e a estabilidade do fornecimento de energia em um cenário de crescente incorporação de GDs.

Outro desafio enfrentado é a capacidade do modelo atual do sistema elétrico em acomodar FERs em larga escala. O sistema opera predominantemente com fluxo unidirecional de potência, onde a energia flui dos centros de geração para os consumidores por meio das redes de transmissão e distribuição. Além do desafio do fluxo unidirecional predominante no sistema elétrico, acomodar fontes de energia renovável em larga escala é um obstáculo significativo (CARNEIRO, 2017). Adicionalmente, a intermitência das fontes de energia renovável gera a necessidade de ajustar constantemente entre oferta e demanda, enquanto a redução da inércia do sistema e preocupações com a segurança devido a falhas nos algoritmos dos relés de proteção introduzem complexidades adicionais. O controle da tensão na rede também se torna uma tarefa complexa devido às flutuações na geração de energia renovável.

Ainda, as concessionárias de energia enfrentam o desafio de desenvolver e implementar tecnologias adequadas para gerenciar de forma eficiente a penetração das FERs no sistema elétrico de potência (SEP), como destacado na Nota Técnica NT-ONS DPL 0067-2023, emitida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que informa sobre os impactos do aumento da GD nas redes de distribuição. Tais tecnologias são fundamentais para garantir a estabilidade do sistema, levando em consideração a variabilidade e a intermitência inerentes às FERs

Desta forma, com o intuito de aumentar o nível de confiabilidade e o índice de eficiência do SEP, tanto por redução perdas de transmissão e distribuição, quanto por utilização de fontes de calor, percebe-se a necessidade de adaptações no sistema elétrico atual (HELDWEIN, 2010; DOMIJAN JR et al., 2005; FRANQUELO; LEON, 2013).

Neste sentido, as denominadas microrredes surgem como uma solução viável. Estas consistem em pequenos sistemas elétricos, geralmente em baixa tensão, compostas por Recursos Elétricos Distribuídos (REDs). O sistema opera como uma

entidade controlada e de forma coordenada com relação à rede elétrica principal (AHMETHODZIC; MUSTAFA MUSIC, 2021; HATZIARGYRIOU et al., 2006).

Por sua vez, as microrredes podem operar de maneira isolada ou ilhada da rede elétrica em situações em que há ausência ou redução do nível de energia recomendado, ou seja, as microrredes devem ser capazes de se desconectar da rede elétrica quando ocorrer alguma situação de falta, ou quando, como já mencionado, apresentar os níveis de fornecimento de tensão abaixo dos preestabelecidos. As microrredes ilhadas podem operar de forma independente da rede, e podem ser vistas como aglomerados de sistemas ininterruptos de energia (do Inglês - *Uninterruptible Power Supply* - UPS) que funcionam de maneira a compartilhar a carga da microrrede a um nível adequado de tensão (MACHADO, 2021; TOPA GAVILEMA et al., 2021).

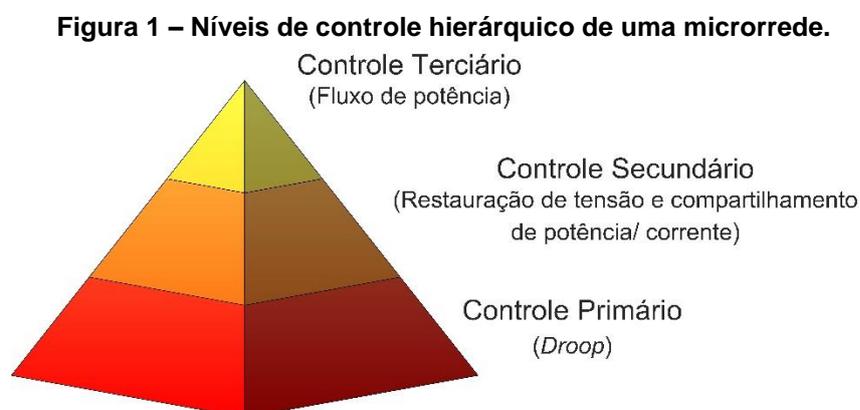
No que tange as categorizações das microrredes, estas podem ser classificadas com base na tensão do barramento comum que interliga os GD e cargas. Sendo assim, as microrredes podem operar em corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) ou híbrida, englobando CC e CA simultaneamente.

Considerando que as microrredes são um agrupamento de fontes GD, SAE e cargas conectadas à rede elétrica principal e que cada vez mais consumidores residenciais e comerciais possuem cargas CC (DUAN et al., 2020), os estudos e aplicações em distribuição local em corrente contínua têm apresentado vantagens significativas (LIANG; ZHUANG, 2014; NOSRATABADI; HOOSHMAND; GHOLIPOUR, 2017; MACHADO, 2021). Ainda, pelo lado do sistema de distribuição de energia elétrica, uma microrrede é uma única entidade controlável capaz de injetar ou receber energia da rede principal.

É importante ressaltar que as microrredes CC não dispõem da necessidade de regulação de frequência e ajustar o ângulo fase, além da ausência da preocupação em relação aos problemas relacionados à qualidade de energia elétrica (QEE), como: fluxo de potência reativa, harmônicos. Além de promover a integração das FERs, nas microrredes CC existe redução da quantidade de estágios de conversão de energia CA/CC, o que evidencia um ganho de até 15% de eficiência em relação as microrredes CA (KAKIGANO et al., 2010; FOTOPOULOU et al., 2021).

No entanto, as microrredes CC impõem alguns desafios, principalmente os relacionados às estratégias de controle e gerenciamento de energia. Das metodologias de controle propostas na literatura, o método de controle hierárquico apresentado em Guerreiro et al, (2011), tem ganhado destaque (LU et al, 2014). Essa

estrutura de controle se baseia no conceito de camadas, de forma que permite diversas possibilidades de técnicas em cada nível, conforme apresentado pela Figura 1.



Fonte: Adaptado de GUERRERO, J. M. et al (2011).

O primeiro deles, denominado controle primário, consiste em atuar nas malhas de controle local associados aos conversores estáticos de potência. Além disso, desempenha um papel fundamental no compartilhamento de carga entre os conversores e na regulação da tensão do barramento CC da microrrede. Já o segundo, conhecido por controle secundário, atua na correção dos erros gerados pela primeira camada de controle. Tais erros são especificamente aqueles definidos como erros de tensão do barramento nas microrredes CA e CC e frequência nas microrredes CA e ajuste do compartilhamento de corrente/potência. Por último, o controle terciário é o responsável pelo desempenho ótimo do fluxo de potência no sistema de uma microrrede CC, assim como pela análise do mercado de energia (BIDRAM; DAVOUDI, 2012; HANZAEI et al., 2021).

É importante destacar que, embora essa abordagem de controle seja comum, a norma desenvolvida por Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) Std 2030.7 oferece diretrizes complementares e padronização relacionada à interoperabilidade de RED com o SEP. Essa norma estabelece padrões de comunicação e protocolos que são essenciais para garantir que os REDs, incluindo os controladores de microrredes, possam se integrar eficazmente ao sistema elétrico e se comunicar com outros dispositivos e componentes do sistema de acordo com padrões específicos (IEEE, 2017).

1.2 PROPOSTA DO TRABALHO

Diante do exposto até o momento, nota-se que o controle de microrredes CC é um tema de relevância. Assim, o foco deste trabalho se baseia na proposta de apresentar um estudo e implementação do controle secundário em microrredes CC explorando os desafios dos sistemas de comunicação.

Em termos de níveis de controle, o controle secundário consiste em corrigir os desvios gerados pelo controle implementado em nível primário. Porém, é um assunto onde ainda existem barreiras de implementação prática, principalmente relacionadas à comunicação, pois atrasos de leitura e envio de informações e falhas de comunicação são problemas que podem ocorrer nesse tipo de abordagem.

Neste trabalho, uma topologia de microrrede baseada na estrutura radial simples será implementada. Serão abordadas duas configurações de microrrede CC. A primeira é composta por dois conversores bidirecionais CC/CC e um conversor CA/CC de interface com a rede elétrica CA monofásica. Já a segunda é formada por um conversor bidirecional CC/CC, um conversor controlado por corrente operando com um sistema fotovoltaico e um conversor CA/CC de interface com a rede elétrica CA. Os conversores são controlados a partir de um sistema de controle hierárquico, onde o controle primário é baseado na estratégia descentralizada, utilizando o controle por *droop* de tensão, enquanto o controle secundário para compartilhamento de corrente é uma proposta baseada em alocação de potência e para o desvio de tensão, compensação por diferença da média da tensão da saída dos conversores.

A partir do *TrueTime – toolbox* integrado ao ambiente Simulink/MATLAB® os impactos dos eventos de comunicação do controle secundário na microrrede CC serão avaliados por meio de simulação computacional. No que tange à prática, o sistema será validado em bancada experimental empregando uma estrutura de comunicação para o controle secundário. Adicionalmente, serão investigadas duas topologias de comunicação para fins de comparação de robustez.

À vista disso, o estudo foca em preencher lacunas referentes à rede de comunicação, como as arquiteturas de rede aplicadas nas microrredes e na aplicação de estratégias do controle secundário. Além disso, o estudo visa apresentar uma nova estratégia de compartilhamento de corrente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em propor e validar, por meio de simulações computacionais e experimentalmente, uma estrutura de microrrede que possibilite empregar o uso de redes de comunicação associadas ao controle secundário, usando uma abordagem de controle distribuído hierárquico. Além disso, o trabalho visa também comparar os desempenhos dinâmicos do sistema sob diferentes eventos de perturbação da rede de comunicação e operação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar e implementar um sistema de comunicação entre os conversores que compõem uma microrrede CC;
- ✓ Discutir requisitos, arquiteturas, infraestrutura e protocolos de comunicação;
- ✓ Explorar as topologias de redes de comunicação;
- ✓ Estudar os métodos de compartilhamento de corrente/potência;
- ✓ Avaliar e comparar os sistemas de rede de comunicação por meio da ferramenta computacional *TrueTime – toolbox* no ambiente Simulink/MATLAB®;
- ✓ Validar e comparar experimentalmente as topologias de comunicação.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

As contribuições mais significativas deste trabalho podem ser sintetizadas nas seguintes realizações:

- ✓ Desenvolver uma rede de comunicação experimental que possibilite a troca de informação para funcionamento do controle secundário na microrrede CC;
- ✓ Desenvolver uma estratégia de controle secundário inovadora para o compartilhamento de corrente/potência, que permita uma alocação precisa de potência com base em taxas de alocação predefinidas;
- ✓ Por meio do Software *TrueTime – toolbox* no ambiente Simulink/MATLAB®, analisar em tempo real a interação da rede de comunicação referente ao controle e seus impactos perante a operação da microrrede CC;

- ✓ Análise comparativa entre duas arquiteturas de rede de comunicação, de maneira a evidenciar suas vantagens e desafios em relação à operação da microrrede.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos organizados do seguinte modo: o capítulo dois apresenta os conceitos referentes às microrredes, as categorizações e as definições da estratégia de controle hierárquico aplicadas às microrredes CC.

O capítulo três apresenta a ênfase dada ao controle secundário, onde são discutidas as principais técnicas apresentadas na literatura para o compartilhamento de potência e desvio de tensão, bem como as alternativas de implementação.

No quarto capítulo é exposta uma revisão da literatura referente às redes de comunicação. São contemplados requisitos, parâmetros e métricas referentes ao estudo de redes de comunicação, assim como protocolos e conceitos de infraestrutura.

No quinto capítulo é apresentado o funcionamento da microrrede CC implementada neste trabalho, onde sua modelagem é abordada de forma sucinta. Em seguida são destacados o princípio de funcionamento do controle secundário proposto e a aplicação da arquitetura da rede de comunicação implementada via simulação computacional.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos via simulação computacional e experimentais, sendo mostrados os resultados para diversas condições de operação da microrrede CC em três diferentes cenários. Também serão explorados os desafios de se estabelecer o sistema de comunicação.

Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões obtidas deste trabalho e as propostas de continuidade.

CAPÍTULO 2 – MICRORREDES

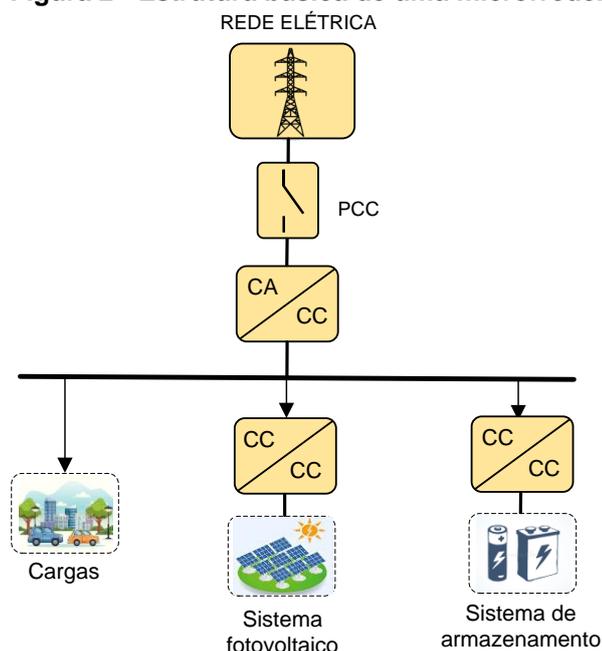
Este capítulo se dedica ao estudo do estado da arte referente às microrredes, com foco no controle secundário de microrredes CC interconectadas à rede elétrica. Inicialmente serão conceituadas as categorizações para as microrredes CC. Por fim, serão apresentadas as principais estratégias de controle em microrredes CC.

2.1 MICRORREDES CC

A transição energética mundial se faz cada mais relevante não só para o equilíbrio ecológico mundial, mas como também para todos os aspectos da sociedade atual: social, econômico, político, ambiental, dentre outros (QIAO; YIN, 2021). De acordo com esse cenário, a União Europeia em 2021 registraram a maior participação na produção de FERs (37,5%). Ainda, deste valor, 52,6% eram representadas pelas energias solar e eólica (EUROSTAT, 2021). Esse crescimento do uso de FERs faz levantar algumas questões relacionados a incorporação dessas fontes de energias alternativas no SEP. Neste sentido, as microrredes surgem como uma abordagem promissora em relação a geração local.

A Figura 2 apresenta uma estrutura genérica de uma microrrede CC. Durante perturbações ou mesmo intencionalmente, estas podem se desconectar do sistema principal e operar autonomamente por meio da geração local, suprindo suas cargas.

Figura 2 - Estrutura básica de uma microrrede.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A evolução das tecnologias de distribuição de energia elétrica tem gerado uma série de questionamentos e debates sobre as arquiteturas mais eficazes e eficientes para os sistemas de microrredes. Tradicionalmente, as arquiteturas de microrrede em CA eram predominantes devido à padronização global da infraestrutura elétrica nesse formato (ABDELGAWAD; SOOD, 2019; KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017). Contudo, à medida que a eletrônica de potência avança rapidamente nas últimas décadas, surge um cenário no qual não apenas a arquitetura das microrredes está sendo reavaliada, mas também o próprio paradigma de operação em CA (MOHAMMED et al., 2019).

Nesse contexto, a distribuição em CC emerge como uma alternativa promissora e vantajosa em diversos cenários. A expansão das energias renováveis, como a solar e a eólica, cujas fontes apresentam um estágio de energia CC, é um dos principais impulsionadores dessa tendência. Ao adotar uma abordagem de distribuição em CC, torna-se possível evitar as conversões frequentes entre corrente alternada e corrente contínua, simplificando assim a integração dessas fontes na microrrede (FOTOPOULOU et al., 2021).

Além disso, a escolha entre o barramento CC em contrapartida ao CA para microrredes tem como maior justificativa a eficiência de incorporar fontes de energia e outros equipamentos que já operam em CC. Com essa mudança de concepção, as microrredes CC ganharam popularidade recentemente, pois conforme já mencionado, a disponibilidade de fontes de energia renováveis e a redução dos estágios de conversão oportunizam a integração dos recursos energéticos distribuídos (RED) (HUNT; SHUTTLEWORTH, 1996) de forma mais eficiente (POURBEIK; KUNDUR; TAYLOR, 2006).

Em decorrência disso, a QEE pode ser aprimorada, uma vez que as fontes de energia renovável são mais eficientes em sistemas CC do que em sistemas CA. Outro ponto relevante é a eliminação da necessidade do uso de transformadores, uma vez que os conversores estáticos operam em diversos níveis de tensão, reduzindo o tamanho do sistema em comparação ao uso de corrente alternada (KAKIGANO et al., 2010).

À vista disso, a concepção das microrredes CC apresenta-se como uma alternativa para agregar FERs localmente, de maneira a aumentar a confiabilidade, eficiência e a QEE. Entretanto, ainda existem entraves relacionados à implantação de microrredes CC, como sua padronização, regulamentação e operação. A superação desses desafios será fundamental para a consolidação e adoção ampla das

microrredes CC como uma solução viável e eficiente para a distribuição de energia elétrica.

2.2 TOPOLOGIAS DE MICRORREDES CC

A seleção da topologia de uma microrrede em corrente contínua revela-se de notável importância, uma vez que os atributos pertinentes podem mudar de acordo com a configuração adotada. Esses determinantes abarcam uma série de fatores, conforme elencado por Hossain et al. (2019):

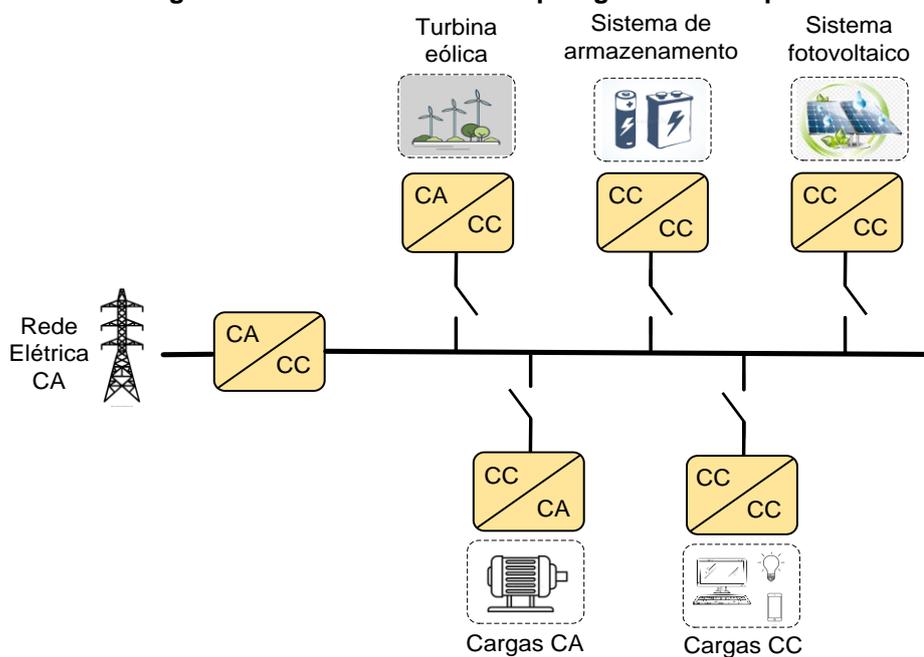
- Flexibilidade – capacidade de adicionar dispositivos de acordo com a necessidade do sistema;
- Eficiência e confiabilidade – possibilidade de agregar dispositivos de geração renováveis, de maneira a minimizar as perdas na transmissão e possibilitar a transição de modo de operação (conectado e ilhado) em situação atípica de perturbações;
- Escalabilidade – agregar dispositivos sem sobrecarregar o sistema;
- Redundância – capacidade de adicionar fontes de alimentação sem a necessidade de comunicação entre os geradores.

Nesse sentido, emerge uma multiplicidade de abordagens para categorizar as topologias das microrredes em corrente contínua. Uma dessas abordagens repousa na distinção com base na construção e na forma como se conectam à rede elétrica (DRAGIČEVIĆ et al., 2016). A presente exposição elucida as principais topologias de microrredes CC amplamente discutidas na literatura:

- Topologia radial simples: As configurações radiais englobam a adoção de um único barramento CC, como exposto por Kumar et al. (2019). Constituída por uma estrutura compreensiva que incorpora GDs e SAE, conectados ao referido barramento por meio de unidades conversoras de interface, assim como as cargas, conforme ilustrado na Figura 3. Os méritos dessa configuração repousam na simplicidade subjacente ao seu regime de controle de fluxo de energia. Não obstante, uma vez que apenas um barramento está envolvido, em caso de uma eventual falha, o risco associado à interrupção no fornecimento de energia às carga

poderá prevalecer, desencadeando uma diminuição da confiabilidade da microrrede (PRABHALA et al., 2018).

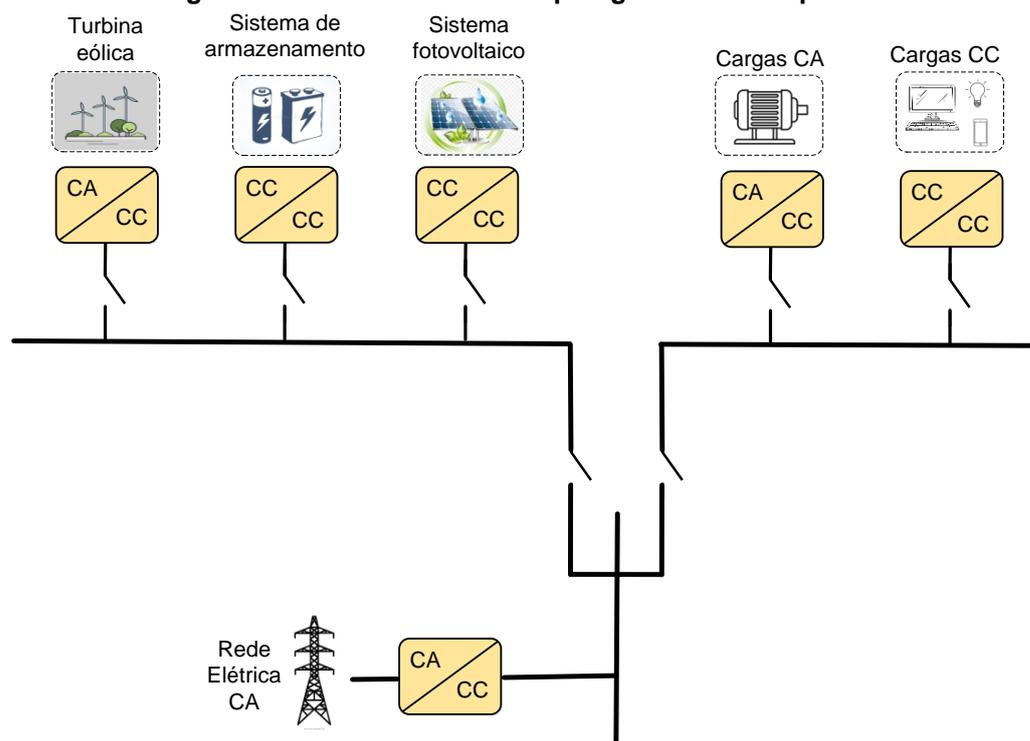
Figura 3 - Microrrede CC em topologia radial simples.



Fonte: Autoria Própria (2023).

- Topologia radial múltipla: Diferente da topologia radial simples que possui um único barramento, a configuração radial múltipla possui mais que um, como pode ser visto na Figura 4. Esta configuração de microrrede CC tem o intuito de proporcionar uma maior confiabilidade, flexibilidade e ainda condicionar escalabilidade ao sistema (KUMAR AGARWAL; AGARWAL, 2019). A perspectiva que permeia tal configuração decorre da incorporação de múltiplos barramentos, proporcionando um compartilhamento mais eficaz de energia. Sob esse arranjo, no caso de um contratempo em um dos barramentos, o funcionamento global do sistema não é comprometido (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017), conforme disposto na Figura 4.

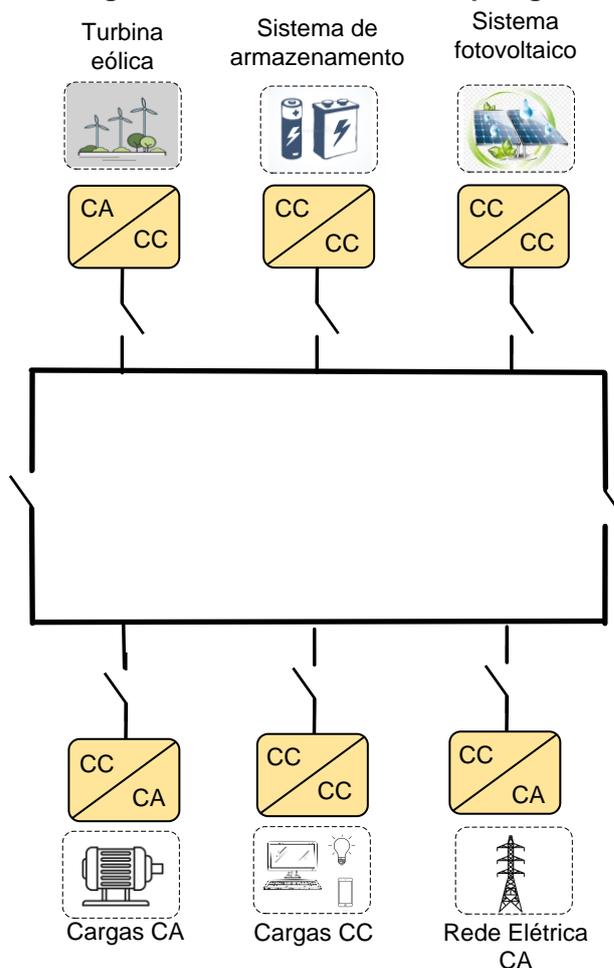
Figura 4 - Microrrede CC em topologia radial múltiplas.



Fonte: Autoria Própria (2023).

- Topologia anel: A estrutura apresentada na Figura 5 apresenta uma microrrede CC de topologia em anel. Como pode ser visto, a topologia possibilita a reconfiguração das conexões por meio do controle de um dispositivo de proteção. Essa estrutura apresenta maior flexibilidade por possuir a capacidade de possibilitar estratégias para conexão das fontes e cargas em diferentes casos de alteração da condição do sistema, como uma possível condição de falha por exemplo: há a possibilidade de isolar a falha e ter outros caminhos para o fluxo de energia, preservando a operação do sistema. Devido a isso, esta se caracteriza por ser uma topologia de maior complexidade em relação às topologias radiais (DOU; ZHENG; GUERRERO, 2017). Além disso, esta estrutura tende a ser economicamente menos viável devido ao cabeamento necessário para dispor desses caminhos alternativos (PRABHALA et al., 2018).

Figura 5 - Microrrede CC em topologia anel.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

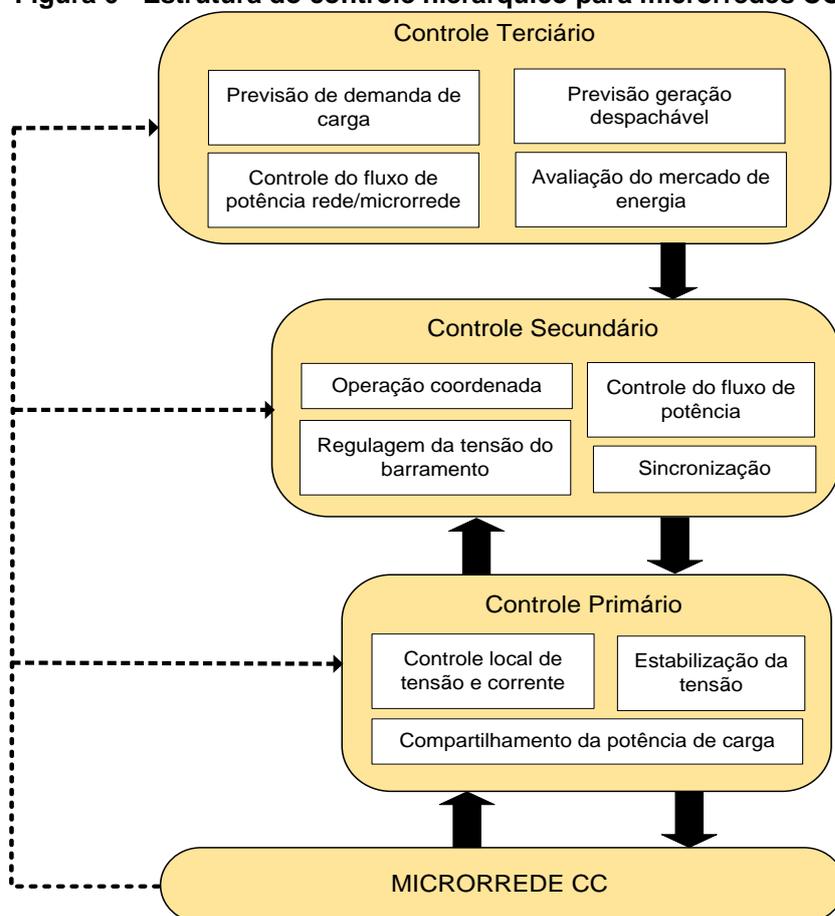
2.3 CONTROLE HIERÁRQUICO

A adoção de uma estrutura hierárquica de controle à microrrede apresenta um atrativo ao garantir uma operação estável e eficaz. Essa abordagem deve ser capaz de habilitar, de maneira apropriada, o compartilhamento eficiente de carga entre as fontes geradoras. Isso é alcançado por meio do ajuste preciso da corrente consumida ou injetada por seus respectivos conversores de interface, ao mesmo tempo em que suprime desvios de tensão, promovendo um nível elevado de modularidade no sistema (SAKKAS, 2018).

Do exposto, pode-se então deduzir que o controle da microrrede deve ser abordado como um processo envolvendo vários níveis, onde cada nível é responsável por abordar e solucionar desafios associados ao controle da microrrede. Isso resulta em um esquema de controle hierárquico, onde pode-se destacar três níveis

hierárquicos de controle, conforme disposto pela Figura 6 (JUSTO et al, 2013; GULIN, 2012).

Figura 6 - Estrutura do controle hierárquico para microrredes CC



Fonte: Autoria Própria (2023).

De acordo com a Figura 6, cada nível de controle da microrrede pode ser caracterizado por:

- Controle primário: responsável por regular os parâmetros locais de potência, tensão e corrente através dos controladores de interface, e tem como objetivo alcançar o compartilhamento eficiente de carga. Essa implementação do controle local compreende as malhas internas de controle de tensão e corrente dos conversores estáticos.
- Controle secundário: responsável por suprimir os desvios de tensão e ajuste do compartilhamento de potência/corrente;
- Controle terciário: responsável pela troca de fluxo de energia com outras redes externas, como a rede elétrica CA. Também desempenha a função de serviços de otimização e operação econômica, assim como análise de tarifações de mercado de energia e negociação de fluxo de potência entre a microrrede CC e a rede elétrica da concessionária.

Nos tópicos subsequentes, esses níveis de controle serão apresentados e discutidos mais detalhadamente.

2.3.1 Controle em nível primário

O nível de controle primário é o responsável pelo controle local, isso porque sua responsabilidade é manter a tensão no barramento CC controlada e estabelecer o compartilhamento da corrente/potência de carga entre os conversores da microrrede. Neste nível de controle, o tempo de resposta é suficientemente rápido em caso de oscilação de carga e/ou geração (PALIZBAN; KAUHANIEMI, 2015).

Este primeiro nível de controle pode ser aplicado de acordo com as condições da microrrede, como: tipo de conversor e do recurso energético empregado, o modo de operação (interconectada ou ilhada) e o *status* de demanda da carga. Sendo assim, o controle primário realiza o gerenciamento da potência por meio das malhas de controle de tensão e corrente dos conversores CC/CC e CA/CC da microrrede (CARVALHO, 2019).

Os conversores de uma microrrede podem atuar basicamente de dois modos, ou seja, nos modos tensão ou corrente. Quando controlados em modo tensão estes operam similar a uma fonte de tensão controlável e contribuem na manutenção da tensão do barramento CC (GAO et al., 2019). Já quando são controlados em modo corrente, eles se comportam como fonte de corrente controlável, injetando potência na microrrede.

O controle destes conversores pode ser implementado com o emprego do compensador proporcional-integral (PI), frequentemente utilizado devido a sua simplicidade, popularidade e baixo esforço computacional (DRAGIČEVIĆ et al., 2016).

Em relação à regulação de tensão do barramento CC da microrredes, a implementação da estratégia de controle para o compartilhamento de corrente/carga é feita por meio das abordagens citadas na Seção 2.4.1. Devido às questões de custo e estabilidade, o controle primário é comumente realizado com a abordagem de controle descentralizado (PALIZBAN; KAUHANIEMI, 2015).

O controle por *droop* destaca-se como uma das principais abordagens para realizar o compartilhamento de potência, e grande parte dos trabalhos abordados na literatura fazem seu uso no controle primário (LI; SHAHIDEHPOUR, 2017; SAHOO; SINHA; KISHORE, 2017; DRAGIČEVIĆ et al., 2016; SHAFIEE et al., 2014; GUERRERO et al., 2011).

O princípio deste controle se baseia em inserir impedâncias virtuais na saída dos conversores controlados em modo tensão, por meio de uma malha de controle, de modo a obter um compartilhamento proporcional de corrente entre cada conversor conectado à microrrede (DRAGIČEVIĆ et al., 2016).

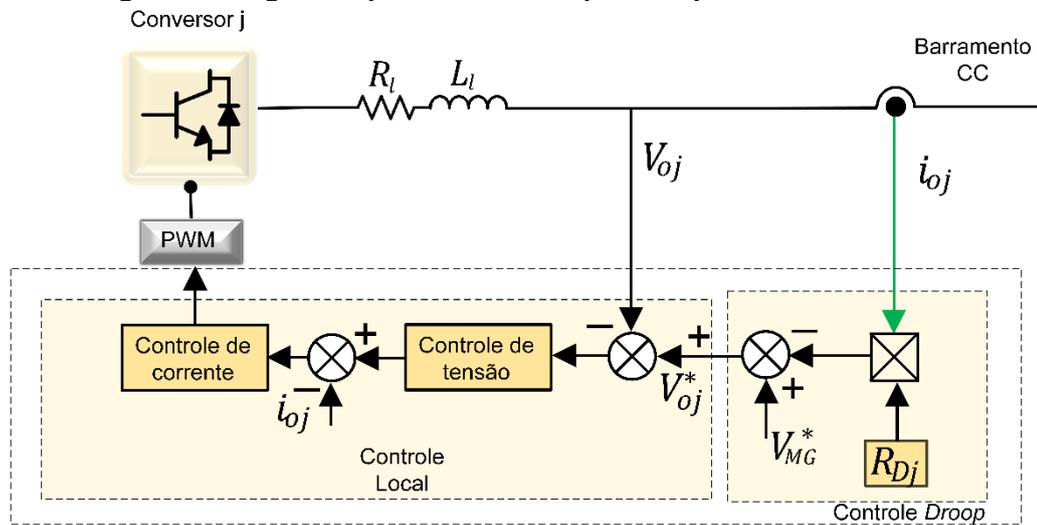
O controle por *droop* é implementado para interferir na alteração da tensão de referência do controlador local do conversor, como segue:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* - R_{Dj} i_{oj} \quad (1)$$

onde V_{oj}^* é a referência de tensão para o controle local do conversor j da microrrede, R_{Dj} é a resistência virtual de *droop*, denominado coeficiente de *droop*, i_{oj} é a corrente de saída do conversor j , e por fim V_{MG}^* é a tensão nominal de referência do barramento CC.

Tomando como base a Equação (1), o conceito da emulação da impedância virtual na saída do conversor, por meio da malha de controle, está ilustrado na Figura 10.

Figura 7 - Diagrama típico do controle por *droop* em um conversor CC/CC.

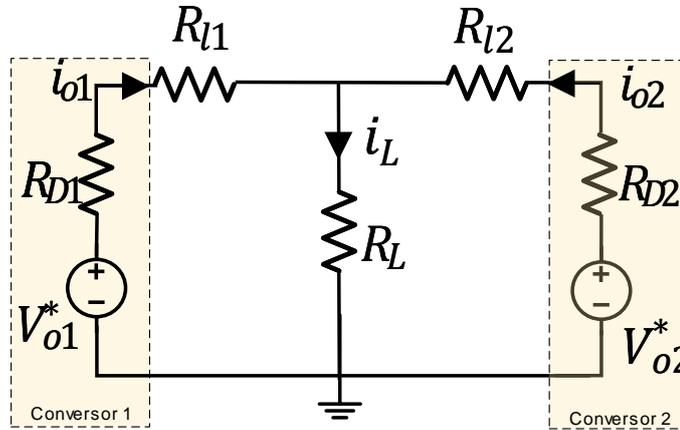


Fonte: Autoria Própria (2023).

O conceito de compartilhamento pode ser exemplificado pelo circuito de Thevenin, como está representado na Figura 11. Como pode ser visualizado, há a representação de dois conversores operando em paralelo, compartilhando a carga R_L em que V_{o1}^* e V_{o2}^* são as tensões nominais de dois conversores, R_{D1} e R_{D2} são os seus respectivos coeficientes de *droop*, i_{o1} e i_{o2} as correntes de saída dos conversores e

R_{l1} e R_{l2} são as resistências de linha. Para fins de análise no modelo simplificado, as indutâncias de linha não serão consideradas

Figura 8 - Circuito Equivalente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Assim, a corrente que flui na carga i_L pode ser representada pela Equação (2).

$$i_L = i_{o1} + i_{o2} \quad (2)$$

onde:

$$i_{o1} = \frac{(V_{o1}^* - V_{o2}^*)}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} + \frac{(R_{D2} + R_{l2})}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} i_L \quad (3)$$

$$i_{o2} = \frac{(V_{o2}^* - V_{o1}^*)}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} + \frac{(R_{D1} + R_{l1})}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} i_L \quad (4)$$

Realizando algumas manipulações matemáticas nas Equações (3) e (4), obtêm-se:

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{(R_{D2} + R_{l2})}{(R_{D1} + R_{l1})} \quad (5)$$

$$\Delta i_o = i_{o1} - i_{o2} = \frac{2(V_{o1}^* - V_{o2}^*)}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} + \frac{(R_{D1} - R_{D2}) + (R_{l1} - R_{l2})}{(R_{D1} + R_{D2} + R_{l1} + R_{l2})} \quad (6)$$

Desta forma, pela Equação (6), é possível verificar que a diferença entre as correntes dos conversores, representada por Δi_o , é diretamente proporcional à diferença de tensão entre as fontes V_{o1}^* e V_{o2}^* . Além disso, é importante destacar que

essa diferença também é afetada pelas resistências que são inseridas na saída de cada conversor, bem como pelas resistências nas linhas de conexão.

Assumindo que os conversores têm o mesmo valor de resistência de *droop*, ou seja, $R_{D1} = R_{D2}$, estas podem ser determinadas admitindo um valor de desvio máximo, como segue:

$$R_{Dj} \leq \frac{\Delta V_{MGm\acute{a}x}}{i_{ojm\acute{a}x}} \quad (7)$$

Onde $\Delta V_{MGm\acute{a}x}$ representa o desvio máximo de tensão e $i_{ojm\acute{a}x}$ é a corrente máxima de saída do conversor j .

2.3.2 Controle em nível secundário

Da discussão anterior, o controle por *droop* introduz um desvio de tensão quando a estratégia de compartilhamento de corrente/potência é implementada. Para resolver este problema, o controle secundário deve ser empregado para restaurar a tensão com a finalidade de garantir a operação estável sob diferentes condições de carga e modos de operação em uma microrrede. No capítulo 3 será abordado de forma detalhada o conceito e as técnicas de implementação no controle secundário.

2.3.3 Controle em nível terciário

O controle terciário possui a finalidade de gerenciar o fluxo de potência entre a microrrede e os requisitos do Ponto de Acoplamento Comum (PAC) solicitados pela concessionária (PARHIZI et al., 2015). Assim, é conhecido como o nível de supervisão com respostas mais lentas. Das suas responsabilidades, deve atuar para garantir a resposta da microrrede de modo a alterar ou redistribuir o despacho diante de distúrbios de variações de demandas por meio das FERs ou de cargas controláveis (BROOKS et al., 2010). Em (KUMAR et al, 2019) é apresentado uma revisão da literatura dos métodos de aplicação do controle terciário.

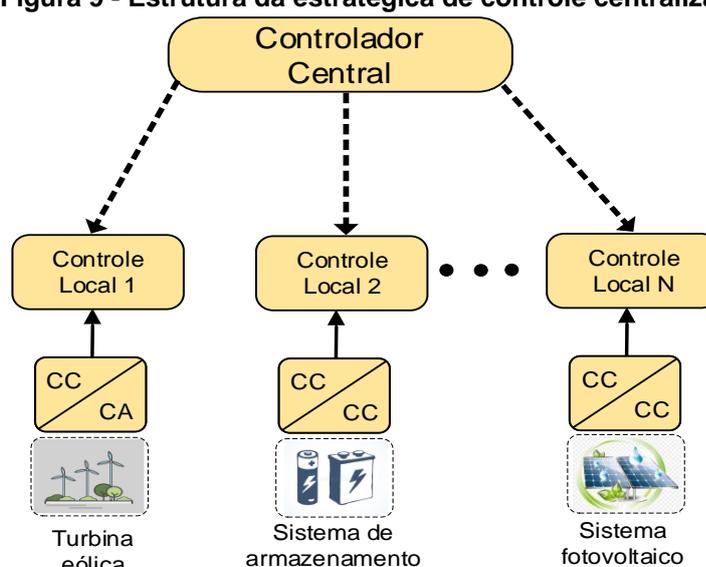
Ainda, o gerenciador de energia tem a capacidade de adotar medidas para aprimorar a QEE e estabilização no PAC. Para alcançar um ou mais desses objetivos na microrrede, o controle terciário é implementado por meio da formulação de problemas de otimização.

2.4 ABORDAGENS DE IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE

As estratégias de controle das microrredes CC podem ser classificadas de acordo com a infraestrutura de comunicação, a saber: centralizadas, descentralizadas e distribuídas. Tais estratégias são discutidos em Rebours e Kirschen (2005) e Altin e Eyimaya (2021) e explanadas a seguir:

- Controle centralizado: As unidades distribuídas são controladas por um controlador central através de canais de comunicação, conforme ilustra a Figura 7. Isso alcança uma operação eficiente e controle no custo de modularidade. Entretanto, este apresenta limitações tais como complexidade em termos de processamento de comunicação e alto custo, pois requer um computador central de alto desempenho, o qual é suscetível a falha de comunicação (GUERRERO et al, 2011).

Figura 9 - Estrutura da estratégia de controle centralizada.

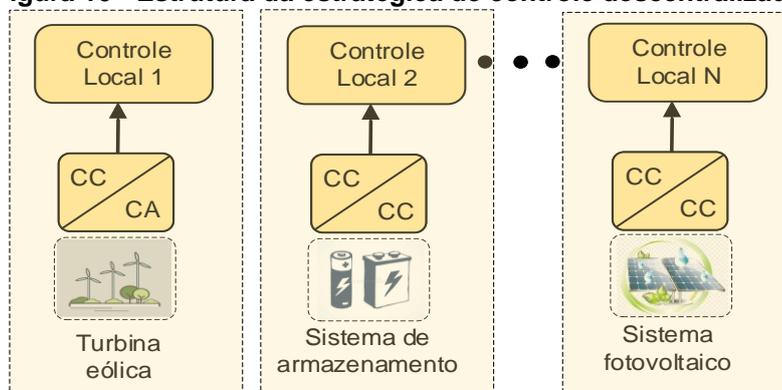


Fonte: Autoria Própria (2023).

- Controle descentralizado: As unidades da microrrede CC são controladas independentes, tendo como base as variáveis localmente disponíveis, ou seja, sem nenhum canal de comunicação. Nesta abordagem, a qual é apresentada pela Figura 8, não há necessidade de comunicação, pois o controle é baseado em medições e dados locais para alcançar o compartilhamento de carga e regulação de tensão entre conversores (YANG et al, 2016; XIA et al, 2016). Um

exemplo deste tipo de controle é o controle por *droop*, também conhecido por controle por decaimento.

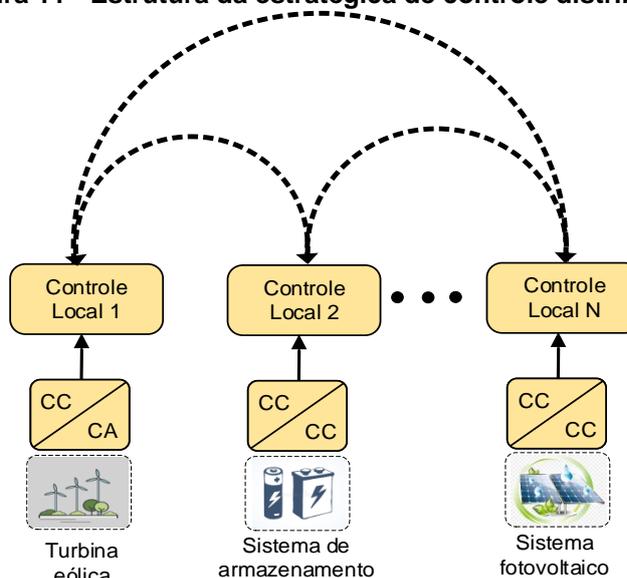
Figura 10 - Estrutura da estratégia de controle descentralizada.



Fonte: Autoria Própria (2023).

- **Controle Distribuído:** Nesta abordagem de controle, os controladores de cada unidade permitem que cada unidade realize a ação de controle com base nas medidas locais, compartilhadas entre as unidades da microrrede por meio do canal de comunicação. A Figura 9 apresenta uma arquitetura referente a esta abordagem (WANG et al., 2016). Além disso, é importante destacar que o controle distribuído pode ser empregado em uma rede esparsa, onde a comunicação ocorre seletivamente, permitindo a troca limitada de informações entre os elementos do sistema, conforme necessário para a eficácia da operação (BIDRAM et al., 2013).

Figura 11 - Estrutura da estratégia de controle distribuída.



Fonte: Autoria Própria (2023).

2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais classificações e categorização de microrredes. Foi abordado o conceito de microrrede CC e suas principais topologias, bem como suas vantagens e desvantagens considerando os fatores que influenciam a escolha da topologia CC adequada para diferentes cenários.

O sistema de controle hierárquico foi abordado na sequência com as abordagens apresentadas na literatura. A partir destes conceitos, iniciou-se a contextualização do controle primário por *droop*. Na sequência, foi iniciada a apresentação do controle secundário. Por fim, foi definida a filosofia do controle de mais alto nível, ou seja, o controle terciário.

CAPÍTULO 3 – CONTROLE EM NÍVEL SECUNDÁRIO

Neste capítulo o foco será dado às técnicas de controle em nível secundário. Sendo assim, são apresentadas as técnicas de controle aplicadas para mitigar os desvios e erros gerados no nível primário de controle.

Além de técnicas para corrigir os desvios de tensão no barramento CC resultantes devido ao controle por *droop*, emergem duas abordagens para aprimorar a distribuição de corrente. A primeira se baseia pelo ajuste dos coeficientes de *droop*, também chamada de *slope adjusting* e a segunda pela adição da correção de tensão, denominado *voltage shifting* (MENG et al., 2016).

Cabe ressaltar que as implementações da estratégia do controle secundário podem ser centralizadas ou distribuídas (GUERRERO et al, 2011; DRAGIČEVIĆ et al, 2014; NASIRIAN et al, 2015; DRAGIČEVIĆ et al, 2014; ANAND et al, 2013). Estas duas abordagens associadas ao compartilhamento de corrente/potência são descritas na sequência.

Por fim, é apresentado o princípio de funcionamento da estratégia de controle secundário proposta.

3.1 DESVIO DE TENSÃO NO BARRAMENTO CC

Como forma de compensar os desvios de tensão no barramento CC, causados pelo controle por *droop* no nível primário, a abordagem descrita por Guerrero et al. (2011) apresenta um controle secundário centralizado. No que lhe concerne, este possui o objetivo de adicionar o termo δV_{oj} na Equação (1) apresentada no Capítulo 2, a qual é reescrita como segue:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (8)$$

Este termo de compensação δV_{oj} é gerado a partir da comparação da tensão medida do barramento CC e a tensão de referência do controle primário. A diferença é empregada no controle primário de todos os conversores. Dessa forma, pela Equação (8), percebe-se que há o deslocamento da tensão de referência da malha de controle de tensão do controle local de cada conversor.

No entanto, o ajuste dos desvios de tensão pode não garantir a mitigação dos erros do compartilhamento de corrente/potência e carga, já que o termo para a compensação de tensão é o mesmo para todos os conversores.

3.2 COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA/CARGA

Como solução para mitigação dos erros do compartilhamento de potência/corrente de carga, pode-se fazer uso de duas técnicas. A primeira é denominada *voltage shifting* e a segunda *slope adjusting*.

3.2.1 Técnica *Voltage Shifting*

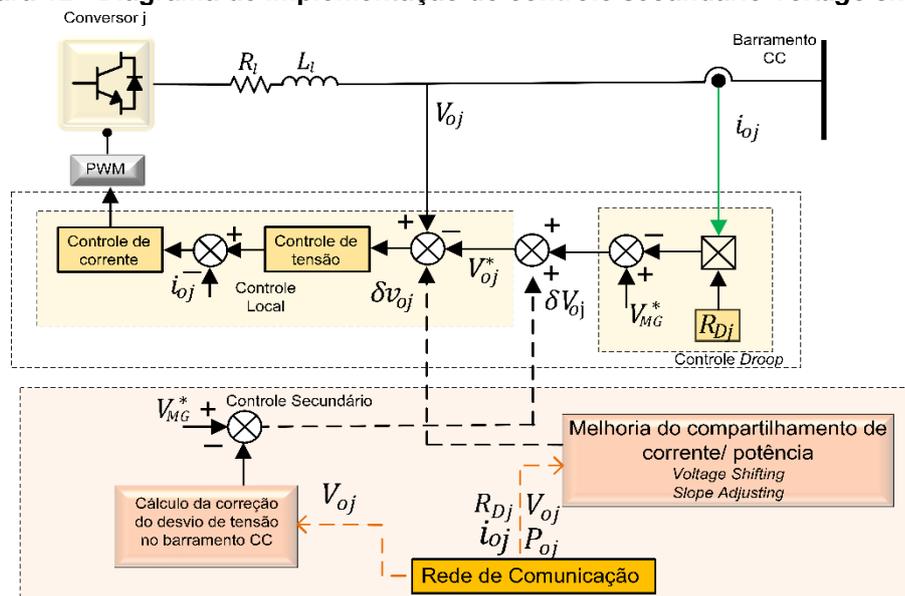
Esta abordagem é baseada na adição de um termo de correção de tensão δv_{oj} que ajusta a referência de tensão do conversor j (MENG et al., 2016), conforme Equação (9).

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{oj} + \delta v_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (9)$$

Esta abordagem, por sua vez, não altera as resistências de saída dos conversores. Sendo assim, o termo δv_{oj} precisa ser constantemente ajustado, mesmo que não ocorra alteração de carga no barramento da microrrede (SILVA, 2020). Isso significa que, mesmo quando a carga permanece a mesma, as características individuais dos conversores, como suas resistências, permanecem inalteradas, a parcela relacionada às diferenças nas resistências permanece inalterada.

A Figura 12 mostra o diagrama de implementação de regulação de tensão do barramento CC, considerando o ajuste do desvio da tensão do barramento CC juntamente com o uso da técnica *voltage shifting*.

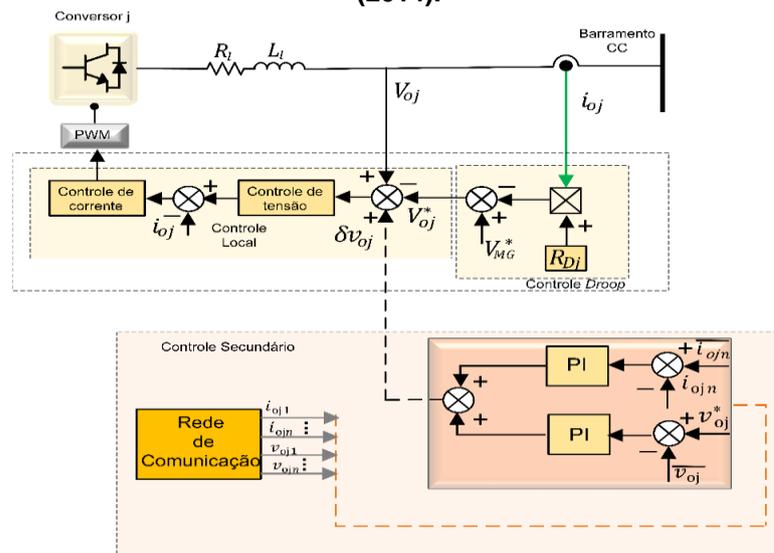
Figura 12 - Diagrama de implementação do controle secundário *voltage shifting*.



Fonte: Autoria Própria (2023).

abordagem *voltage shifting*, tomando como referência tanto a tensão quanto a corrente de saída de cada conversor. Nesse método, ocorre uma otimização simultânea na precisão do compartilhamento de corrente e na restauração da tensão no barramento CC local. O esquema associado ao funcionamento desse processo é representado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama da implementação do controle secundário apresentado em Lu et al., (2014).



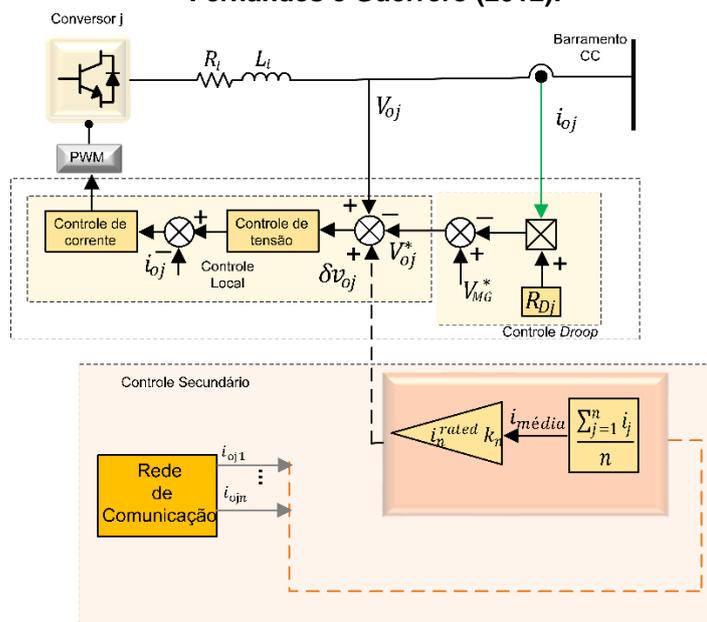
Fonte: Adaptado de Lu et al., (2014).

No estudo conduzido por Anand, Fernandes e Guerrero (2012), a estratégia de controle secundário implementada se fundamenta na interação de informações entre os controladores de cada conversor, a fim de estabelecer o valor médio das correntes fornecidas por esses dispositivos. A partir desse valor médio, realiza-se o cálculo do termo de correção de tensão por meio da abordagem *voltage shifting*, que tem como objetivo aprimorar a distribuição de corrente entre os conversores, conforme mostrado na Figura 15 e representado pela Equação (11) a seguir:

$$V_{oj}^* = V_{MG}^* + \delta V_{OJ} + \frac{\sum_{j=1}^n i_{oj}}{n} i_n^{rated} k_n - R_{Dj} i_{oj} \quad (11)$$

onde, i_j é a corrente do conversor, i_n^{rated} é a corrente nominal do conversor e k_n é um ganho proporcional.

Figura 15 - Diagrama da implementação do controle secundário apresentado em Anand, Fernandes e Guerrero (2012).

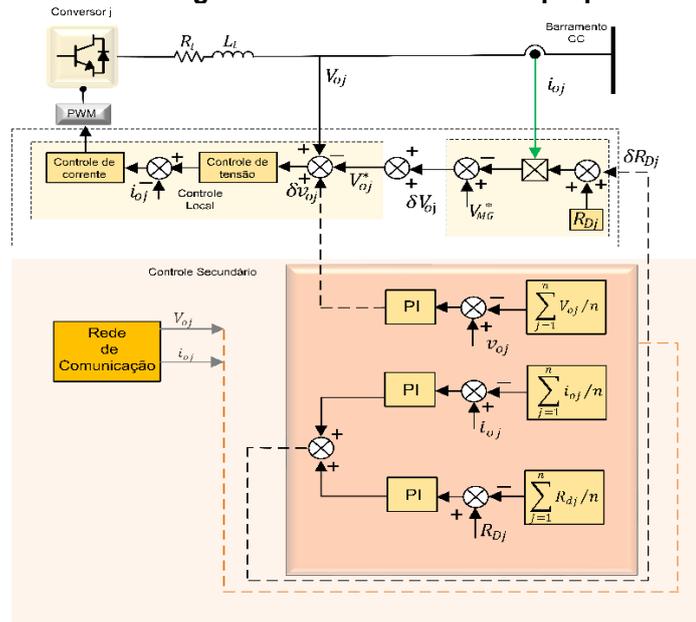


No estudo realizado por Dan e Lee (2018), é introduzida a equalização do estado de carga das baterias (SOC - *State of Charge*) no controle secundário.

Por outro lado, a abordagem empregada por Silva (2020) se baseia no cálculo de ajuste do coeficiente *droop*, que compensa as resistências equivalentes das linhas. Uma vez que a correção da potência compartilhada é alcançada, cada conversor utiliza apenas informações locais para gerar um termo para mitigar o desvio de tensão no barramento CC causado pelo controle *droop*.

No trabalho conduzido por Wang et al. (2016), é proposta a partilha de informações entre os conversores por meio de uma abordagem de controle distribuído. Essa abordagem envolve a troca de informações sobre corrente, tensão e coeficiente *droop* entre os conversores. Nesse contexto, a correção da regulação de tensão e o compartilhamento de corrente são alcançados por meio do cálculo dos valores médios, conforme apresentado na Figura 16.

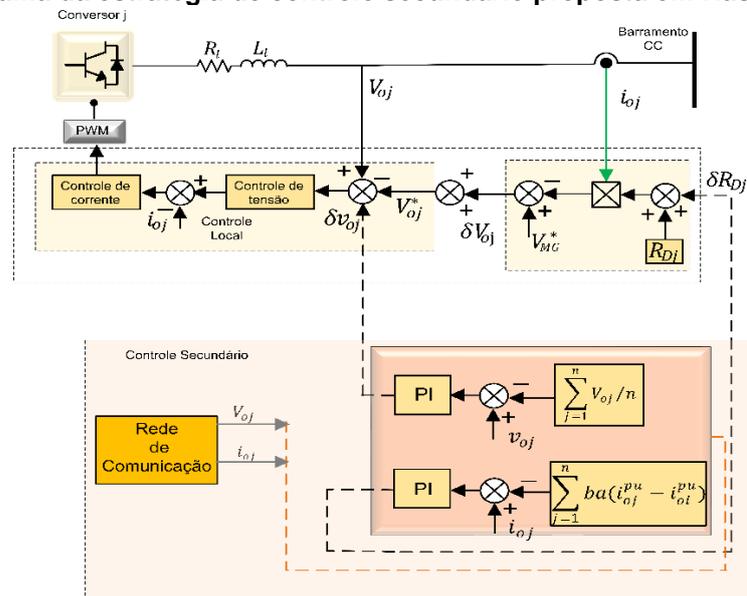
Figura 16 - Diagrama da estratégia de controle secundário proposta em Wang et al. (2016).



Fonte: Autoria Própria (2023).

O controle delineado por Nasirian et al. (2014) emprega um termo de correção de tensão que se fundamenta na média das tensões de saída de todos os conversores. O objetivo subjacente é a minimização dos desvios de tensão entre esses conversores. Além dessa abordagem, o controle também efetua ajustes adaptativos nos coeficientes *droop* de cada conversor. Isso é alcançado calculando a discrepância entre a corrente do conversor local e a média ponderada das correntes dos conversores vizinhos, usando coeficientes de acoplamento apropriados (*ba*). Essa operação é claramente retratada na Figura 17.

Figura 17 - Diagrama da estratégia de controle secundário proposta em Nasirian et al. (2014).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Nessa perspectiva, em Augustine et al. (2016) propõe-se o uso de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) para anular as diferenças entre as correntes normalizadas e os desvios das tensões. Dessa forma, além do ajuste do compartilhamento de corrente, o desvio de tensão também é minimizado em todos os conversores, resultado na mesma tensão na saída para todos os conversores.

Muitos trabalhos apresentados na literatura propõem a aplicação de estratégias baseadas em sistemas multiagentes (SMAs). Em Wooldridge (2009) é apresentado o conceito de SMA como um sistema composto por uma gama de agentes, *softwares* e/ou *hardwares* distribuídos, os quais possuem objetivos específicos que interagem uns com os outros permitindo a decomposição de sistemas em componentes de comunicação reutilizáveis, redistribuíveis e independentes, capacitados a serem modulares, cooperativos, autônomos, flexíveis e manipuláveis em relação às fontes de dados (MORADI et al, 2016).

Nesta linha de estratégias envolvendo SMA, estão inseridos os algoritmos de consenso, como em Zaery et al. (2017), que apresenta o controle distribuído baseado em SMA aplicado em uma rede de comunicação esparsa, a fim de solucionar a questão de despacho econômico em uma microrrede. Nesta abordagem, o ajuste da correção de tensão é realizado através das medições locais de tensão dos conversores vizinhos. Ainda, o ajuste da resistência de *droop* é computado no custo atrelado ao nível terciário.

Nesta tendência, em Meng et al. (2016) é empregado um algoritmo de consenso de maneira a atingir a média das tensões e correntes de saída dos conversores por meio da abordagem *voltage shifting*. Já em Vu et al. (2017) é apresentado o controle por *droop* adaptativo com base nos valores médios das variáveis de tensão e corrente dos conversores vizinhos e assim gerar um valor que, ao adicionado à resistência de *droop*, promove ajustes, durante o compartilhamento de corrente e regulação da tensão do barramento CC.

A vista disso, Gao (2019) apresenta uma revisão geral sobre as técnicas referentes ao controle secundário distribuído em microrredes CC. Já em Silva (2020) é apresentada uma comparação das técnicas de controle em nível secundário. A Tabela 1 sumariza as principais características e métodos de avaliação das propostas apresentadas na literatura e citadas neste trabalho.

Tabela 1 - Comparação do controle secundário da microrrede CC.

Proposta	Informação compartilhada	Comunicação entre os conversores	Correção do compartilhamento de corrente/ potência	Restauração de tensão
Lu et al., (2014)	Corrente e Tensão	Todos	Voltage Shifting	Distribuído
Dam and Lee, (2018)	Tensão e Potência	Todos	Voltage Shifting	Distribuído
Wang et al., (2018)	Tensão e Termo de Compensação	Vizinhos	Voltage Shifting	Distribuído
Sahoo and Mishra, (2019)	Tensão, Tensão Dinâmica Média e Corrente	Todos	Droop Adjustment	Distribuído
Wang et al. (2016)	Tensão, corrente e coeficiente de droop	Todos	Droop Adjustment	Distribuído
Meng et al. (2016)	Tensão e Corrente	Vizinhos	Voltage Shifting	Distribuído
Silva (2020)	Potência	Vizinhos	Droop Adjustment	Descentralizado
Nasirian et al. (2014)	Corrente e Tensão	Todos	Droop Adjustment	Distribuído
Augustine et al. (2016)	Corrente e Tensão	Todos	Droop Adjustment	-
Zaery et al. (2017)	Corrente e Tensão	Vizinhos	Droop Adjustment	Distribuído
Anand, Fernandes e Guerrero (2012)	Corrente	Todos	Voltage Shifting	-
Proposta (2023)	Potência e Tensão	Vizinhos	Droop Adjustment	Distribuído

Fonte: Autoria Própria (2023).

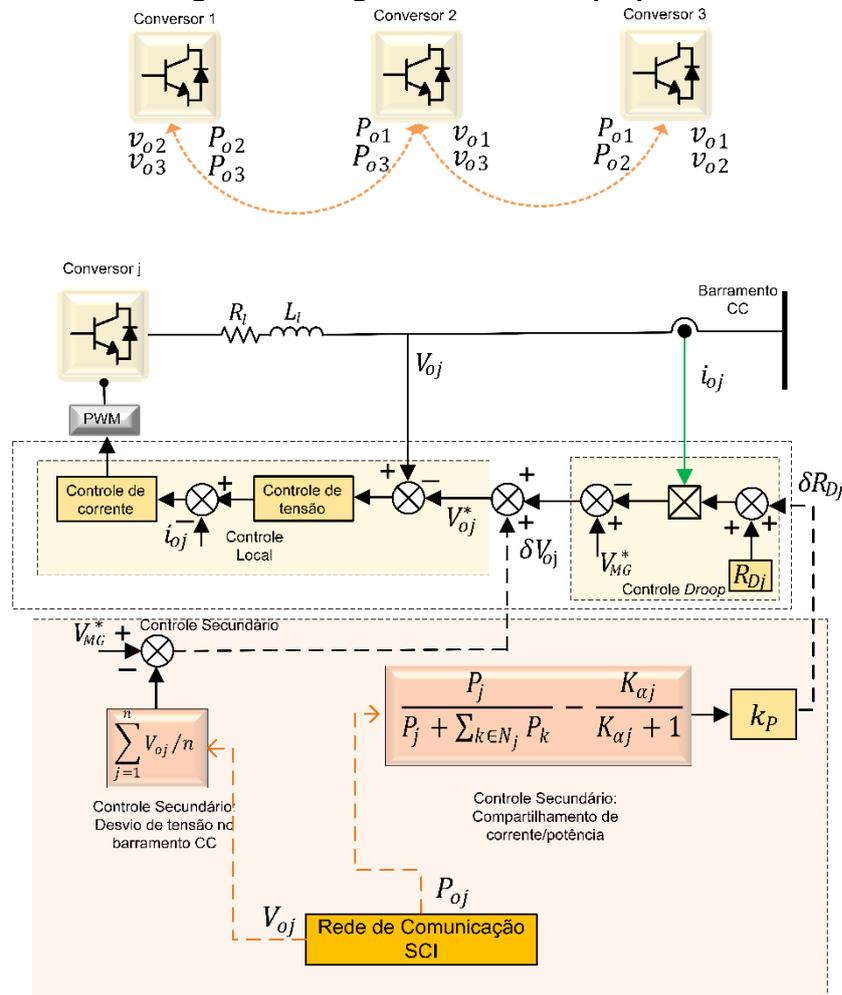
3.4 DESENVOLVIMENTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SECUNDÁRIO

Dento do contexto estudado até aqui, a estratégia de controle a ser empregada no nível secundário será a distribuída, para o melhor compartilhamento de potência entre os conversores e correção do desvio de tensão no barramento CC da microrrede.

Diante dessas circunstâncias, a troca de informações de potência/tensão acontece somente entre conversores vizinhos, ou seja, a partir das informações compartilhadas será realizado o cálculo para o ajuste dos coeficientes de *droop* e correção de desvios de tensão do barramento CC.

O trabalho propõe o controle secundário como disposto na Figura 18. A inovação nesta estratégia de compartilhamento de corrente/potência está em sua capacidade de atingir a proporção definida para cada conversor formador dentro da microrrede. Isso é alcançado por meio da troca exclusiva de informações relacionadas à potência de saída dos conversores. Essa abordagem representa um marco significativo, uma vez que não apenas prioriza a eficaz gestão da potência, mas também assegura a alocação precisa de recursos elétricos, mantendo o equilíbrio desejado entre os conversores formadores da microrrede.

Figura 18 - Diagrama do controle proposto.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.4.1 Princípio de funcionamento do controle proposto para o compartilhamento de corrente/potência

No método proposto, busca-se ajustar a potência de cada conversor conectado ao barramento CC da microrrede para alcançar um compartilhamento proporcional de potência. Para isso, é estabelecida uma comunicação entre os

conversores vizinhos por meio de uma rede de comunicação, permitindo o compartilhamento da potência entre eles. Com base nessa comunicação, realiza-se o cálculo para o ajuste do coeficiente de *droop*.

Nessa configuração, cada conversor "*j*" que compartilha o barramento CC se comunica com o conversor vizinho "*k*", trocando informações sobre a potência e tensão de saída do conversor em cada ciclo de amostragem.

O objetivo desse método é ajustar o coeficiente *droop* para o conversor "*j*" de acordo com a Equação (12). Com base na diferença entre a porção da potência produzida pelo conversor *j* em relação à soma das potências ativas dos conversores vizinhos com o ajuste da porção de potência do conversor *j* com o desejado, alocando a potência $P_{j_{atual}} = K_{\alpha_j} P_T$.

$$\delta R_{Dj} = K_P \left(\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} - \frac{K_{\alpha_j} P_T}{K_{\alpha_j} P_T + P_T} \right) \quad (12)$$

onde, P_j e P_k são as respectivas potências de saída dos conversores "*j*" e "*k*", P_T é a potência total, ou seja, a soma das potências de saída dos conversores, δR_{Dj} é o ajuste da resistência de *droop* do conversor "*j*". Já K_P é um ganho de ajuste de tempo do compartilhamento de potência. Uma vez que K_{α_j} é uma variável de alocação da potência do conversor "*j*", esta é calculada e se situa entre 0 e $n/(n+1)$, onde n é o número de conversores formadores de rede.

A partir de (12) é possível atribuir uma variável α_j , definida como:

$$\alpha_j = \frac{K_{\alpha_j} P_T}{K_{\alpha_j} P_T + P_T} \quad (13)$$

Realizando as manipulações matemáticas, α_j pode ser encontrada como:

$$\alpha_j = \frac{K_{\alpha_j}}{K_{\alpha_j} + 1} \quad (14)$$

onde, o termo α_j é denominado fator de alocação de potência e descreve a proporção da potência gerada pelo conversor "*j*" em relação à potência total compartilhada entre o conversor "*j*" e seus vizinhos, considerando o ajuste específico determinado pelo parâmetro K_{α_j} .

Retornando a Equação (12) inicial, δR_{Dj} pode ser redefinido como:

$$\delta R_{Dj} = K_P \left(\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} - \frac{K_{\alpha j}}{K_{\alpha j} + 1} \right) \quad (15)$$

Sendo assim, a estratégia de controle proposta irá atingir a convergência, quando o equilíbrio do valor desejado for:

$$\frac{P_j}{P_j + \sum_{k \in N_j} P_k} = \frac{K_{\alpha j}}{K_{\alpha j} + 1} \quad (16)$$

3.4.2 Controle dos desvios de tensão do barramento CC

De acordo com o conceito apresentado na seção 3.1, a correção dos desvios de tensão do barramento CC é alcançada através da adição de um termo de compensação à referência de tensão do referido barramento.

No âmbito deste estudo, a abordagem empregada envolve a comparação entre a referência de tensão do barramento CC e a média das tensões de saída dos conversores vizinhos conectados ao mesmo barramento. Essa comparação resulta na geração de um termo de compensação denotado como δV_{oj} . Assim, o termo δV_{oj} pode ser matematicamente definido por:

$$\delta V_{oj} = V_{MG}^* - \sum_{j=1}^n \left(V_{oj} / n \right) \quad (17)$$

onde n representa o número de conversores que compõem a microrrede CC.

A equação que modela essa abordagem é expressa da seguinte forma:

$$V_{oj}^* = V_{cc}^* + \delta V_{oj} - R_{Dj} i_{oj} \quad (18)$$

Essa abordagem de cálculo do termo de compensação δV_{oj} contribui para a correção eficaz do desvio de tensão no barramento CC, garantindo a operação estável e balanceada dos conversores na microrrede.

3.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram abordadas duas técnicas distintas para a implementação do controle secundário, enriquecidas pela contextualização dos trabalhos de pesquisa relacionados aos temas específicos abordados nesta dissertação. Foram exploradas em detalhes as principais abordagens empregadas para abordar a correção de desvios de tensão no barramento CC e o compartilhamento de corrente/potência em uma microrrede CC, por meio da atuação do controle secundário.

As técnicas apresentadas até este ponto destacam a importância da pesquisa contínua para preencher as lacunas identificadas nas técnicas de controle secundário e na implementação de estratégias distribuídas e centralizadas. Diante dessa investigação, a técnica proposta para o compartilhamento de corrente/ potência visa promover um equilíbrio ideal entre os conversores formadores na rede, garantindo uma alocação precisa e eficiente dos recursos elétricos por meio da simples troca de informações de potência.

CAPÍTULO 4 – REDES DE COMUNICAÇÃO

Atualmente, os equipamentos que compõem uma microrrede não requerem apenas trocas de informações uns com os outros, mas também controle, monitoramento e diagnóstico de falhas com muito mais rapidez e confiabilidade. Apesar dos benefícios das novas tecnologias, eles são adaptados para satisfazer requisitos específicos e, portanto, eles só podem ser usados para determinadas aplicações.

A comunicação do controle hierárquico apresenta requisitos específicos de computação e latência para cada camada de comunicação da microrrede. Para atender a esses requisitos, cada camada deve usar diferentes equipamentos e protocolos. Nesse sentido, este capítulo fornece uma visão sobre os principais protocolos de comunicação e requisitos, arquitetura do sistema, padrões e ferramentas usadas em comunicação de microrredes CC (KUMAR; ISLAM; JOLFAEI, 2019).

4.1 REQUISITOS E PARÂMETROS DE COMUNICAÇÃO

Os aspectos de comunicação de uma microrrede desempenham um importante papel, isso porque operacionalizam simultaneamente diversas tarefas em tempo real. Essas tarefas, como prestação de serviços à rede elétrica principal, requerem um *feedback* quase que instantâneo de injeção/consumo de potência. Além disso, a tarefa de transição de modo ilhado e interconectado torna a comunicação ainda mais desafiadora (VOUMICK; DEB; KHAN, 2021).

Na mesma linha, estes aspectos podem ser descritos como segue:

- Tipo e configuração dos equipamentos (FER, SAE, cargas) que compõem o sistema. Neste caso, tempos de respostas diferentes e, conseqüentemente, diferentes larguras de banda dos canais são exigidas;
- Taxa de transmissão de dados, o qual define a velocidade com que os dados são transmitidos na microrrede. Geralmente é medido em bits por segundo (bps);
- Quantidade de dispositivos e alocação física determinam o tipo de conexão, volume de dados transmitidos e custos de manutenção do sistema de comunicação;

- Abordagens de implementação de controle, sistema de comunicação centralizado, descentralizado ou distribuído;
- Protocolo de comunicação, o qual define as regras para a comunicação entre dispositivos na microrrede;
- Topologia da rede define como os dispositivos estão conectados fisicamente na microrrede. Isso pode afetar a eficiência e confiabilidade da comunicação;
- Latência, a qual é definida como o tempo necessário para que um pacote de dados percorra a rede que conecta um dispositivo a outro. Uma latência baixa é importante para manter a comunicação rápida e eficiente;
- Confiabilidade da comunicação, a qual refere-se à capacidade da microrrede de transmitir e receber dados de forma precisa e consistente, sem perda ou corrupção de dados;
- Largura de banda, a qual descreve a quantidade de informações que podem ser transmitidas em um determinado período através de um canal de comunicação.

Com a finalidade de manter a operação estável e segura da microrrede, o objetivo da rede de comunicação é assegurar desempenho em tempo real e segurança provendo confidencialidade, integridade e disponibilidade, enquanto preserva os limites de tempo. Atender esses requisitos são extremamente necessários e desafiadores, pois o sistema de operação de uma microrrede engloba dispositivos de detecção, sistemas de controle, execução de lógicas de controle que podem agregar atrasos na rede de comunicação (KONDORO et al., 2021).

Outro fator que contribuem para os atendimentos destes requisitos é que há muitos dispositivos de comunicação que não possuem suporte de *hardware* para algoritmos criptográficos e, portanto, não podem utilizar algoritmos de segurança computacionalmente caros (JOLFAEI; KANT, 2017; JOLFAEI; KANT, 2018).

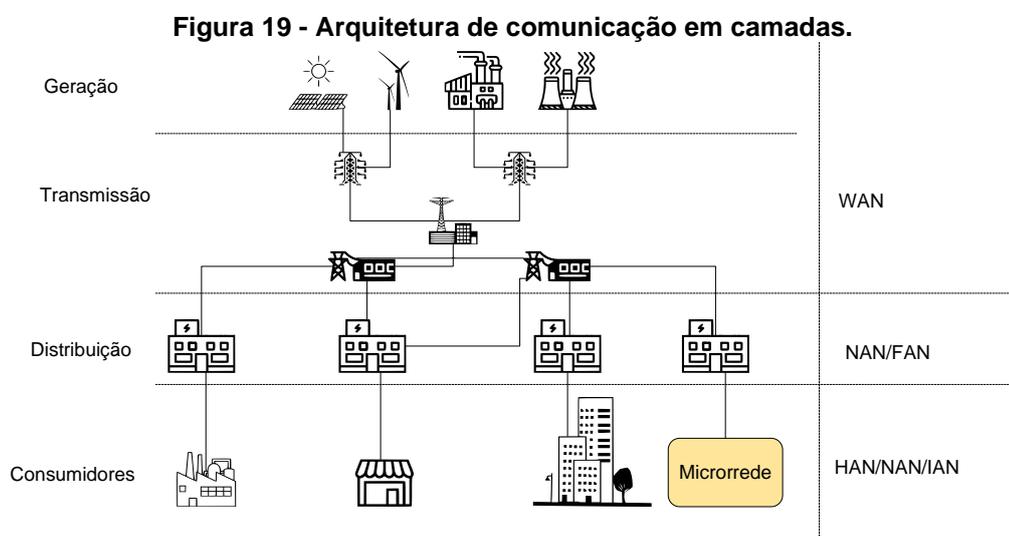
Em caso de um evento de emergência em uma microrrede ser detectado, o caminho do tráfego da informação inicia no acionamento do equipamento de proteção até algum relé próximo, de maneira a evitar falhas generalizadas em cascata. Dessa forma, o envio dessas mensagens de segurança assegura a minimização de harmônicos na rede elétrica, contribuindo para uma operação segura.

No entanto, quando há uma distância para que as mensagens de proteção de segurança sejam enviadas, é necessário um dispositivo intermediário, que pode gerar atraso de processamento adicional. Adicionalmente, o *buffer* pode estar ainda acumulado, podendo ocorrer congestionamento para a chegada da informação.

Na prática, é desafiador garantir que eventos ou perturbações não ocorram e se propaguem pelo sistema quando se utiliza o envio de informações de segurança. Isso ocorre devido ao atraso no envio das informações, que está muito próximo do limite máximo do transiente de energia. A comunicação na microrrede opera com a restrição de tempo, onde os dados precisam ser transmitidos dentro de um período específico. No entanto, essa janela de tempo está muito próxima do limite máximo do transiente de energia, ou seja, o momento crítico quando ocorrem mudanças significativas nos níveis de energia. Isso significa que, se houver algum evento ou perturbação no sistema elétrico que exceda esse limite de tempo, a comunicação pode não ser capaz de prevenir ou mitigar os efeitos desse evento a tempo. Essa proximidade com o limite máximo do transiente de energia torna o sistema vulnerável a emergências que podem afetar a estabilidade e segurança da microrrede (SHUAI, et al., 2016).

4.2 ARQUITETURA DE REDES DE COMUNICAÇÃO

As arquiteturas das redes de comunicação em sistemas de microrrede CC podem ser classificadas nas seguintes categorias com base em seus requisitos de aplicação, conforme mostra a Figura 19.



Fonte: Autoria Própria (2023).

- Redes de Área Premissa dos Consumidores: Redes de Área Doméstica (HAN), Redes de Área de Edifícios (BAN) e Redes de área industrial (IAN);
- Redes de Área de Vizinhança (NAN);
- Redes de longa distância (WAN);

4.2.1 Redes da área de instalação próxima do consumidor: (HAN), (BAN) e (IAN)

Nas instalações dos consumidores residenciais, comerciais e áreas industriais, existem vários aparelhos e equipamentos que enviam sinais e recebem sinais de um medidor inteligente de energia e/ou um sistema de gerenciamento de energia. Como estes aparelhos se localizam no mesmo local, não requerem transmissão de dados em frequências muito altas. Sendo assim, qualquer tecnologia de comunicação que possa oferecer 100 kbps de taxa de dados em um raio de até 100 m de alcance de cobertura é normalmente suficiente para aplicações HAN, BAN e IAN.

Há algumas tecnologias de comunicação disponíveis que podem atender aos requisitos citados. Como por exemplo o Bluetooth, Ethernet, ZigBee e Wi-Fi (BARMADA et al., 2011; GHARAVI; HU, 2011).

4.2.2 *Neighborhood Area Networks* (NAN)

A NAN é uma arquitetura de comunicação em que os dispositivos que cumprem essas redes estão a um raio de até 10 km, podendo alcançar a janela maior de taxa de transmissão de 100 kbps à 10 Mbps na área de cobertura. No nível de microrredes, a arquitetura NAN é empregada no estágio de distribuição, podendo se comunicar por meio da tecnologia com ou sem fio (ALMON et al., 2021).

As tecnologias de comunicação disponíveis adequadas para HAN são (PLC - *Power Line Communication*), rede mesh ZigBee, mesh Wi-Fi, celular, linha de assinante digital (DSL) e WiMAX (BARMADA et al., 2011; AALAMIFAR et al., 2014).

4.2.3 *Wide Area Networks* (WAN)

Em um cenário próximo, sistemas de microrrede CC irão abranger uma grande área geográfica e, conseqüentemente, irão requerer a implantação de muitos dispositivos de monitoramento e medição, tais como sensores e controladores de

gerenciamento de energia em áreas amplas para trocar informações com sistemas modernos de redes inteligentes e melhoria do planejamento, estabilidade e proteção.

Em decorrência disso, a comunicação entre estes dispositivos mencionados necessita que a taxa de transmissão seja superior que as outras arquiteturas apresentadas. A taxa de dados necessária para aplicações da WAN está na faixa de 100 Mbps à 1 Gbps, com uma cobertura de área de até 100 km (QIN et al., 2019). Tecnologias de comunicação disponíveis que podem ser adequadas para aplicações WAN são Fibra Óptica, WiMAX, PLC e Celular (BARMADA et al., 2011; AALAMIFAR et al., 2014).

4.3 INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO

A escolha de uma infraestrutura de comunicação deve respeitar restrições do dispositivo, localização e recursos financeiros. A rede de comunicação pode transmitir sinais com ou sem fio. Na sequência serão explanados os conceitos e aplicações das principais tecnologias de comunicação existentes na literatura.

4.3.1 Comunicação com fio

A comunicação com fio é o modo mais simples de comunicação e pode utilizar linhas elétricas, cabos de par trançado e fibras ópticas.

4.3.1.1 *Power line communication (PLC)*

A rede elétrica originalmente foi desenvolvida para fornecer potência, não dados, porém com o avanço das técnicas de modulação foi possível que essa tecnologia fizesse uso da própria infraestrutura básica para transmissão de dados. Do primórdio dessa aplicação até os dias atuais, foram empregadas diversas taxas de frequências de transmissão e técnicas de modulação para aumentar a performance de transmissão de dados.

Atualmente, sua relevância se justifica pela alta velocidade por meio de linhas de energia e solucionar a questão do problema denominado de “última milha”. Este termo é empregado para definir o caminho entre o *backbone* principal até cada consumidor final.

Apesar disso, o PLC é vulnerável a ruído eletromagnético de motores elétricos, interferência de sinais de rádio e fontes de alimentação. Isso ocorre

principalmente porque as linhas de energia não são blindadas, sendo assim, há uma possibilidade consideravelmente alta de interceptação de transmissão de dados críticos por partes não autorizadas (PRABHU et al., 2021).

Outro ponto bastante relevante é que a conexão de comunicação é interrompida quando ocorre de algum evento que possa abrir o circuito, como abertura de chave.

4.3.1.2 Cabo de par trançado

Comunicação por par trançado é um método de transmissão de dados que utiliza um cabo composto por dois fios de cobre entrelaçados, chamados de "par trançado". É um dos métodos mais comuns de transmissão de dados em redes locais (LAN - *Local Area Network*) (ZHAO, 2003).

O par trançado é usado para transmitir sinais elétricos de baixa tensão entre dispositivos de rede, como computadores, *switches* e roteadores. Cada fio do par trançado é envolvido em uma camada de isolamento para evitar interferência eletromagnética entre os fios e outros cabos próximos. O entrelaçamento dos fios também ajuda a reduzir a interferência de outros sinais elétricos.

Em suas principais categorizações há duas categorias chaves de cabos de pares trançados, a saber: UTP (par trançado sem blindagem – do Inglês *Unshielded Twisted Pair*) e STP (par trançado com blindagem – do Inglês *Shielded Twisted Pair*). O UTP é o tipo mais comum e é usado em muitas redes locais. Já o cabo STP é usado em redes onde é necessário um nível mais alto de proteção contra interferências elétricas, como em ambientes industriais ou em redes com cabos longos (SHOULONG, 2009).

Os cabos de par trançado têm a vantagem de serem relativamente baratos, flexíveis e fáceis de instalar. No entanto, eles têm limitações em relação à distância que podem transmitir sinais elétricos sem degradação. Os sinais elétricos transmitidos através de cabos de par trançado também são vulneráveis a interferências eletromagnéticas de outros dispositivos próximos, como motores elétricos, equipamentos de iluminação e outros cabos elétricos.

4.3.1.2 Fibra óptica

A comunicação de fibra óptica é um método de transmissão de informações que utiliza cabos feitos de filamentos finos de vidro ou plástico, conhecidos como fibras ópticas, para transmitir sinais de luz. Ao contrário dos cabos elétricos tradicionais, que transmitem informações em forma de sinais elétricos, a comunicação de fibra óptica utiliza a luz como meio de transmissão (KAUSHIK; SINGH; RAJPOOT, 2020).

A comunicação de fibra óptica tem várias vantagens em relação aos métodos de transmissão elétrica, como maior capacidade de transmissão de dados, menor perda de sinal e maior resistência a interferências elétricas e ruídos.

A luz viaja através das fibras ópticas, o que permite transmitir grandes quantidades de dados a grandes distâncias em alta velocidade. A luz é transmitida através do núcleo da fibra óptica e refletida pelo revestimento interno, percorrendo a fibra de uma extremidade a outra.

As fibras ópticas podem ser agrupadas em feixes e revestidas por camadas adicionais de proteção para aumentar a sua durabilidade e resistência à quebra (TANENBAUM, 2003; SOARES, 2008). É amplamente utilizada em redes de comunicação de dados, como redes de computadores, telefonia e internet. Os cabos de fibra óptica são usados para transmitir informações de um local para outro com alta velocidade e segurança, permitindo o compartilhamento de dados em escala global. Além disso, a comunicação de fibra óptica também é usada em outras áreas, como medicina, indústria e pesquisa científica, onde é necessário transmitir informações de alta qualidade e em grandes distâncias (KAUSHIK; SINGH; RAJPOOT, 2020).

4.3.2 Comunicação sem fio

Comunicação sem fio refere-se à troca de informações entre dispositivos ou sistemas sem a necessidade de fios ou cabos físicos. Esse tipo de comunicação é possível graças a tecnologias de transmissão de sinais. As principais tecnologias são descritas a seguir.

4.3.2.1 ZigBee

Zigbee é uma comunicação sem fio de baixa potência e baixa taxa de transmissão de dados, desenvolvido para ser utilizado em redes de sensores sem fio

e dispositivos de controle. Ele é baseado no padrão IEEE 802.15.4, sendo uma especificação para redes sem fio de baixa taxa de transferência de dados e consumo de energia (LEE et al., 2007).

Esta tecnologia é especialmente adequada para aplicações de automação residencial e predial, devido à sua capacidade de conectar dispositivos simples, como sensores de movimento, termostatos, interruptores de luz, e outros, ou seja, permite que esses dispositivos se comuniquem e cooperem para executar tarefas específicas (PORKODI; BHUVANESWAR, 2014);

Uma das principais vantagens da tecnologia *Zigbee* é que ela usa um esquema de endereçamento de rede hierárquico, o que significa que os dispositivos podem ser organizados em grupos e subgrupos, e a comunicação entre eles pode ser gerenciada de forma eficiente (WANG et al., 2011). Além disso, possui recursos de segurança avançados, como criptografia de dados e autenticação de dispositivos, e consequentemente contribui para proteger a rede contra possíveis ataques. (OLIVEIRA, 2020).

Ainda possui baixo consumo de energia, o que a torna ideal para dispositivos alimentados por bateria e outros tipos de dispositivos com limitações de energia. No entanto, a baixa taxa de transferência de dados da comunicação *Zigbee* pode limitar sua utilização em algumas aplicações, como transmissão de arquivos grandes (NESHENKO et al., 2019).

4.3.2.2 Wi-Fi Local

Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) é uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a conexão de dispositivos à internet ou a uma rede local LAN sem a necessidade de cabos ou fios físicos. Também denominada de WLAN (do inglês *Wireless Local Area Network*) é uma rede local que utiliza a tecnologia Wi-Fi para conectar dispositivos em uma área limitada, como uma casa, escritório ou prédio.

Uma WLAN é composta por um ou mais pontos de acesso, que se comunicam com os dispositivos por meio de sinais de rádio. Esses pontos de acesso são conectados a uma rede cabeada que permite a conexão com a internet ou outros dispositivos na rede (EDIRISINGHE et al., 2021).

A tecnologia Wi-Fi utilizada em WLANs pode operar em diversas frequências, como 2,4 GHz ou 5 GHz, e oferece diferentes padrões de velocidade de transmissão de dados, como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n e 802.11ac (GEIER, 1999).

Os dispositivos que desejam se conectar a uma WLAN precisam ter um adaptador Wi-Fi, que pode ser embutido no dispositivo ou conectado por meio de uma porta USB (do inglês *Universal Serial Bus*). Uma vez conectados à rede Wi-Fi, os dispositivos podem compartilhar recursos e arquivos, acessar a internet, realizar chamadas de voz e vídeo, entre outras atividades. As redes Wi-Fi são amplamente utilizadas em ambientes domésticos e corporativos devido à sua facilidade de instalação, flexibilidade, mobilidade e baixo custo. Entretanto, é importante configurar a rede com segurança, para evitar possíveis ataques e acesso não autorizado aos dados da rede (NICHOLS; LEKKAS, 2002).

4.3.2.3 *Wireless Mesh*

Wireless Mesh é uma tecnologia de rede sem fio que utiliza vários pontos de acesso interconectados para criar uma rede de alta velocidade e cobertura ampla. Cada ponto de acesso pode se comunicar diretamente com outros pontos de acesso próximos, gerando uma "malha" de conexões sem fio que possibilita que os dispositivos se conectem a qualquer ponto de acesso na rede.

Os pontos de acesso são instalados em locais estratégicos para garantir uma cobertura ideal da área a ser atendida. Esses pontos de acesso podem ser ligados por meio de cabos ou funcionar sem fio, utilizando tecnologias como o padrão IEEE 802.11, 802.15 e 802.16 (AMIR et al., 2010).

A rede *Mesh* é capaz de fornecer uma cobertura ampla e uniforme em áreas grandes e complexas. Além disso, a rede *Mesh* pode ser facilmente expandida e reconfigurada para atender às necessidades de cobertura da rede, sem uma infraestrutura cabeada complexa (YONGGANG, 2020). Ainda apresenta alta tolerância a falhas. Se caso um dos pontos de acesso falhar ou ficar indisponível, a rede *Mesh* pode se reorganizar automaticamente para garantir que os dispositivos conectados ainda possam se comunicar com a rede. Além disso, o *Wireless Mesh* também pode ser configurado com recursos avançados de segurança, como criptografia de dados e autenticação de usuários, para garantir a privacidade e segurança das informações transmitidas na rede. (ESLAMI; KARIMI; KHODADADI, 2014; BENYAMINA; HAFID; GENDREAU, 2012). No entanto, a tecnologia tem limitações em termos de baixa velocidade, altas taxas e vulnerabilidade à interferência de outras redes sem fio.

4.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Para o funcionamento confiável da microrrede CC são necessários que os elementos que compõem esse sistema troquem informações, tais como status atual de energia, histórico de operação e aplicações.

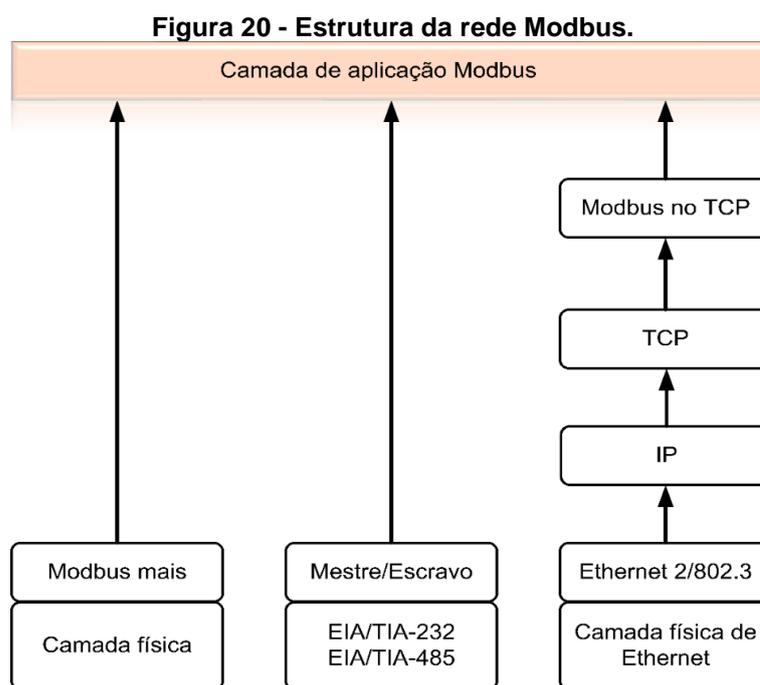
Nesse sentido, essa gama de informações é fornecida pelo sistema de comunicação que padroniza e utiliza de protocolos de comunicação. Ou seja, uma série de regras que definem como os dispositivos em uma microrrede se comunicam para trocar informações e coordenar suas operações.

Para cada aplicação de rede de comunicação há restrições, o que resulta em diversos protocolos de comunicação existentes para troca de informações, como por exemplo os dispositivos de proteção que requerem uma resposta mais rápida e comunicação em tempo real.

4.4.1 Modbus

O protocolo *Modbus* é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em microrredes CC para a troca de informações entre dispositivos. Inicialmente sua aplicação foi projetada para a troca de dados entre CLPs (FOVINO et al., 2009).

O protocolo é baseado em uma estrutura mestre-escravo, onde um dispositivo principal (mestre) solicita informações de outros dispositivos (escravos) na rede. Na Figura 20 é possível visualizar essa estrutura em camadas (SEN, 2014).



Fonte: Autoria Própria (2023).

O protocolo *Modbus* é simples e eficiente, tornando-o uma escolha popular em microrredes CC. Permite que os dispositivos se comuniquem com uma variedade de equipamentos de automação, como inversores de frequência, controladores de carga, medidores de energia, entre outros (SHUKLA et al., 2017).

O *Modbus* é um protocolo aberto, o que significa que pode ser usado por qualquer pessoa ou empresa sem a necessidade de pagar licenças de uso. Além disso, é fácil de implementar e de entender, tornando-o uma escolha popular para desenvolvedores e usuários finais.

Com esse propósito de estrutura onde o cliente solicita o funcionamento do fornecedor, há diferentes variantes do protocolo *Modbus*, incluindo:

- TCP/IP sobre Ethernet: Os dados são enquadrados em formato binário em TCP usando o protocolo Ethernet. Os mecanismos de endereçamento e controle de acesso ao canal são fornecidos pelo acesso múltiplo por detecção de portadora com detecção de colisão (CSMA-CD) (NIDEBORN, 2021);
- Transmissão serial: Os dados com comunicação serial podem ser transmitidos no formato binário de oito bits (*Modbus* RTU) ou no código padrão americano de sete bits para formato de intercâmbio de informações (*Modbus* ASCII), o que requer um tráfego de dados duas vezes maior. Este modo pode ser implementado em vários meios de comunicação, como com fio, fibra ótica ou rádio. Os padrões mais comumente usados em comunicação com fio para transmissão serial são RS-232, RS-422 e RS-485 (REYNDERS; MACKAY; WRIGHT, 2004).

4.4.2 *Distributed Network Protocol version 3.3 (DNP3)*

O *Distributed Network Protocol version 3.3 (DNP3)* é um protocolo de comunicação projetado para interação entre estações mestres em concessionárias de energia elétrica e industriais, como petróleo e gás, água/resíduos e segurança (CLARKE et al., 2004). Ele foi desenvolvido pela empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) sendo um protocolo aberto que usa uma arquitetura cliente-servidor para permitir a comunicação entre dispositivos em uma rede. Ele foi projetado para fornecer comunicação confiável e segura em ambientes de automação de energia elétrica, onde a precisão e a eficiência são essenciais.

As mensagens DNP3 geralmente são mapeadas às três camadas superiores do modelo *Open Systems Interconnection* (OSI), que são as camadas de enlace de dados, transporte e aplicação. A topologia ponto a ponto é um modelo direto onde uma estação central interage com uma estação remota. Na topologia multiponto, um dispositivo mestre se comunica com vários escravos consultando os dados. Cada estação remota recebe as requisições, mas envia os dados para o mestre somente quando o endereço de destino corresponde ao seu endereço. Por fim, a última topologia possível com utilização do protocolo DNP3 é o concentrador de dados, onde várias estações remotas podem ter diferentes protocolos, e utilizando gateways, a estação central pode coletar informações deles (RICHARD; APPIAH-KUBI, 2017).

O DNP3 suporta dois modos de operação – *poll* e *quiescent*. O modo *poll*, modo de operação padrão do DNP3, é usado quando a comunicação de dados é necessária na microrrede. Quando um dispositivo deseja enviar ou receber dados, ele envia uma mensagem de solicitação para a rede, solicitando dados específicos a outro dispositivo. Em resposta, o dispositivo destinatário envia uma mensagem de resposta contendo os dados solicitados. Já o modo *quiescente*, modo de operação de economia de energia do DNP3, é usado quando a microrrede está em repouso ou quando nenhum dispositivo precisa transmitir dados. Nesse modo, a rede é mantida em um estado de espera de baixo consumo de energia, sem enviar ou receber dados. Isso permite economizar energia e prolongar a vida útil dos dispositivos da rede. O DNP3 é normalmente implantado em comunicação serial (RS-232 e RS-485 (RATNER, 1997).

Os principais aspectos do DNP3 são:

- Comunicação de alta velocidade: suporta taxas de transmissão de até 10 Mbps, permitindo a transferência rápida de dados entre os dispositivos na microrrede;
- Confiabilidade de comunicação: faz uso da técnica denominada "detecção e correção de erros" para garantir que os dados sejam transmitidos de modo preciso e confiável, inclusive em ambientes com interferência elétrica ou ruído;
- Segurança de dados: o DNP3 oferece recursos de segurança, como autenticação de dispositivos e criptografia de dados, para proteger as informações transmitidas na microrrede contra acessos não autorizados ou adulteração;

- Suporte a topologias de rede flexíveis: o DNP3 pode ser usado em várias topologias de rede, incluindo estrela, anel e barramento, o que o torna adequado para diferentes configurações de microrrede.

4.4.3 *Controller Area Network - CAN*

O protocolo CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação serial síncrono utilizado em sistemas de rede de controle distribuído. Desenvolvido originalmente pela empresa alemã Bosch para permitir a comunicação confiável entre dispositivos eletrônicos em sistemas automotivos, mas atualmente é amplamente utilizado em aplicações industriais e de automação (SANTOS, 2010; FERREIRA, 2009)

O protocolo CAN define um formato de mensagem padrão e uma estrutura de identificação para permitir que diferentes dispositivos se comuniquem de forma eficiente. Utiliza esquema de comunicação, no qual vários dispositivos podem enviar mensagens para a rede, sem a necessidade de uma mensagem ser confirmada antes que outra possa ser enviada. Além disso, suporta a comunicação bidirecional e a transmissão de dados em tempo real (VIEIRA, et al., 2002; THALE; AGARWAL, 2012).

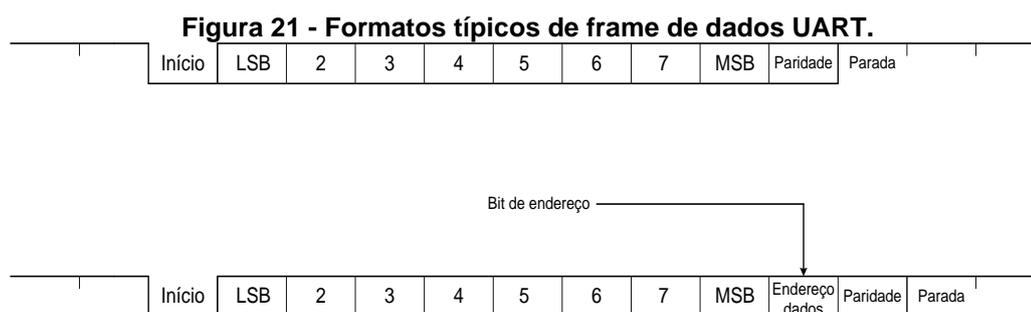
O CAN é um protocolo de notável robustez e resistência a falhas, atributos que o tornam especialmente apropriado para emprego em sistemas críticos, como os sistemas de freios e airbags em veículos automotivos. Além disso, sua capacidade de garantir alta confiabilidade e tempos de resposta ágeis também o qualificam para outras aplicações que demandam tais características. Dentro desse escopo, o CAN tem conquistado crescente adesão, inclusive no cenário de microrredes. Sua aplicação tem se expandido de forma significativa, encontrando espaço propício para contribuir com a operação eficaz desses sistemas (TAVASSOLI; FERREIDUNIAN; MEHDI, 2020; ALFERGANI et al., 2017).

4.4.4 *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*

O protocolo de comunicação UART é caracterizado por ser uma comunicação serial assíncrona originalmente desenvolvido na década de 1960. É amplamente empregado em sistemas de comunicação em que se deseja baixo custo e baixa velocidade. A transmissão de dados ocorre de forma confiável em um canal de comunicação serial unidirecional bit a bit, sem a necessidade de um *clock* compartilhado entre os dispositivos (LIE et al., 2007; SAMUEL, 2006).

A comunicação UART é baseada em pacotes de dados chamados de frames, que são transmitidos sequencialmente por um canal de comunicação serial. Cada frame é composto por um byte de início, um número variável de bytes de dados e um ou mais bytes de parada. O byte de início é usado para indicar o início do frame, enquanto os bytes de parada são usados para indicar o final do frame e garantir a integridade dos dados transmitidos (GUPTA et al., 2020).

A taxa de transmissão de dados na comunicação UART é especificada em bits por segundo (*baud rate*), que indica a quantidade de bits de dados que podem ser transmitidos em um segundo. A taxa de transmissão de dados deve ser a mesma em ambos os dispositivos envolvidos na comunicação UART para garantir que os dados sejam transmitidos corretamente de maneira sincronizada, na Figura 21 apresenta os níveis lógicos da linha e transmissão (8 bits e 1 *stop bit*) (LI et al., 2022).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Há basicamente dois modos de comunicação UART: o modo *half-duplex* e *full-duplex*. A *half-duplex*, transmissão e recepção ocorrem alternadamente em um mesmo canal de comunicação serial, ou em modo *full-duplex*, onde a transmissão e recepção ocorrem simultaneamente em canais de comunicação serial diferentes.

4.5 NORMAS DE COMUNICAÇÃO

As normas de comunicação são essenciais para a interconexão e interoperabilidade de sistemas e dispositivos em diversas áreas, como em microrredes. Essas normas estabelecem diretrizes e padrões que garantem que diferentes componentes eletrônicos e sistemas possam se comunicar eficazmente, trocando informações de maneira confiável.

Neste contexto, as normas de comunicação desempenham um papel crucial na garantia de que dispositivos de fabricantes diferentes possam funcionar em

conjunto. Isso é particularmente evidente em ambientes onde a interoperabilidade é essencial, como em cenários de microrredes.

4.5.1 IEC 61850

O IEC 61850 é um padrão internacional de comunicação desenvolvido para sistemas de automação de subestações de energia elétrica. É um conjunto de normas do Comitê Técnico criado pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) para padronizar a comunicação entre equipamentos de subestação, como relés de proteção, equipamentos de medição e controle, e dispositivos de comunicação em rede (BRUNNER, 2008).

O principal conceito de arquitetura de comunicação em IEC 61850 é a criação de objetos de dados e serviços independentes de qualquer protocolo, que permite o mapeamento adicional dos objetos de dados e serviços para qualquer outro protocolo que atende aos requisitos de dados/serviços (MATHEBULA; SAHA, 2020).

O IEC 61850 é amplamente utilizado em microrredes CC para fornecer uma comunicação confiável e segura entre os dispositivos na rede. Ele usa uma arquitetura cliente-servidor para permitir que os dispositivos se comuniquem entre si e fornece recursos avançados de gerenciamento de dados, como a capacidade de monitorar e controlar remotamente dispositivos na rede.

Algumas das características do protocolo IEC 61850 incluem:

- Modelagem de dados padronizada: fornece um modelo de dados padronizado para equipamentos de subestação, o que facilita a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes;
- Comunicação orientada à serviços: utiliza uma abordagem orientada à serviços para comunicação, permitindo que os dispositivos acessem e controlem informações específicas de outros dispositivos na rede;
- Detecção e correção de erros: inclui recursos de detecção e correção de erros para garantir a precisão e a confiabilidade da comunicação, mesmo em ambientes de interferência elétrica ou ruído;
- Segurança de dados: faz uso de recursos de segurança, como autenticação de dispositivos e criptografia de dados, para proteger as informações transmitidas na rede contra acessos não autorizados ou adulteração.

4.5.2 IEEE P2030

A série de padrões IEEE P2030, desenvolvida pelo IEEE, tem como principal objetivo a criação de diretrizes e padrões para a interoperabilidade de sistemas de energia inteligente, conhecidos como *Smart Grids*. Esses padrões visam estabelecer a integração eficaz de tecnologias energéticas com sistemas de informações e comunicações. Concentra-se em várias áreas, incluindo a interconexão de tecnologias energéticas com o sistema elétrico, a integração de veículos elétricos, o armazenamento de energia e o gerenciamento de redes elétricas. Além disso, a série P2030 busca criar diretrizes para a operação de sistemas de energia bidirecionais, permitindo o fluxo de energia em ambas as direções, bem como a comunicação e o controle.

Esses padrões têm como objetivo estabelecer um ambiente mais seguro e eficiente para a distribuição e geração de energia, melhorando a capacidade de integração de fontes de energia renovável e a interoperabilidade entre diferentes sistemas e dispositivos. Dessa forma, a série de padrões IEEE P2030 desempenha um papel fundamental no avanço e na modernização das redes elétricas para atender às demandas da era digital e à crescente necessidade de energias limpas e sustentáveis (BASSO; HAMBRICK; DEBLASIO, 2012)

4.5.3 Padrão RS-232

O padrão RS-232 (*Recommended Standard 232*) é um padrão de comunicação serial que define as características elétricas e funcionais de uma interface entre dispositivos de comunicação de dados. Aplicado em diversos equipamentos de comunicação, como *modems*, terminais, impressoras, entre outros. Para vincular um dispositivo que segue o padrão RS-232 a uma interface UART, é necessário adotar um conversor RS-232 para UART. Este conversor é geralmente composto por um driver RS-232 e um receptor RS-232, que convertem os sinais elétricos do padrão RS-232 para sinais lógicos do protocolo UART (STRANGIO, 2012).

O driver RS-232 converte os sinais lógicos da interface UART em sinais elétricos compatíveis com o padrão RS-232, enquanto o receptor RS-232 converte os sinais elétricos do padrão RS-232 em sinais lógicos compatíveis com a interface UART. O conversor RS-232 para UART permite que dispositivos que seguem o

padrão RS-232 sejam conectados a dispositivos que utilizam a interface UART, como microcontroladores e microprocessadores (QUELHAS, 2023).

4.5.4 Padrão RS-485

Assim como o padrão RS-232, o RS-485 é um padrão de comunicação serial que define os aspectos funcionais de uma interface de comunicação serial para transmissão de dados, porém em longas distâncias, com velocidades de transmissão de até 10 Mbps. É muitas vezes empregado aplicações industriais, como sistemas de controle de processos, automação industrial, sistemas de segurança. Uma das principais diferenças é que o RS-485 utiliza um barramento de comunicação em vez de uma conexão ponto a ponto, o que possibilita que diversos dispositivos sejam conectados em um mesmo barramento de comunicação (MARIÑO, 2003).

Ainda, se difere no uso do sistema de transmissão diferencial, no qual dois sinais são transmitidos simultaneamente através do mesmo par de fios, mas com polaridades opostas. Isso permite que o sinal seja transmitido em longas distâncias sem perda significativa de qualidade, reduzindo a sensibilidade a interferências eletromagnéticas.

A conexão do padrão RS-485 à uma interface UART requer o uso um conversor RS-485 para UART. Este conversor é geralmente composto por um *driver* RS-485 e um receptor RS-485, que convertem os sinais elétricos do padrão RS-485 para sinais lógicos do protocolo UART e vice-versa.

4.6 DESENVOLVIMENTO DA REDE DE COMUNICAÇÃO

A seleção das propriedades do sistema de comunicação da microrrede é uma das etapas mais importantes da implementação da microrrede, isso porque determina eficiência e confiabilidade da transmissão de dados e do controle dos dispositivos que a compõe.

Neste trabalho, o sistema de comunicação entre os conversores da microrrede CC acontece por meio da tecnologia com fios trançados que, apesar de apresentar um custo mais elevado de instalação, comparada à comunicação sem fio, garante a troca de dados com maior segurança (SETIAWAN et al., 2015). Ainda, a escolha de cabos físicos é amplamente comum nestes tipos de aplicações, pois oferece bom custo-benefício, alta velocidade de transmissão e baixa latência, requisitos estes relevantes (PRAGALLAPATI et al., 2021; SERBAN et al., 2020).

O protocolo de comunicação empregado na microrrede CC em estudo é o UART que faz uso do módulo de Interface Comunicação Serial (do inglês *Serial Communication Interface* - SCI) no dispositivo *Digital Signal Controller* (DSC) modelo TMS320F28335 da *Texas Instruments*.

4.6.1 Módulo SCI

O módulo de SCI é porta serial assíncrona responsável por suportar comunicações digitais entre a Unidade Central de Processamento (CPU) e outros periféricos assíncronos que usam o formato padrão *non-return to-zero* (NRZ). Possui um transmissor e um receptor serial, cada um com seu próprio conjunto de registradores para configuração e controle, com transmissão e recepção por fios diferentes (TX e RX, respectivamente) (TEXAS INSTRUMENTS, 2009)

O receptor e o transmissor SCI têm, cada um deles, um FIFO (do inglês - *First In/First Out*) de 16 níveis para reduzir a sobrecarga de manutenção e cada um tem seus próprios bits separados de habilitação e interrupção. Ambos podem ser operados independentemente para comunicação *half-duplex* ou simultaneamente para comunicação *full-duplex*.

O *clock* da comunicação serial no DSC empregado é definido por SCICLK, que por sua vez é originado por meio do LSPCLK (*Low Speed Peripheral Clock*) e do BRR (*Baud Rate Register*).

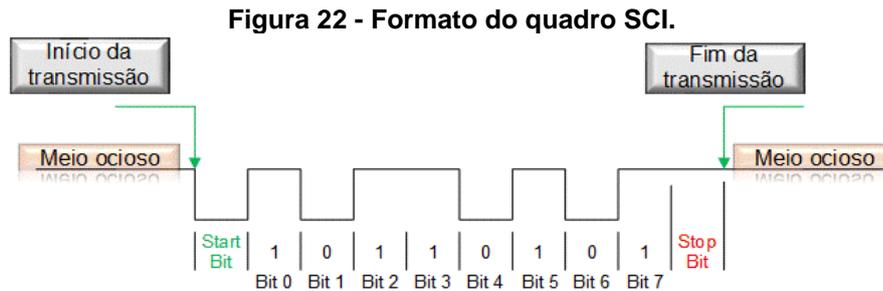
O BRR opera a uma taxa de bits programável para diferentes velocidades por meio de um registro de seleção de transmissão de 16 bits, já o LSPCLK possui frequência de 37,5 MHz. Dessa forma, é possível obter o cálculo de SCICLK, conforme:

$$SCICLK = \frac{LSPCLK}{(BRR+1)} \quad (19)$$

Considerando dois dispositivos operando em comunicação assíncrona, cada um deles pode trabalhar com um sinal de *clock* independente. No entanto, se requer que a taxa de transmissão seja mantida.

Para especificar a integridade dos dados, o SCI verifica os dados recebidos quanto à detecção de quebra, paridade, saturação e erros de enquadramento. A taxa de bits é programável para diferentes velocidades por meio de um registro de seleção de transmissão de 16 bits. A Figura 22 apresenta o formato de dados da comunicação SCI, na seguinte sequência:

- Um bit de início, também denominado de *start bit*;
- Um a oito bits de dados;
- Um bit de paridade par/ímpar (opcional);
- Um ou dois bits de parada ou *stop bit*;
- Um bit extra para distinguir endereços de dados (somente modo de bit de endereço).



No entanto, para programação no DSC é necessário definir o BRR. Assim, é possível obter a taxa de transmissão para comunicação, como segue:

$$BRR = \frac{LSPCLK}{(Taxa_{SCI} * 8)} - 1 \quad (20)$$

Ainda, o módulo SCI permite a configuração de 3 canais de comunicação, no qual está apresentado na Tabela 2, onde pode-se configurar portas programáveis nos GPIO (*General Purpose Input/Output*) conforme descritas na Tabela abaixo.

Tabela 2 - GPIO configuráveis para SCIA, SCIB e SCIC.

Canal	TX	RX
SCIA	GPIO28	GPIO28
	GPIO35	GPIO36
	GPIO9	GPIO11
SCIB	GPIO14	GPIO15
	GPIO18	GPIO19
	GPIO22	GPIO23
SCIC	GPIO62	GPIO63

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAS

Neste capítulo, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangendo as redes de comunicação em microrredes CC, que inclui conceitos relacionados a métricas, parâmetros, principais arquiteturas, infraestruturas e protocolos de comunicação. Através desta análise contextual, foi possível discernir as particularidades da rede de comunicação desenvolvida neste estudo. A escolha do módulo SCI demonstra-se prática, uma vez que está integrada ao DSC. Isso se deve, em grande parte, à natureza assíncrona do protocolo UART, que elimina a necessidade de sincronização entre os conversores e facilita a integração. Essa escolha representa um passo importante em direção à implementação eficaz do sistema de comunicação para as microrredes CC estudadas.

CAPÍTULO 5 – MICRORREDE CC EM ESTUDO

Este capítulo se dedica à descrição da topologia da microrrede CC integrada a uma rede elétrica CA monofásica operando com as duas técnicas de controle secundário estudadas no Capítulo 3.

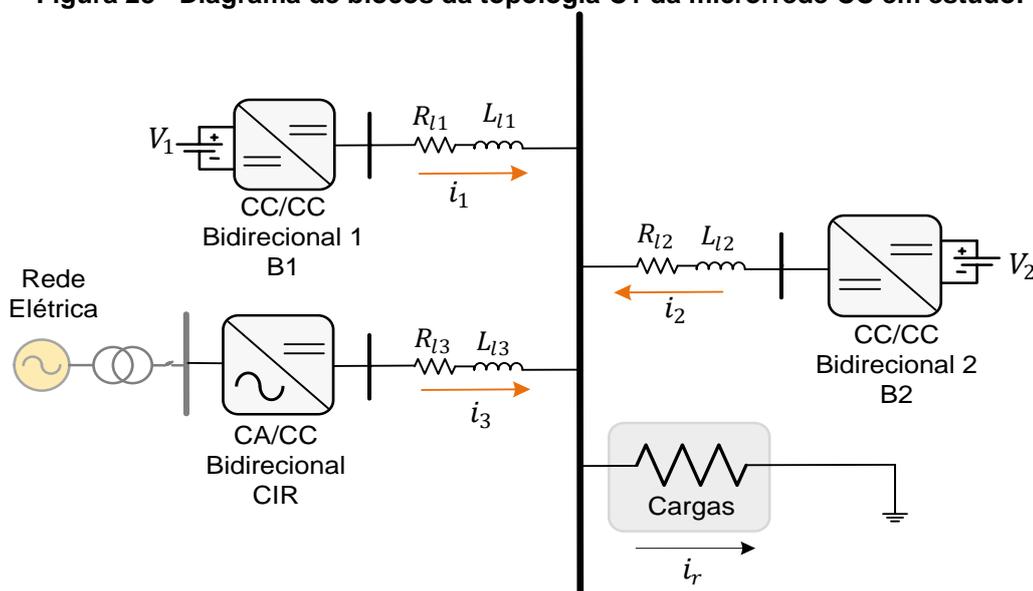
Também é desenvolvida a modelagem matemática dos circuitos de potência dos conversores que compõem a microrrede CC. O intuito desta abordagem é obter as funções de transferência que representam matematicamente as topologias empregadas. É também apresentada a modelagem para se estabelecer o controle dos conversores CC/CC controlados por *droop* de tensão, assim como a modelagem matemática do conversor de interface bidirecional CA/CC.

Por último, é descrito e apresentado as topologias de comunicação que serão implementadas utilizando a rede de comunicação abordada no Capítulo 4.

5.1 ESTRUTURA DA TOPOLOGIA DA MICRORREDE CC EM ESTUDO

A topologia adotada consiste em uma configuração radial simples, com duas variantes. A primeira configuração (C1), representada na Figura 23, é composta por três conversores. Dois deles são conversores CC/CC (B1 e B2) controlados em modo tensão por *droop*, enquanto o terceiro é um conversor CA/CC de interface com a rede elétrica (CIR), também controlado por *droop*. Nesta configuração, todos os conversores desempenham o papel de formadores de rede, contribuindo para o estabelecimento da referência de tensão no sistema.

Figura 23 - Diagrama de blocos da topologia C1 da microrrede CC em estudo.



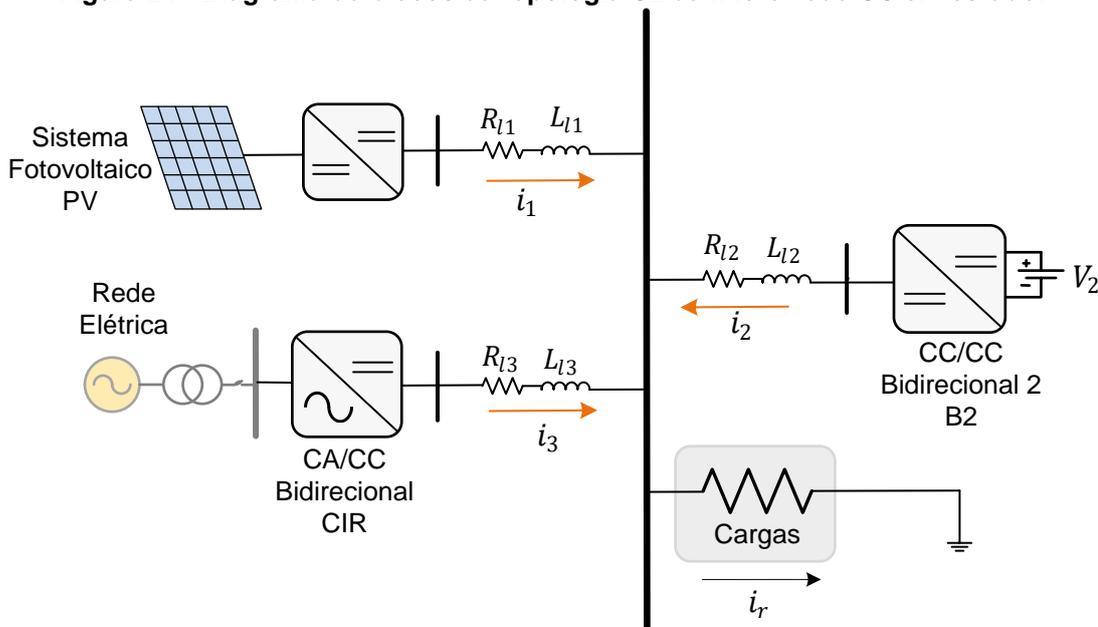
Fonte: Autoria Própria (2023).

A segunda configuração (C2) é composta por um conversor CIR, um conversor CC/CC (B2) e um conversor CC/CC operando em modo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), fornecendo ao sistema a máxima potência gerada a partir de um arranjo fotovoltaico e, assim, atuando como seguidor de rede. Neste trabalho, pretende-se empregar o algoritmo de MPPT P&O (*Perturb and Observe*), o qual está detalhado no Apêndice C. Já a especificação detalhada do modelo do módulo fotovoltaico empregado está disposta no Apêndice B.

Vale ressaltar que, quando há um excesso de energia disponível no sistema, o conversor CIR ajusta sua operação para acompanhar a referência de tensão estabelecida pelos outros conversores, permitindo assim a injeção da energia excedente.

As duas configurações de microrrede CC exploradas neste trabalho permitem analisar o comportamento dos conversores em diferentes cenários operacionais, demonstrando sua capacidade de atuar tanto como formadores quanto como seguidores de rede, conforme as condições de geração e demanda de energia no sistema em estudo.

Figura 24 - Diagrama de blocos da topologia C2 da microrrede CC em estudo.



Fonte: Autoria Própria (2023).

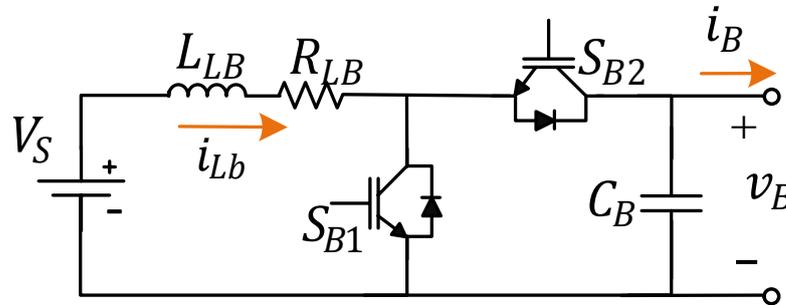
5.2 MODELAGEM DOS CONVERSORES ESTÁTICOS

A seguir, é apresentada a metodologia para obtenção da função de transferência dos conversores CC/CC da microrrede CC em estudo.

5.2.1 Modelo do conversor CC/CC controlado em modo tensão por *droop*

A Figura 25 ilustra o circuito de potência do conversor CC/CC bidirecional. Este conversor, assim como o conversor CA/CC participa da regulação da tensão do barramento CC da microrrede, ou seja, atuam como formadores de rede.

Figura 25 - Circuito equivalente conversor CC/CC bidirecional.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A matriz de estados do conversor CC-CC é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{LB} \\ \dot{\hat{v}}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{LB}}{L_{LB}} & -\frac{1-D_B}{L_{LB}} \\ \frac{1-D_B}{C_B} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{LB} \\ \hat{v}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_B}{L_{LB}} \\ -\frac{I_{LB}}{C_B} \end{bmatrix} [\hat{d}_b] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_B} \end{bmatrix} [\hat{i}_B] \quad (21)$$

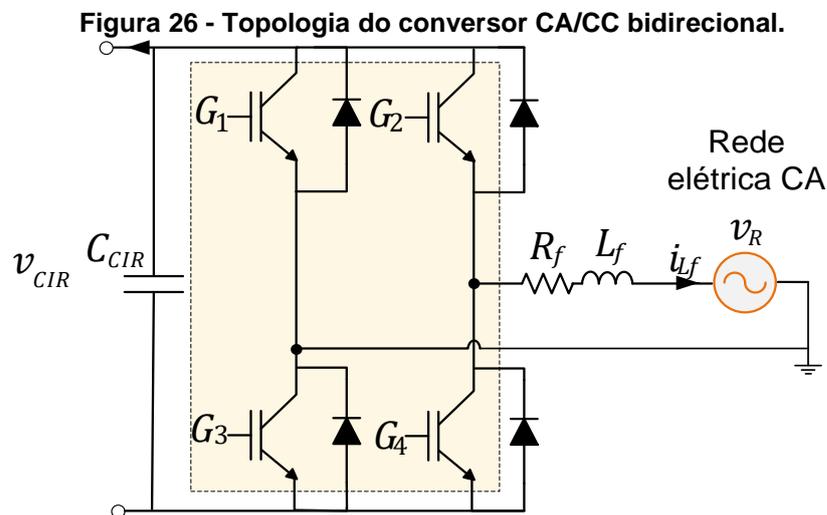
onde, R_{LB} e L_{LB} representam a resistência interna e a indutância do indutor do conversor CC/CC, C_B representa a capacitância do capacitor de saída, V_S simboliza a tensão de entrada, i_B e i_{LB} representam a corrente de saída e corrente de entrada do conversor, respectivamente, enquanto a tensão de saída é indicada por v_B e a razão cíclica por d_B .

Conseqüentemente, a partir de manipulações matemáticas na Equação (21), a função de transferência do conversor das variações na tensão e saída pela razão cíclica pode ser representada por:

$$G_{fV_Bd} = \frac{V_B}{C_B L_{LB} s^2 + R_{LB} C_B s + 1} \quad (22)$$

5.2.2 Modelo do conversor de interface CA/CC

O conversor CA/CC bidirecional empregado como conexão com a rede elétrica está mostrado na Figura 26. A direção do fluxo de potência deste conversor depende de sua operação como retificador ou como inversor. Desta forma, este conversor também é modelado com a finalidade de atuar na regulação de tensão do barramento CC da microrrede que, por sua vez, deve ser mantida constante e, para este fim, é utilizado um controlador PI. Sendo assim, se faz necessário realizar a modelagem matemática para obtenção desta malha de controle. Em (SILVA, 2001) é apresentado o desenvolvimento matemático por meio de uma análise de fluxo de potência.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A Equação (23) mostra a representação em espaços de estados do conversor CA/CC, como segue:

$$[i_{L_f}] = \left[-\frac{R_f}{L_f} \right] [i_L] + \left[\frac{V_{CIR}}{L_f} \right] [d_f] + \left[-\frac{1}{L_f} \right] [v_R] \quad (23)$$

onde i_L é a corrente no indutor, R_f e L_f representam a resistência interna e a indutância do indutor da saída do conversor, v_R é a tensão da rede elétrica e por fim, d_f é a razão cíclica.

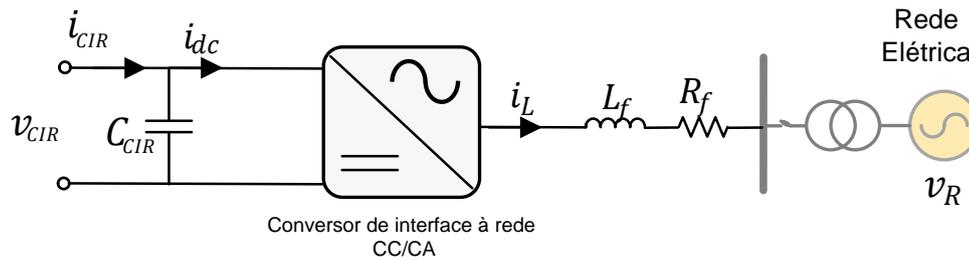
Assim, após a realização de algumas manipulações matemáticas em (23), a função de transferência do conversor das variações da tensão de entrada pela razão cíclica, representada por:

$$G_{fV_{CIR}d} = \frac{V_{CIR}}{L_f s + R_f} \quad (24)$$

5.2.2.1 Modelagem do barramento CC do conversor CA/CC

Com a finalidade de modelar o barramento de tensão do conversor CA/CC, foi admitido o circuito equivalente representado pela Figura 27. Admite-se um sistema monofásico, que tem como característica tensão e corrente senoidais e em fase.

Figura 27 - Circuito equivalente do conversor CA/CC.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A potência ativa pode ser expressa por (25) e, considerando que não tenha perdas no sistema, a potência do barramento do conversor CA/CC, definida por p_{cc} , é dada por:

$$p_{cc} = p_R \quad (25)$$

onde p_R a potência ativa instantânea da rede elétrica.

Representando as grandezas de tensão e corrente envolvidas por componentes contínuas no eixo direto “d” de um referencial síncrono fictício, a potência ativa instantânea na rede elétrica é obtida por:

$$p_{Rd} = v_{Rd} i_{Ld} \quad (26)$$

onde v_{Rd} e i_{Ld} são as componentes contínuas de tensão e corrente no eixo direto d do referencial síncrono fictício.

Por outro lado, a potência do lado CC pode ser representada por:

$$p_{cc} = v_{CIR} i_{dc} \quad (27)$$

onde v_{CIR} e i_{dc} são a tensão e a corrente no barramento CC.

A corrente que circula no capacitor do barramento CC pode ser expressa por:

$$C_{CIR} \frac{dv_{CIR}}{dt} = i_{CIR} - i_{dc} \quad (28)$$

onde i_{CIR} é a corrente de entrada do conversor CA/CC.

Igualando (26) e (27) e substituindo em (28), obtêm-se a seguinte expressão:

$$C_{CIR} \frac{dv_{CIR}}{dt} v_{CIR} = i_{CIR} - i_{Ld} v_d \quad (29)$$

Inserindo as perturbações no sistema na Equação (29) e submetendo ao processo de linearização, as parcelas CC referentes à resposta do sistema em regime permanente tornam-se nulas. Já os termos CA de segunda ordem são desconsiderados pois seus valores são muito baixos. Diante disso, a equação linearizada de pequenos sinais é obtida por:

$$C_{CIR} \frac{dv_{CIR}}{dt} v_{CIR} = \hat{i}_{oi} V_{oi} + I_{oi} \hat{v}_{oi} - i_{Ld} \hat{v}_{sd} + V_R \hat{i}_{sd} \quad (30)$$

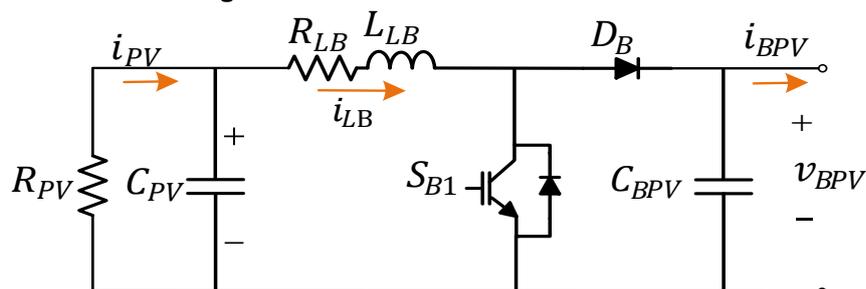
Por fim, é possível obter a função de transferência empregando a Transformada de Laplace, como segue:

$$G_{oi} = \frac{\hat{v}_{oi}(s)}{\hat{i}_{oi}(s)} = \frac{v_R}{C_{CIR} V_{CIR} s} \quad (31)$$

5.2.3 Modelo do conversor CC/CC operando em MPPT

O conversor CC/CC *boost* em análise, ilustrado na Figura 28, tem a finalidade de estabelecer uma conexão entre um arranjo fotovoltaico e o barramento principal da microrrede CC. Nessa configuração, a técnica de MPPT P&O é utilizada para maximizar a potência extraída do sistema Fotovoltaico (FV) diante de possíveis mudanças das condições climáticas.

Figura 28 – Conversor *boost* em análise.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Após a análise do conversor *boost* operando em duas etapas de funcionamento, na matriz de estado do conversor CC/CC é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{LB} \\ \dot{\hat{v}}_{PV} \\ \dot{\hat{v}}_{BPV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{LB}}{L_{LB}} & \frac{1}{L_{LB}} & -\frac{1-D_B}{L_{LB}} \\ \frac{1}{C_{PV}} & -\frac{1}{C_{PV}R_{PV}} & 0 \\ \frac{1-D_B}{C_{BPV}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{LB} \\ \hat{v}_{PV} \\ \hat{v}_{BPV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{BPV}}{L_{LB}} \\ 0 \\ -\frac{I_{LB}}{C_{BPV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_B}{L_{LB}} \\ \frac{-I_{LB}}{C_B} \end{bmatrix} [\hat{d}_b] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C_{BPV}} \end{bmatrix} [\hat{i}_{BPV}] \quad (32)$$

Nesse contexto, a resistência $R_{PV} = V_{PV_MPP}/I_{PV_MPP}$ representa o comportamento do arranjo fotovoltaico, em que V_{PV_MPP} refere-se à tensão no ponto de máxima potência e I_{PV_MPP} a corrente no ponto de máxima potência, C_{PV} é o capacitor de desacoplamento do sistema FV, R_{LB} é a resistência série do indutor L_{LB} , C_{BPV} representa o capacitor de saída do conversor. As grandezas i_{PV} e v_{PV} são, respectivamente, a corrente e a tensão do arranjo fotovoltaico. Por outro lado, i_{LB} , i_{BPV} , v_{BPV} e d_b representam a corrente no indutor, corrente de saída, tensão de saída e razão cíclica do conversor, respectivamente.

Após manipulações matemáticas em (32), a função de transferência em malha aberta interna (malha de corrente) e externa (malha de tensão) podem ser representadas, respectivamente, por:

$$G_{ftid} = \frac{V_{BPV}(1+sC_{PV}R_{PV})}{(R_{LB}+R_{PV})+s(L_{LB}+C_{PV}R_{PV}R_{LB})+s^2L_{LB}C_{PV}R_{PV}} \quad (33)$$

$$G_{ftvi} = -\frac{R_{PV}}{1+sC_{PV}R_{PV}} \quad (34)$$

5.3 TOPOLOGIAS DA REDE DE COMUNICAÇÃO

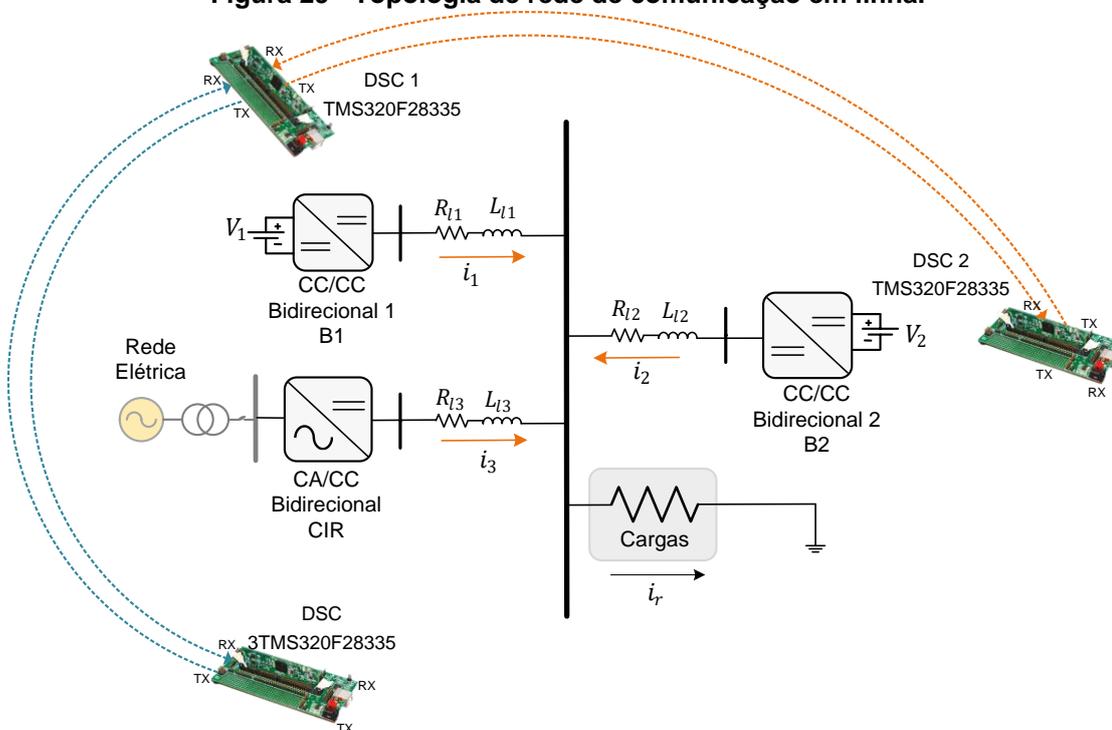
Duas topologias de rede de comunicação serão exploradas neste trabalho. A primeira, representada na Figura 29, é a em linha, já a segunda, representada na Figura 30, é em anel. Nestas estratégias de comunicação, conforme já mencionado, os conversores trocam informação entre os conversores vizinhos para realizar o compartilhamento de potência/corrente de forma distribuída.

A topologia em linha é caracterizada por uma série de dispositivos de comunicação conectados em uma única linha. Cada dispositivo é capaz de se comunicar com os dispositivos adjacentes em ambos os lados.

A topologia em anel, por outro lado, é designada por um único caminho fechado no qual os dispositivos de comunicação são conectados em série. Cada dispositivo só pode se comunicar com os dispositivos adjacentes em ambos os lados, assim como a topologia em linha. No entanto, a topologia em anel apresenta algumas vantagens em relação à topologia em linha. A falha de um único dispositivo não afeta toda a rede, aliada ao fato de que a adição ou remoção de dispositivos é mais fácil de realizar.

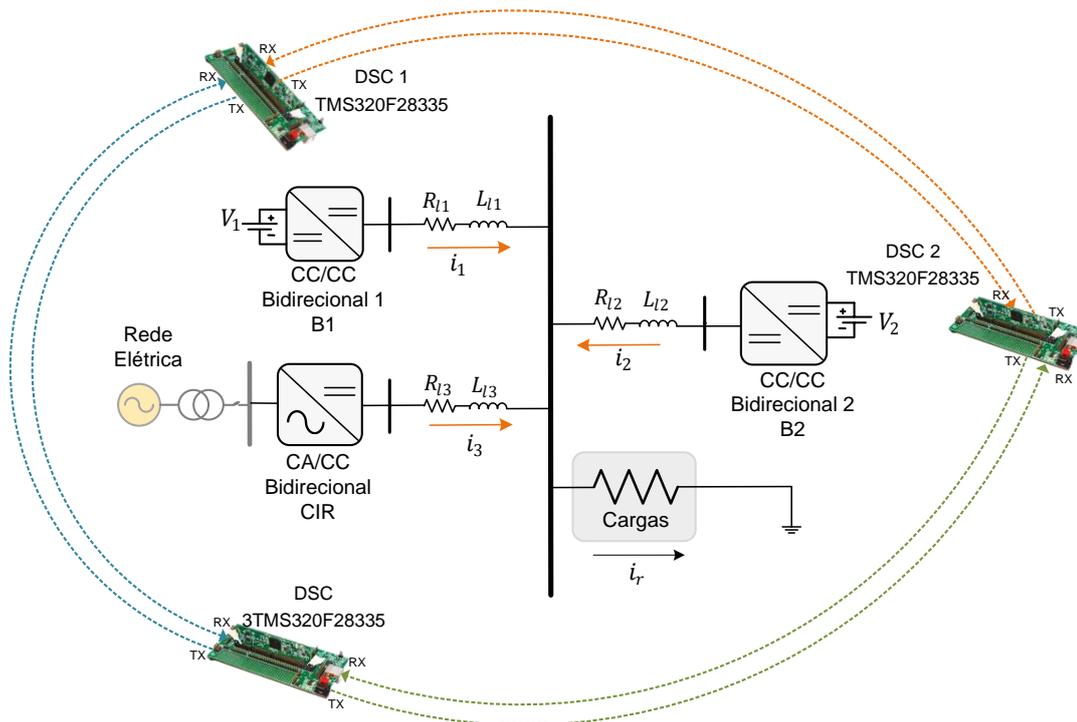
Serão exploradas neste trabalho essas duas topologias de redes de comunicação nas duas configurações de microrredes CC estudadas.

Figura 29 - Topologia de rede de comunicação em linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 30 - Topologia de rede de comunicação em anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

5.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo, a operação da topologia radial simples da microrrede CC foi descrita detalhadamente por meio das duas configurações abordadas.

Os modelos matemáticos dos conversores que integram a microrrede CC em estudo foram obtidos, permitindo a adoção de técnicas para a obtenção dos ganhos de seus controladores, de corrente e tensão.

Por fim, foram apresentadas duas topologias de rede de comunicação, as quais serão implementadas via simulação computacional pela utilização do *toolbox – TrueTime* do Simulink. Tal ferramenta será responsável por simular as condições reais de comunicação do sistema em estudo, que será apresentada em detalhes no Capítulo 6.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos via simulações e testes experimentais do sistema de comunicação e operação da microrrede CC implementada na topologia radial simples, envolvendo as duas configurações de rede de comunicação apresentadas em 5.3 (linha e anel).

São avaliados três cenários de operação cujas validações são feitas por meio do controle por *droop* adotado no nível primário e técnica de controle distribuída em nível secundário. Em relação ao comportamento da tensão do barramento CC e a técnica proposta de compartilhamento de potência/corrente perante as situações de alteração de carga, a estabilidade do sistema deve ser garantida. Também, serão avaliadas as topologias de comunicação e suas vantagens e desvantagens perante as condições de falhas e atrasos.

6.1 CENÁRIOS AVALIADOS

Com o objetivo de validar as estratégias de controle secundário apresentada no capítulo 5, são explorados três cenários envolvendo as configurações 1 e 2 da microrrede, conforme detalhados a seguir:

Cenário 1 – No primeiro cenário é adotado a configuração 1, que consiste em um arranjo que inclui conversor de interface com a rede elétrica CA e dois conversores bidirecionais CC/CC. Neste cenário, a potência total (P_T) do sistema é de 2350 W. Além disso, esse cenário foi submetido a duas avaliações de topologia de comunicação do controle secundário em linha e em anel, em ambos ocorrem duas falhas de comunicação.

Cenário 2 – O segundo cenário continua utilizando o arranjo que inclui três conversores operando em *droop* da configuração 1. Porém a potência total (P_T) do sistema é de 3700 W. Neste caso, o controle secundário opera com a topologia de comunicação em linha e anel, no entanto, ocorre apenas uma falha de comunicação nesse cenário.

Cenário 3 – Este cenário utiliza a configuração 2. Nesta configuração composta por um conversor de interface CA/CC, um conversor bidirecional CC/CC operando em *droop* e um conversor CC/CC controlado em corrente, operando em MPPT fornecendo

a potência máxima disponível. A $P_T = 2,975 \text{ kW}$. A topologia de comunicação empregada é a linha e anel e aplicada apenas uma falha na comunicação.

Dentro desses cenários, são investigadas as duas configurações já mencionadas, assim como também variação da potência total do sistema, topologias de comunicação e falhas de comunicação.

A Tabela 3 sintetiza as características de cada um dos cenários explicados acima.

Tabela 3 - Especificações de simulação e experimental dos cenários explorados.

Cenário 1	
Potência nominal CIR	$P_{CIR} = 1 \text{ kW}$
Potência nominal CC/CC 1	$P_{B1} = 600 \text{ W}$
Potência nominal CC/CC 2	$P_{B2} = 750 \text{ W}$
Resistência de <i>droop</i>	$R_{DB1} = 5 \Omega \quad R_{DB2} = 4 \Omega \quad R_{CIR} = 4 \Omega$
Potência total	$P_T = 2350 \text{ W}$
Variável de alocação da potência do CIR	$K_{\alpha CIR} = 0,4$
Variável de alocação da potência do CC/CC 1	$K_{\alpha B1} = 0,3$
Variável de alocação da potência do CC/CC 2	$K_{\alpha B2} = 0,3$
Fator de alocação de potência do CIR	$\alpha_{CIR} = 0,23$
Fator de alocação de potência do CC/CC 1	$\alpha_{B1} = 0,23$
Fator de alocação de potência do CC/CC 2	$\alpha_{B2} = 0,29$
Ganho de correção compartilhamento de corrente/potência	$K_p = 250$
Quantidade de falhas de comunicação	2
Cenário 2	
Potência nominal CIR	$P_{CIR} = 1 \text{ kW}$
Potência nominal CC/CC 1	$P_{B1} = 1,2 \text{ kW}$
Potência nominal CC/CC 2	$P_{B2} = 1,5 \text{ kW}$
Resistência de <i>droop</i>	$R_{DB1} = 2,5 \Omega \quad R_{DB2} = 2 \Omega \quad R_{CIR} = 3 \Omega$
Potência total	$P_T = 3,7 \text{ kW}$
Variável de alocação da potência do CIR	$K_{\alpha CIR} = 0,2$
Variável de alocação da potência do CC/CC 1	$K_{\alpha B1} = 0,4$
Variável de alocação da potência do CC/CC 2	$K_{\alpha B2} = 0,4$
Fator de alocação de potência do CIR	$\alpha_{CIR} = 0,17$
Fator de alocação de potência do CC/CC 1	$\alpha_{B1} = 0,29$
Fator de alocação de potência do CC/CC 2	$\alpha_{B2} = 0,29$
Quantidade de falhas de comunicação	1
Cenário 3	
Potência nominal CIR	$P_{GIC} = 1 \text{ kW}$
Potência nominal CC/CC 1	$P_{B1} = 750 \text{ W}$
Potência nominal CC/CC FV	$P_{BPV} = 1,225 \text{ kW}$
Resistência de <i>droop</i>	$R_{DB2} = 4 \Omega \quad R_{CIR} = 3 \Omega$
Potência total	$P_T = 2,975 \text{ kW}$
Variável de alocação da potência do CIR	$K_{\alpha CIR} = 0,3$
Variável de alocação da potência do CC/CC 2	$K_{\alpha B2} = 0,7$
Fator de alocação de potência do CIR	$\alpha_{CIR} = 0,23$
Fator de alocação de potência do CC/CC 2	$\alpha_{B2} = 0,41$
Quantidade de falhas de comunicação	1

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.2 PARÂMETROS DOS SISTEMAS EM ESTUDO

Os parâmetros utilizados nas simulações e experimentais estão apresentados na Tabela 4, enquanto na Tabela 5 são apresentados os dados e parâmetros dos conversores utilizados. Com o objetivo de aproximar as simulações da realidade do sistema, todos os algoritmos, aquisição de dados e sistema de controle foram discretizados na frequência de amostragem exibida na Tabela 4.

São empregadas duas variações de cargas. A primeira, denotada por R_{L1} , consiste em uma carga resistiva de $67,2 \Omega$. Já a segunda, representada pela carga $R_{L2} = 90 \Omega$, é adicionada em paralelo ao barramento da microrrede CC, resultando em uma carga equivalente de $R_L = 38,47 \Omega$.

A metodologia empregada para obtenção dos ganhos do controle PI implementados nas malhas de controle dos conversores está apresentada no apêndice D.

Tabela 4 - Especificações de simulação e experimental da microrrede CC.

Tensão eficaz nominal da rede elétrica	$V_S = 127 V$
Frequência nominal da rede elétrica	$f_S = 60 \text{ Hz}$
Tensão nominal da microrrede CC	$V_{MG} = 250 V$
Frequência de chaveamento dos conversores	$f_{sw} = 20 \text{ kHz}$
Taxa de amostragem	$f_a = 40 \text{ kHz}$
Impedâncias de linha	
Impedância de linha (barra 1)	$R_{l1} = 0,30 \Omega \quad L_{l1} = 1 \text{ mH}$
Impedância de linha (barra 2)	$R_{l2} = 0,15 \Omega \quad L_{l2} = 1,5 \text{ mH}$
Impedância de linha (barra 3)	$R_{l3} = 0,18 \Omega \quad L_{l3} = 2,5 \text{ mH}$

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 5 - Especificações de simulação e experimental dos conversores CC/CC e CA/CC da microrrede CC.

Conversor CA/CC bidirecional	
Indutor de acoplamento com a rede elétrica	$L_f = 1,5 \text{ mH}$
Resistência interna do indutor de acoplamento	$R_f = 0,21 \Omega$
Capacitância de saída	$C_{CIR} = 4795 \mu\text{F}$
Frequência de corte do FPB	$\omega_{FPB} = 188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Ganhos do controlador de tensão	$KP_{vi} = 0,1172 \quad KI_{vi} = -0,1172$
Ganhos do controlador de corrente	$KP_{ii} = 0,0218 \quad KI_{ii} = 0,0218$
Ganho do PWM	$K_{PWM}^i = \frac{2}{3750}$
Conversor CC/CC bidirecional	
Indutância	$L_{LB} = 1,5 \text{ mH}$
Resistência interna do indutor de acoplamento	$R_{LB} = 0,21 \Omega$
Capacitância de saída	$C_B = 560 \mu\text{F}$
Tensão nominal de entrada	$V_{S1} = V_{S2} = 125 \text{ V}$
Frequência de corte do FPB	$\omega_{FPB} = 188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Ganhos do controlador de tensão	$KP_{vi} = 0,1373 \quad KI_{vi} = -0,1373$
Ganhos do controlador de corrente	$KP_{ii} = 167,6553 \quad KI_{ii} = -164,2940$
Ganho PWM	$K_{PWM}^i = \frac{2}{3750}$
Conversor CC/CC com sistema fotovoltaico	
Indutância	$L_{LB} = 1,5 \text{ mH}$
Resistência interna do indutor de acoplamento	$R_{LB} = 0,21 \Omega$
Capacitância de saída	$C_{BPV} = 560 \mu\text{F}$
Capacitância de entrada	$C_{PV} = 470 \mu\text{F}$
Parâmetros do Sistema fotovoltaico em STC (Standard Test Conditions):	
Tensão em MPP (Maximum Power Point)	$V_{PV_MPP} = 154 \text{ V}$
Corrente em MPP	$I_{PV_MPP} = 7,9545 \text{ A}$
Potência em MPP	$P_{PV_MPP} = 1225 \text{ W}$
Resistência do arranjo fotovoltaico	$R_{PV} = 19,382 \Omega$
Ganhos do controlador de tensão	$KP_{vi} = 0,1373 \quad KI_{vi} = -0,1373$
Ganhos do controlador de corrente	$KP_{ii} = 167,6553 \quad KI_{ii} = -164,2940$
Ganho PWM	$K_{PWM}^i = \frac{2}{3750}$

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As validações das concepções teóricas são obtidas por meio de simulações computacionais realizadas no *software* MATLAB, ambiente *Simulink*, *toolbox TrueTime*, apresentado no Apêndice A. Este *toolbox* do *Simulink* permite validar e simular falhas de comunicação que podem ocorrer no sistema experimental. Para as simulações, com o objetivo de analisar o comportamento da estratégia de controle secundário e conseqüentemente da comunicação, são considerados duas condições de carga, bem como atrasos e falhas de comunicação nos três cenários descritos anteriormente na seção 6.2.

Para aumentar a semelhança com o sistema físico, é realizada uma discretização nos sistemas de aquisição de dados e controle, conforme apresentado no Apêndice D. Adicionalmente, são aplicados métodos de filtragem, como a média móvel (500 amostras), no processo de aquisição e processamento dos sinais (MITRA, 2006). Essas técnicas têm como objetivo reduzir o impacto de ruídos, garantindo melhoria no desempenho dos controladores.

A descrição das operações exploradas via simulação computacional será apresentada de forma sintetizada por meio de tabelas, onde são exploradas as etapas de operação no modo experimental. As situações que a microrrede será submetida estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Situações avaliadas na microrrede CC em estudo.

Condições	Descrição das condições
I	Carga R_{L1} em operação
II	Carga R_{L2} em operação
III	Controle por <i>droop</i>
IV	Controle secundário para desvio de tensão
V	Controle secundário para compartilhamento de corrente
VI	Comunicação entre B1 e B2 (CC/CC 1 e CC/CC 2)
VII	Comunicação entre B2 e CIR (CC/CC 2 e CA/CC)
VIII	Irradiância: 400 W/m ²
IX	Irradiância: 750 W/m ²
X	Operação das microrredes em modo ilhado

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 7 apresenta os parâmetros da rede de comunicação utilizados pela *toolbox* do *TrueTime*. Para avaliação da abordagem, foram considerados atrasos em cada canal de comunicação. A métrica de atraso da entrada para saída refere-se à latência do sistema de comunicação. No entanto, na prática, não foi viável mensurar esse parâmetro devido à alta taxa de amostragem do conversor AD.

Tabela 7 – Parâmetros de comunicação True Time.

Conversor CC/CC 1	
Período de amostragem	6,67 μ s
Atraso da entrada para saída (exectime)	0,02 μ s
Tempo de início para a tarefa 1 (<i>start time 1</i>)	0,01s
Tempo de início para a tarefa 2 (<i>start time 2</i>)	0,02 s
Tempo de início para a tarefa 3 (<i>start time 3</i>)	0,01 s
Conversor CC/CC 2	
Período de amostragem	6,67 μ s
Atraso da entrada para saída (exectime)	0,06 μ s
Tempo de início para a tarefa 1 (<i>start time 1</i>)	0,01 s
Tempo de início para a tarefa 2 (<i>start time 2</i>)	0,02 s
Tempo de início para a tarefa 3 (<i>start time 3</i>)	0,01 s
Conversor CA/CC	
Período de amostragem	6,67 μ s
Atraso da entrada para saída (exectime)	0,06 μ s
Tempo de início para a tarefa 1 (<i>start time 1</i>)	0,01s
Tempo de início para a tarefa 2 (<i>start time 2</i>)	0,02 s
Tempo de início para a tarefa 3 (<i>start time 3</i>)	0,01 s

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.1 Cenário 1: Controle primário

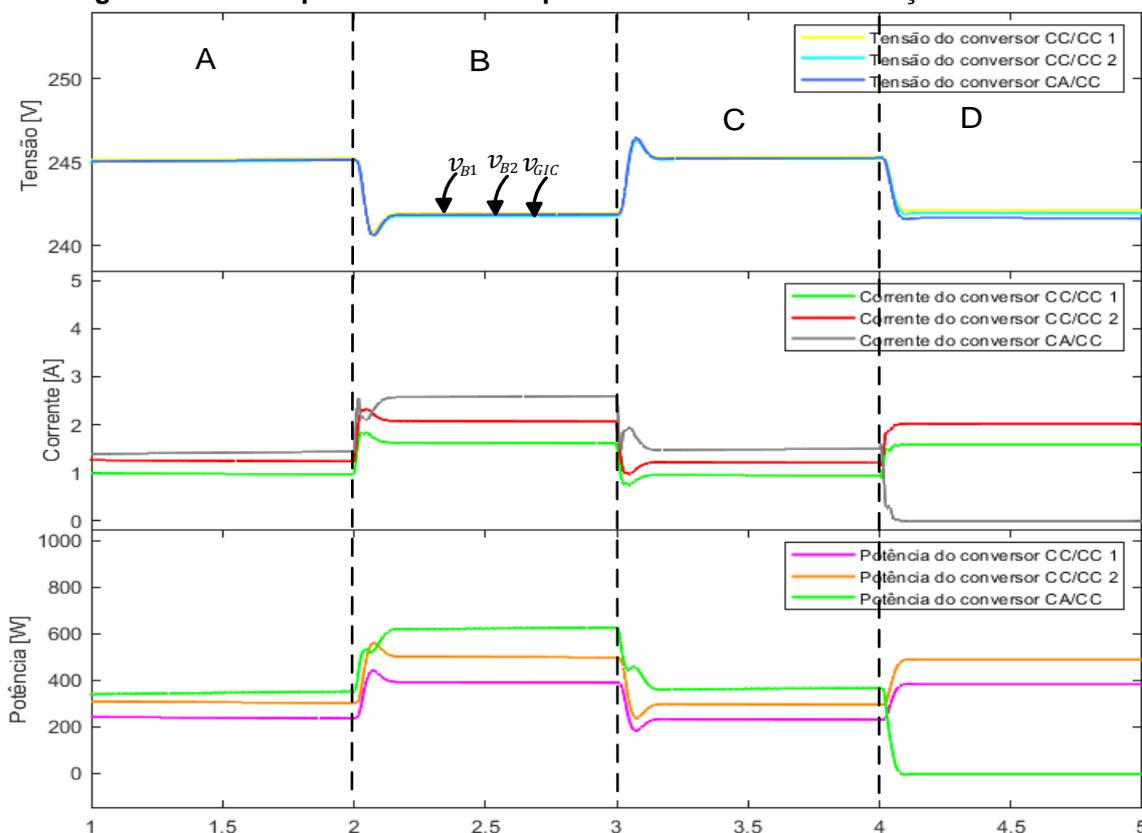
A descrição dos quatro modos de operação submetidos no controle primário do cenário 1 está disposta na Tabela 8, onde “1” representa a condição de operação habilitada e “0” desabilitada. A Figura 31 apresenta as formas de onda de tensão, corrente e potência na saída dos conversores.

Tabela 8 - Modos de operação controle primário: Cenário 1.

Condição	Modos de Operação			
	A	B	C	D
I	1	1	1	1
II	0	1	0	1
III	1	1	1	1
X	1	1	1	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 31 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 1.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A Figura 31 ilustra o compartilhamento de potência, no qual o conversor CIR tem a capacidade de fornecer energia adicional quando está operando. No entanto, quando é desconectado da rede elétrica CA, observa-se que os outros dois conversores CC/CC que compõem a rede assumem a carga. Apesar da igualdade nas resistências de *droop* dos conversores CC/CC, ainda existem diferenças nos níveis de energia fornecidos. O objetivo do controle secundário é justamente equilibrar essas discrepâncias. A Tabela 9 complementa essas informações, fornecendo valores numéricos obtidos em regime permanente para cada cenário operacional analisado.

Tabela 9 - Desempenho numérico do controle primário em regime permanente: Cenário 1.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	245,17	245,07	245,09	0,98	1,25	1,42	239,99	306,37	347,65
B	241,93	241,75	241,83	1,63	2,07	2,57	391,00	501,68	622,16
C	245,30	245,21	245,25	0,94	1,22	1,49	234,69	297,11	366,15
D	242,12	241,94	241,64	1,59	2,01	0,00	381,08	489,79	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 10 exibe o erro relativo entre os valores teóricos e os valores simulados obtidos em regime permanente para cada uma das operações analisadas no controle primário do cenário 1. Essa tabela fornece uma comparação quantitativa entre os resultados teóricos esperados e os resultados obtidos por meio de simulações, destacando a precisão e a concordância entre esses conjuntos de dados. O erro relativo é uma métrica importante para avaliar o quão próximos os resultados simulados estão das expectativas teóricas, fornecendo informações valiosas sobre a validade do modelo ou da simulação em questão.

Tabela 10 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 1.

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2} [\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,20	0,16	0,17	7,80	5,91	6,88	9,68	7,76	4,67
B	0,50	0,43	0,46	12,21	10,81	10,73	15,77	13,54	7,23
C	0,25	0,21	0,23	11,56	8,17	12,15	11,68	10,55	10,24
D	0,16	0,09	0,04	3,84	2,75	0,00	7,81	5,21	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.2 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em linha

Os resultados do controle secundário da microrrede CC neste cenário serão investigados, utilizando uma topologia de comunicação em linha. A microrrede CC passará por onze diferentes modos de operação descritos na Tabela 11, cada um apresentando características na sua configuração.

A Tabela 12 dispõe os valores numéricos, em regime permanente, para cada situação analisada nas Figuras 32 e 33.

Na Figura 32 é possível observar que na etapa C ocorre um compartilhamento de corrente mais eficiente entre os conversores CC/CC. No entanto, na Etapa H, há uma interrupção na comunicação entre os conversores, resultando novamente em disparidades nos níveis de energia fornecidos pelos formadores de rede. Quando a comunicação é restaurada, observa-se uma melhora no compartilhamento de recursos.

Tabela 11 - Modos de operação controle secundário: Cenário 1.

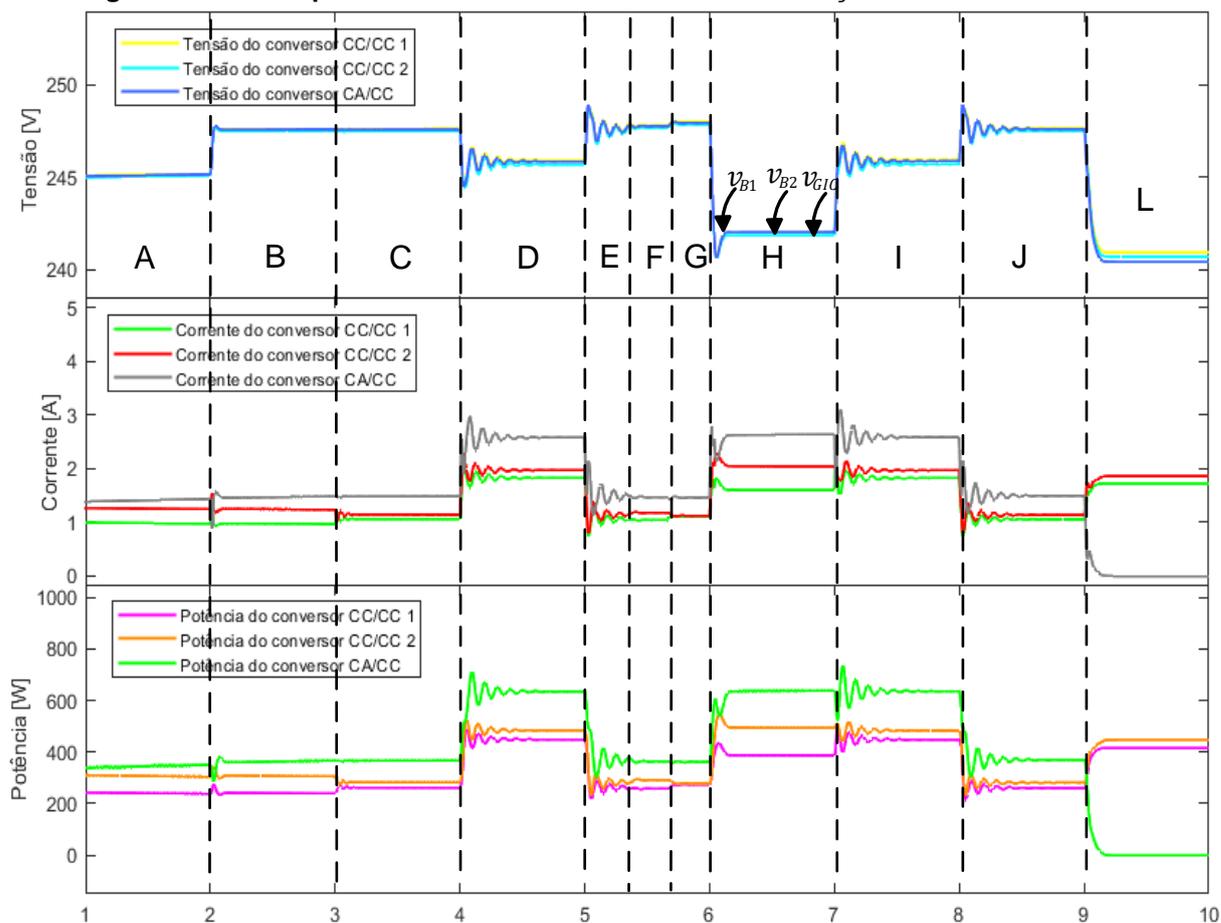
Condição	Modos de Operação										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
II	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IV	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VI	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
VII	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Através da Figura 33, é possível notar os ajustes nas resistências de *droop* e ajustes de tensão. Na Etapa G, ocorre uma perda temporária na comunicação entre os conversores. No entanto, como não há alterações significativas nos outros aspectos da operação, o sistema continua a funcionar adequadamente. Entretanto, em H, quando ocorre um aumento súbito na carga, os ajustes do controle secundário são afetados. Quando a comunicação é restaurada, esses ajustes voltam a funcionar conforme o planejado. Situação semelhante ocorre na Etapa L, onde, embora a comunicação seja mantida, a desconexão do sistema da rede elétrica leva os ajustes de tensão e resistência de *droop* à saturação.

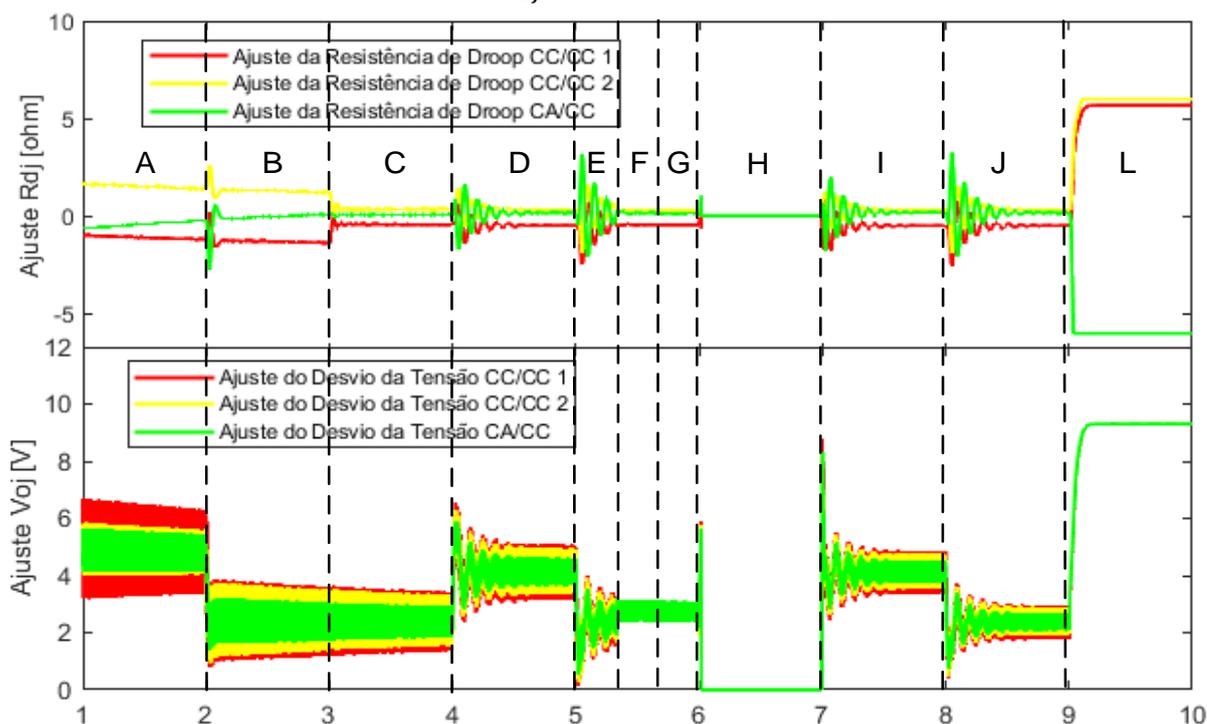
A Tabela 13 apresenta o resultado da discrepância entre os valores teóricos e aqueles obtidos por meio de simulação, como mostrados na Tabela 12.

Figura 32 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 1 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 33 - Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 1 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 12 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	245,16	245,05	245,12	0,98	1,25	1,41	240,52	306,97	345,70
B	247,61	247,51	247,59	0,97	1,24	1,47	240,87	307,42	363,19
C	247,64	247,49	247,59	1,06	1,14	1,48	262,31	282,51	366,73
D	245,99	245,74	245,91	1,82	1,96	2,60	446,93	481,72	639,22
E	248,08	247,93	248,02	1,08	1,14	1,47	266,32	283,30	365,06
F	248,01	247,86	247,95	1,06	1,15	1,48	261,28	283,22	370,21
G	248,08	247,93	248,02	1,08	1,14	1,47	266,32	283,30	365,06
H	242,03	241,85	242,02	1,60	2,04	2,63	387,43	494,37	637,18
I	245,96	245,71	245,87	1,83	1,98	2,57	448,65	483,98	635,93
J	247,63	247,48	247,58	1,06	1,14	1,48	263,01	283,50	365,39
L	240,93	240,69	240,41	1,72	1,86	0,00	415,43	448,34	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 13 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Linha.

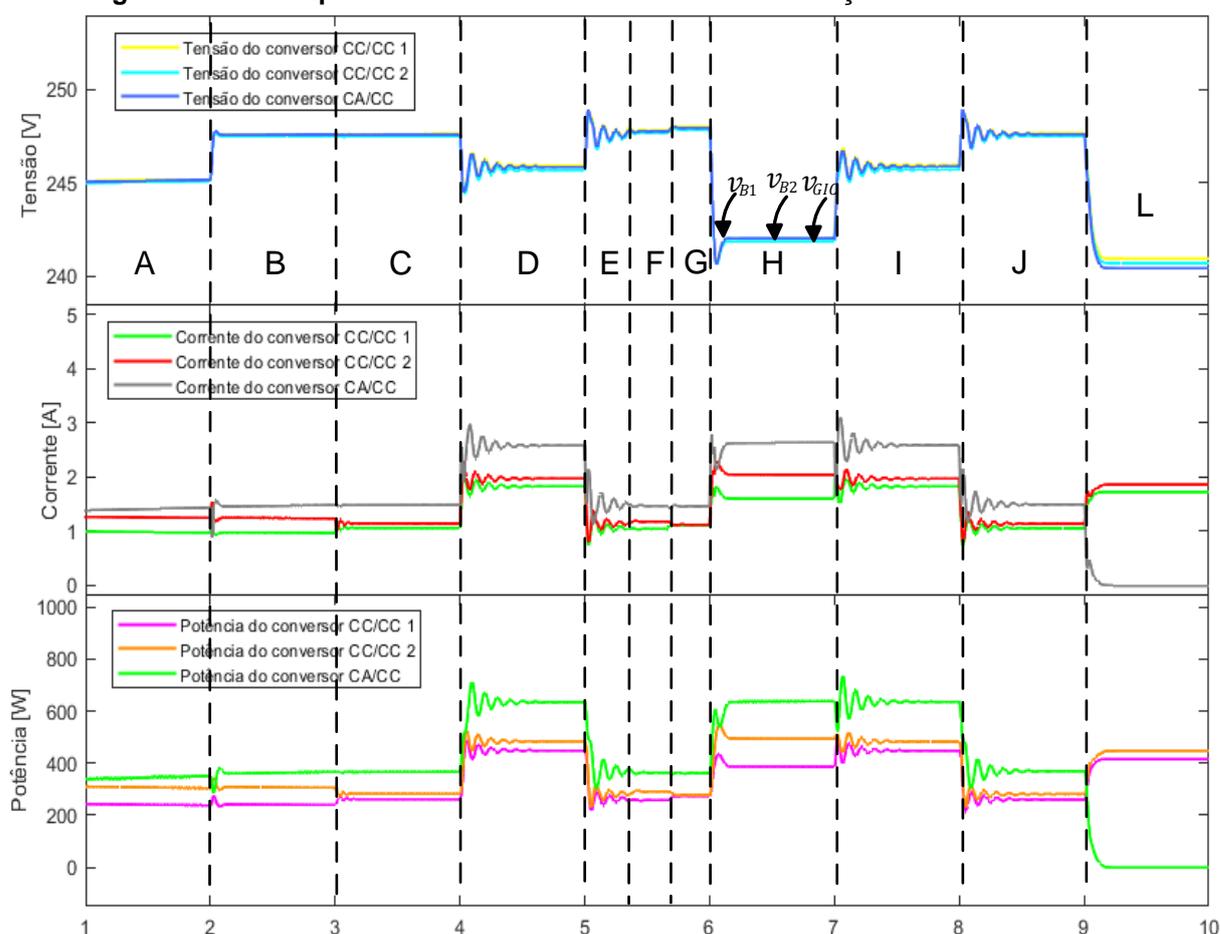
	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,19	0,15	0,18	12,19	12,00	5,25	11,93	12,41	5,06
B	0,96	1,00	0,96	13,09	11,10	1,22	13,67	10,18	2,37
C	0,94	1,00	0,96	5,02	2,14	0,54	5,99	1,25	1,42
D	1,60	1,70	1,64	6,65	0,53	0,02	8,30	1,16	1,64
E	0,77	0,83	0,79	3,23	2,14	1,22	4,55	1,53	1,87
F	0,80	0,86	0,82	5,02	3,04	0,54	6,36	1,51	0,49
G	0,77	0,83	0,79	3,23	2,14	1,22	4,55	1,53	1,87
H	0,55	0,47	0,54	13,83	12,10	13,32	13,32	11,51	14,05
I	1,62	1,72	1,65	6,13	1,56	1,13	7,95	0,70	2,14
J	0,95	1,01	0,97	5,02	2,14	0,54	5,74	1,61	1,78
L	3,63	3,72	3,84	0,93	7,14	0,00	4,28	3,30	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.3 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em anel

Na sequência, na Tabela 14 serão dispostos os resultados obtidos em simulação computacional para avaliação do controle secundário da microrrede CC empregando a topologia de comunicação em anel. A microrrede CC foi submetida as mesmas condições operacionais que nos resultados anteriores da comunicação em linha. A Figura 34 apresenta o desempenho de cada operação, enquanto a Figura 35 apresenta os ajustes da resistência de *droop* e desvio de tensão do barramento CC.

Figura 34 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 1 - Anel.



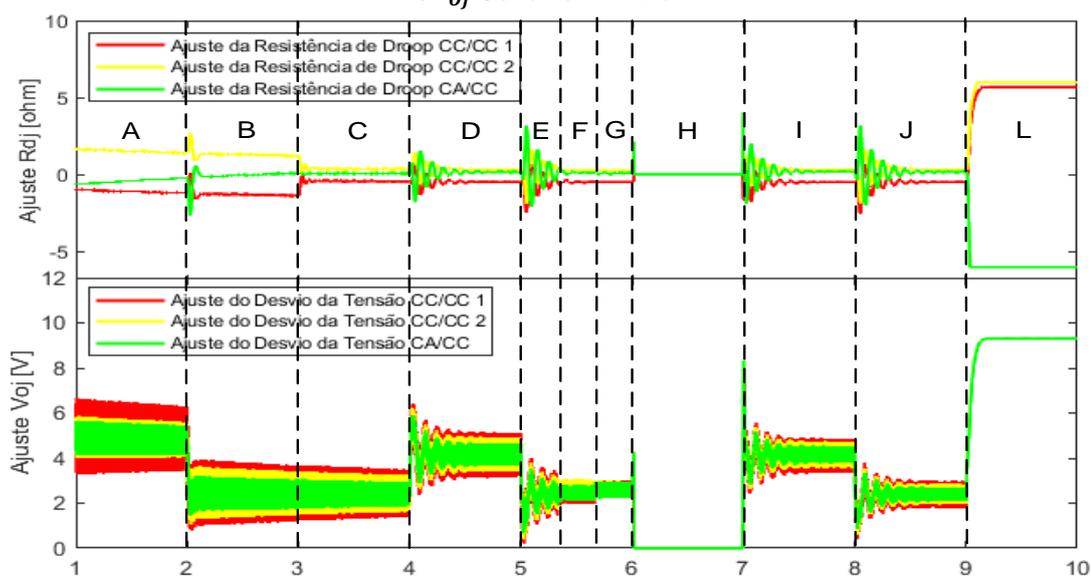
Fonte: Autoria Própria (2023).

Da mesma forma que na configuração de comunicação em linha, na configuração em anel para o cenário 1, observa-se um eficaz compartilhamento de potência entre os conversores quando o controle secundário está habilitado e não ocorrem falhas de comunicação. Assim como na Figura 32 quando ocorre a perda total de comunicação na etapa (H), o controle secundário não atua mais na equalização das potências, porém ao restabelecer a comunicação o compartilhamento é reestabelecido.

Mais uma vez, é possível observar que a falta de comunicação afeta o ajuste do desvio de tensão e a resistência de *droop* durante a etapa (H), assim como durante o ilhamento da microrrede, ambos os ajustes entram em saturação.

Na Tabela 15 é exposto o erro relativo entre os valores teóricos e os obtidos através de simulação, conforme demonstrado na Tabela 14.

Figura 35 - Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 1 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 14 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	245,16	245,05	245,12	0,98	1,25	1,41	240,52	306,97	345,70
B	247,61	247,51	247,59	0,97	1,24	1,47	240,87	307,42	363,27
C	247,64	247,49	247,59	1,06	1,14	1,48	262,28	282,59	366,74
D	245,99	245,73	245,90	1,82	1,97	2,59	447,13	481,92	638,89
E	248,02	247,86	247,96	1,10	1,13	1,46	270,12	284,96	358,82
F	247,78	247,64	247,72	1,05	1,19	1,45	260,44	290,67	361,98
G	248,02	247,86	247,96	1,10	1,13	1,46	270,12	284,96	358,82
H	242,03	241,85	242,02	1,60	2,04	2,63	387,42	494,36	637,19
I	245,97	245,71	245,88	1,83	1,98	2,57	448,33	483,83	636,42
J	247,63	247,48	247,58	1,06	1,14	1,48	262,80	283,46	365,64
L	240,93	240,69	240,41	1,72	1,86	0,00	415,43	448,34	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 15 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Anel.

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2} [\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,19	0,15	0,18	12,19	12,00	5,25	11,93	12,41	5,06
B	0,96	1,00	0,96	13,09	11,10	1,22	13,67	10,18	2,35
C	0,94	1,00	0,96	5,02	2,14	0,54	6,00	1,28	1,42
D	1,60	1,71	1,64	6,65	1,05	0,36	8,26	1,12	1,69
E	0,79	0,86	0,82	1,44	1,25	1,89	3,19	2,13	3,55
F	0,89	0,94	0,91	5,92	6,62	2,56	6,66	4,18	2,70
G	0,79	0,86	0,82	1,44	1,25	1,89	3,19	2,13	3,55
H	0,55	0,47	0,54	13,83	12,10	13,32	13,32	11,51	14,05
I	1,61	1,72	1,65	6,13	1,56	1,13	8,01	0,73	2,07
J	0,95	1,01	0,97	5,02	2,14	0,54	5,81	1,59	1,72
L	3,63	3,72	3,84	0,93	7,14	0,00	4,28	3,30	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.4 Cenário 2: Controle primário

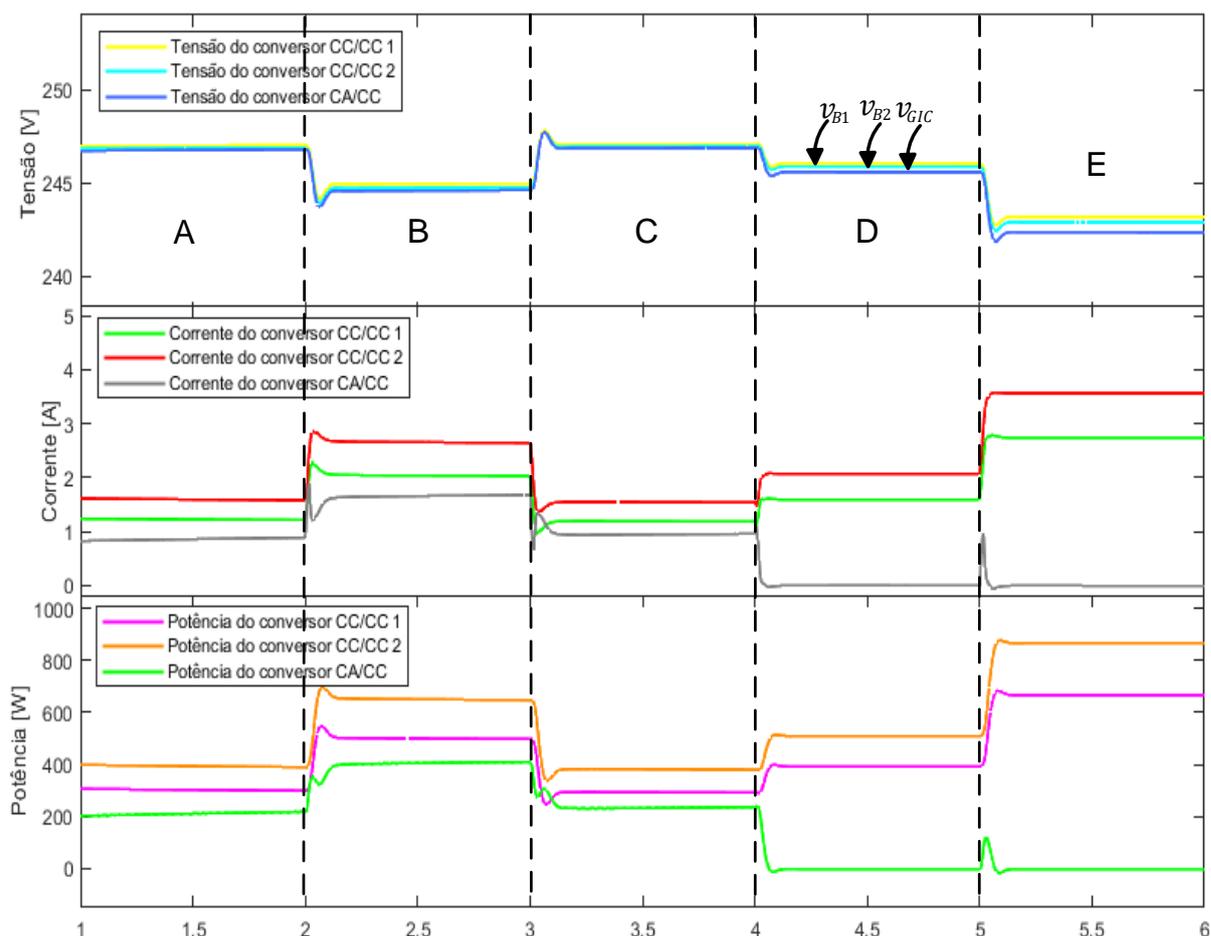
O Cenário 2 faz uso da configuração 2. Os cinco modos de operações estão apresentados na Tabela 16. Os resultados dessas condições estão representados na Figura 36 em que as formas de tensão, corrente e potência da saída dos conversores estão dispostas.

Tabela 16 - Modos de operação controle primário: Cenário 2.

Condição	Modos de Operação				
	A	B	C	D	E
I	1	1	1	1	1
II	0	1	0	1	0
III	1	1	1	1	1
X	1	1	1	0	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 36 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 2.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados do cenário 2 indicam uma maior priorização dos conversores CC/CC, reduzindo a dependência da rede elétrica CA. Quando apenas o controle primário é utilizado, o conversor CC/CC 2 é responsável por fornecer uma proporção maior de energia. Os resultados numéricos da simulação para cada condição em estudo estão resumidos na Tabela 17.

Tabela 17 - Desempenho numéricos em regime permanente do controle primário do cenário 2.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	247,01	246,88	246,77	1,22	1,59	0,86	302,26	393,48	211,28
B	244,96	244,75	244,60	2,04	2,66	1,66	499,52	650,00	405,18
C	247,08	246,96	246,87	1,19	1,55	0,94	293,20	381,67	232,69
D	246,07	245,90	245,59	1,59	2,07	0,00	391,40	509,38	0,00
E	243,19	242,90	242,37	2,74	3,57	0,00	666,16	866,53	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 18 apresenta a discrepância relativa entre os valores teóricos e as observações simuladas, em estado estacionário, referentes às distintas operações submetidas à análise no âmbito do controle primário do cenário 2.

Tabela 18 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 2.

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2} [\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,01	0,04	0,09	1,11	5,42	14,47	0,21	4,36	15,95
B	0,09	0,01	0,05	3,21	0,97	5,49	5,20	1,31	7,72
C	0,04	0,01	0,05	1,37	2,77	6,51	2,80	1,22	7,43
D	0,08	0,01	0,11	3,84	0,15	0,00	5,31	1,42	0,00
E	0,17	0,05	0,17	5,13	1,12	0,00	7,74	3,99	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.5 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em linha

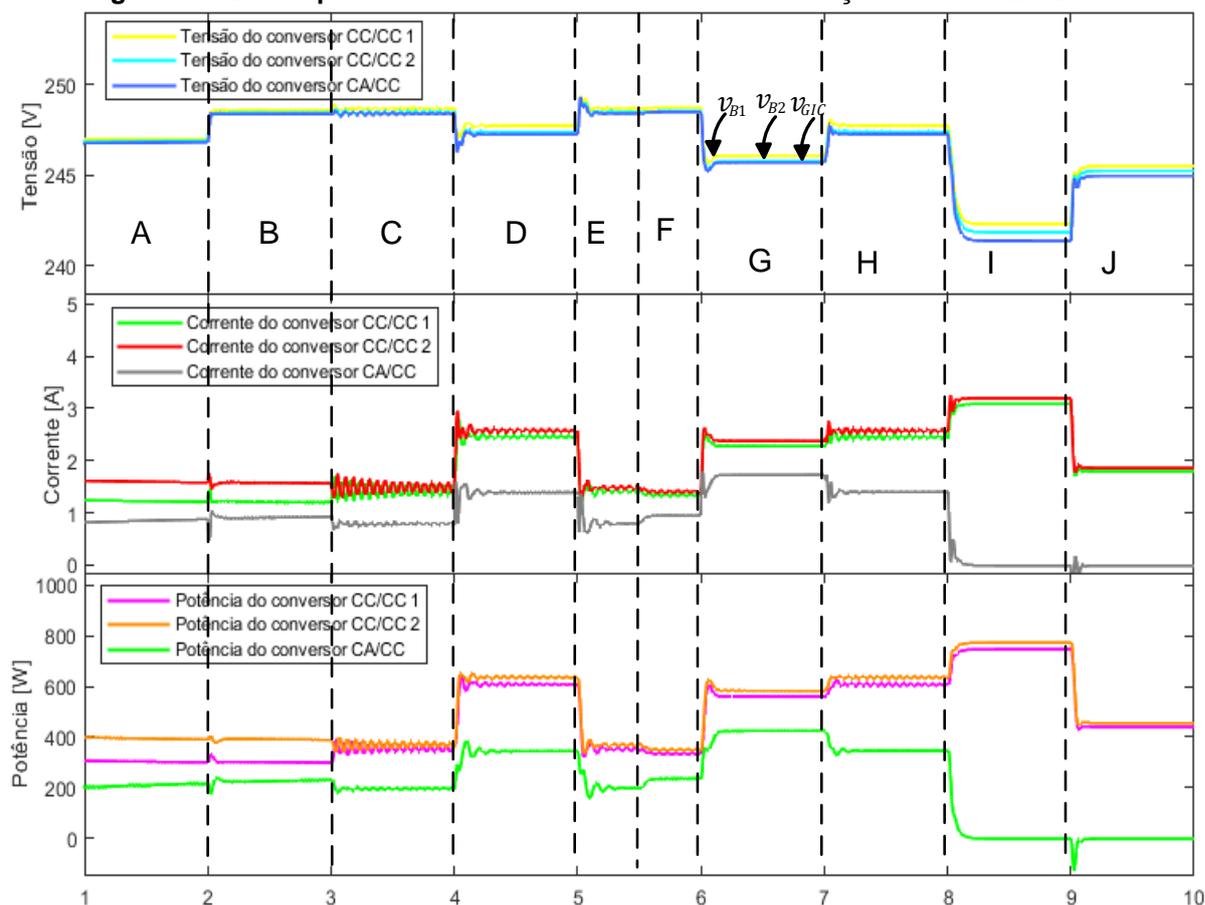
Os próximos resultados de simulação apresentados serão referentes ao controle secundário. Inicialmente será avaliado a topologia de comunicação em linha. A microrrede CC em estudo será submetida sob dez modos de operação, que estão dispostos na Tabela 19. A Figura 37 apresenta o desempenho de controle considerando os modos de operação. O ajuste da resistência de *droop* e ajuste do desvio de tensão do barramento CC está disposto na Figura 38.

Tabela 19 - Modos de operação controle secundário: Cenário 2.

Condição	Modo de Operação									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
II	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IV	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
VI	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VII	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
X	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 37 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 2 - Linha.

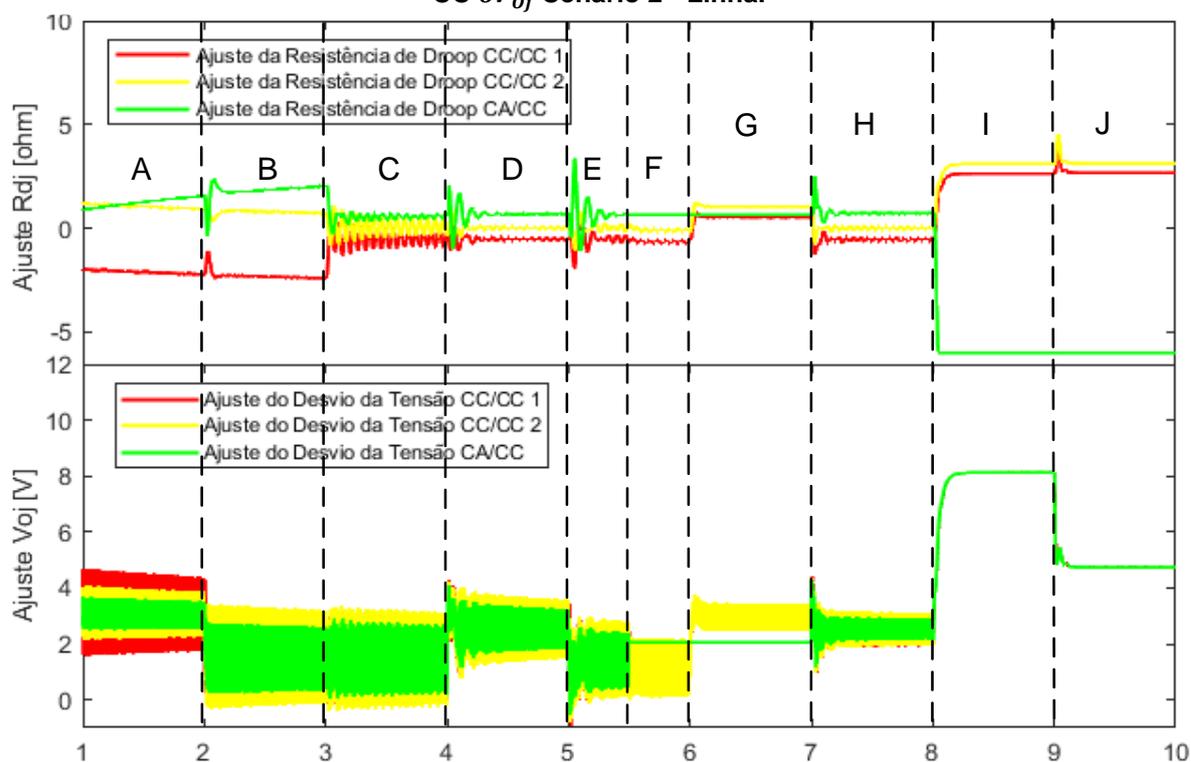


Fonte: Autoria Própria (2023).

Na Tabela 3, foi estabelecido que durante o cenário 2, os conversores CC/CC devem contribuir com uma quantidade maior de energia para o sistema. Inicialmente, o conversor CC/CC 1 fornece a maior parte da energia quando o sistema opera apenas com o controle primário. Quando o controle de compartilhamento de potência é ativado em (C), as potências fornecidas pelos conversores CC/CC se aproximam dos valores especificados na tabela mencionada, a Tabela 20. Quando a rede elétrica CA é desconectada, os conversores CC/CC formadores de rede individualmente fornecem praticamente metade da potência necessária para a carga.

A Tabela 21 apresenta os desvios observados em comparação com os valores teóricos em cada etapa simulada do cenário 2 com topologia de comunicação em linha.

Figura 38 - Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 2 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 20 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	247,00	246,88	246,79	1,23	1,60	0,85	302,62	393,92	209,82
B	248,56	248,44	248,37	1,21	1,58	0,91	300,89	391,90	225,22
C	248,69	248,54	248,43	1,31	1,60	0,78	361,45	364,11	192,95
D	247,72	247,38	247,24	2,46	2,57	1,39	612,12	632,44	343,97
E	248,70	248,51	248,40	1,42	1,51	0,76	363,40	369,77	185,60
F	248,72	248,53	248,49	1,35	1,41	0,94	331,84	352,33	234,86
G	246,08	245,75	245,70	2,28	2,38	1,72	560,55	583,81	423,67
H	247,75	247,38	247,26	2,48	2,54	1,40	603,78	639,73	345,39
I	242,29	241,84	241,36	3,08	3,20	0,00	747,12	773,16	0,00
J	245,51	245,25	244,97	1,80	1,86	0,00	440,71	456,15	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 21 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Linha.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,01	0,04	0,08	1,94	6,09	15,46	1,55	5,75	15,51
B	0,23	0,18	0,15	0,28	4,76	9,50	0,56	4,78	9,68
C	0,28	0,22	0,18	11,97	7,52	4,83	2,05	1,33	4,57
D	0,50	0,36	0,31	5,36	1,13	6,95	4,46	1,29	7,37
E	0,29	0,21	0,17	4,58	1,47	2,14	1,53	0,20	0,59
F	0,29	0,22	0,20	9,28	5,25	6,51	10,08	4,53	5,81
G	0,55	0,42	0,40	8,18	9,66	2,07	6,38	11,36	3,51
H	0,51	0,36	0,31	4,59	2,29	7,72	5,77	0,16	7,81
I	1,18	1,36	1,56	5,21	1,52	0,00	3,47	14,34	0,00
J	0,70	0,81	0,92	3,23	0,01	0,00	6,62	11,72	0,00

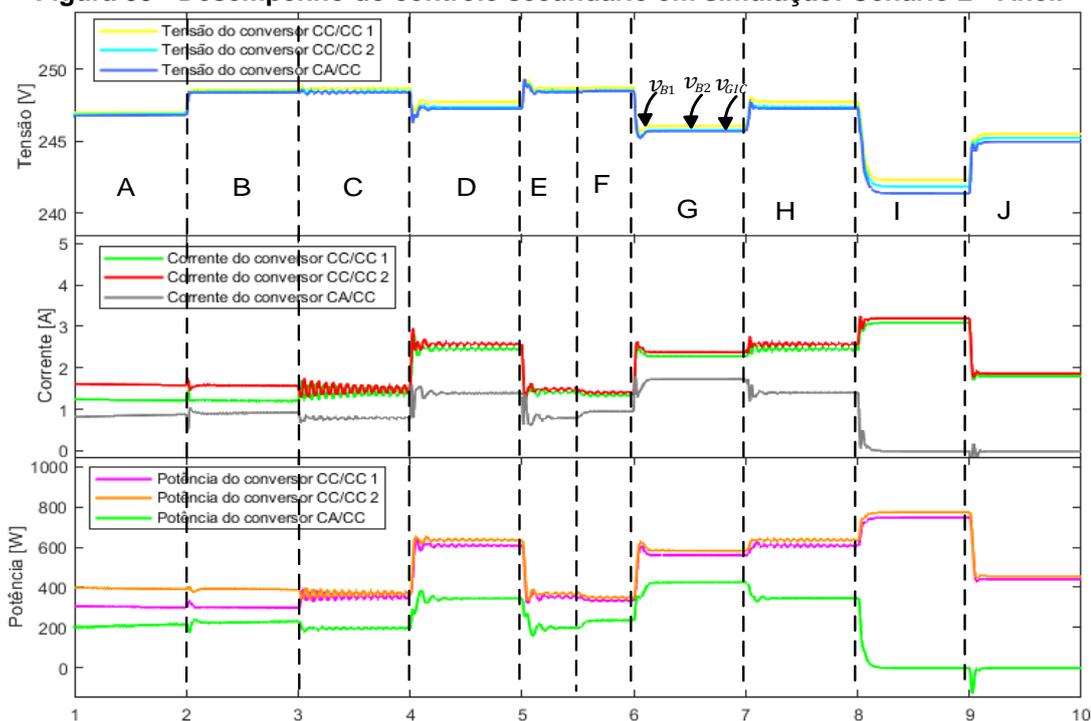
Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.6 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em anel

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na topologia de comunicação em anel. A Figura 39 apresenta a dinâmica de resultados de tensão, corrente e potência da saída dos conversores.

O ajuste da resistência de *droop* e ajuste do desvio de tensão do barramento CC está disposto na Figura 40.

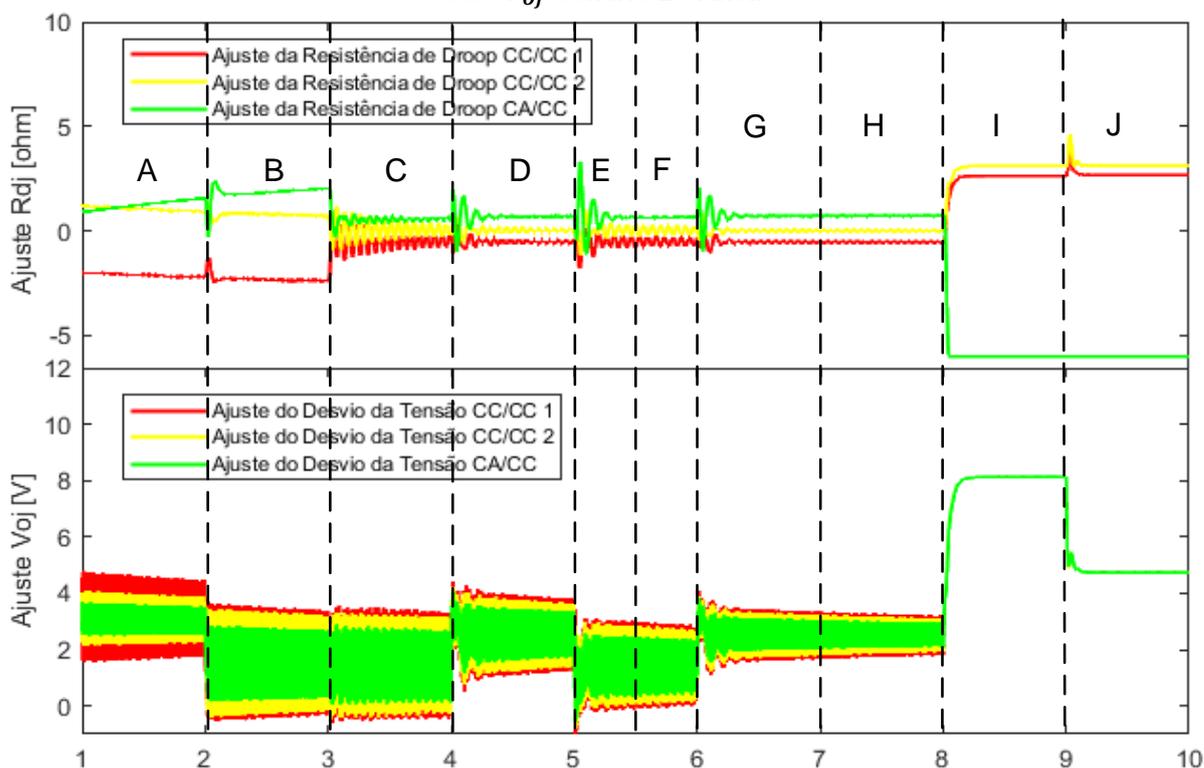
Figura 39 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 2 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

É observado que o controle secundário melhora o compartilhamento de potência dos conversores formadores de rede, porém podem ocorrer oscilações, principalmente quando o controle é ativado pela primeira vez, na etapa (C).

Figura 40 - Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 2 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Quando ocorre uma falha de comunicação na topologia em anel, o controle secundário continua operando, como observado nas etapas (F) e (G). Essa falha de comunicação faz com que a rede de comunicação opere de forma semelhante à configuração em linha. Os valores numéricos em regime permanente para cada situação analisada estão na Tabela 22, já os erros obtidos entre os valores teóricos estão expostos na Tabela 23.

Tabela 22 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	247,00	246,88	246,79	1,23	1,60	0,85	302,62	393,92	209,82
B	248,56	248,44	248,37	1,21	1,57	0,91	300,95	391,92	225,17
C	248,67	248,51	248,44	1,31	1,59	0,80	350,19	375,88	192,52
D	247,72	247,39	247,24	2,40	2,63	1,38	607,38	637,67	343,47
E	248,69	248,52	248,41	1,39	1,54	0,77	366,17	366,83	185,81
F	248,70	248,49	248,42	1,41	1,49	0,80	345,58	375,39	197,72
G	247,74	247,38	247,25	2,48	2,55	1,39	606,93	636,21	345,67
H	247,74	247,39	247,26	2,44	2,58	1,40	607,29	636,15	345,43
I	242,29	241,84	241,36	3,08	3,20	0,00	747,12	773,16	0,00
J	245,51	245,25	244,97	1,80	1,86	0,00	440,70	456,15	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 23 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 2 – Anel.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,01	0,04	0,08	1,94	6,09	15,46	1,55	5,75	15,51
B	0,23	0,18	0,15	0,28	4,10	9,50	0,58	4,79	9,70
C	0,27	0,21	0,18	11,97	6,85	7,52	5,11	1,86	4,34
D	0,50	0,37	0,31	7,67	1,18	6,18	5,20	0,48	7,21
E	0,28	0,21	0,17	6,59	3,49	3,49	0,78	0,60	0,70
F	0,29	0,20	0,17	5,25	0,13	20,44	6,35	1,72	20,70
G	1,23	1,08	1,03	17,67	3,21	20,86	15,19	3,41	21,28
H	0,51	0,37	0,31	6,13	0,75	7,72	5,22	0,71	7,82
I	1,18	1,36	1,56	5,21	1,52	0,00	3,47	14,34	0,00
J	0,70	0,81	0,92	3,23	0,01	0,00	6,61	11,72	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.7 Cenário 3: Controle primário

Este cenário faz uso da configuração 2. Conforme já apresentada, emprega um conversor de interface CA/CC, um conversor bidirecional CC/CC operando em *droop* e um conversor CC/CC controlado em corrente, operando em MPPT fornecendo

a potência máxima disponível. Serão ilustrados os resultados do controle primário e secundário usando ambas as topologias de comunicação (anel e linha).

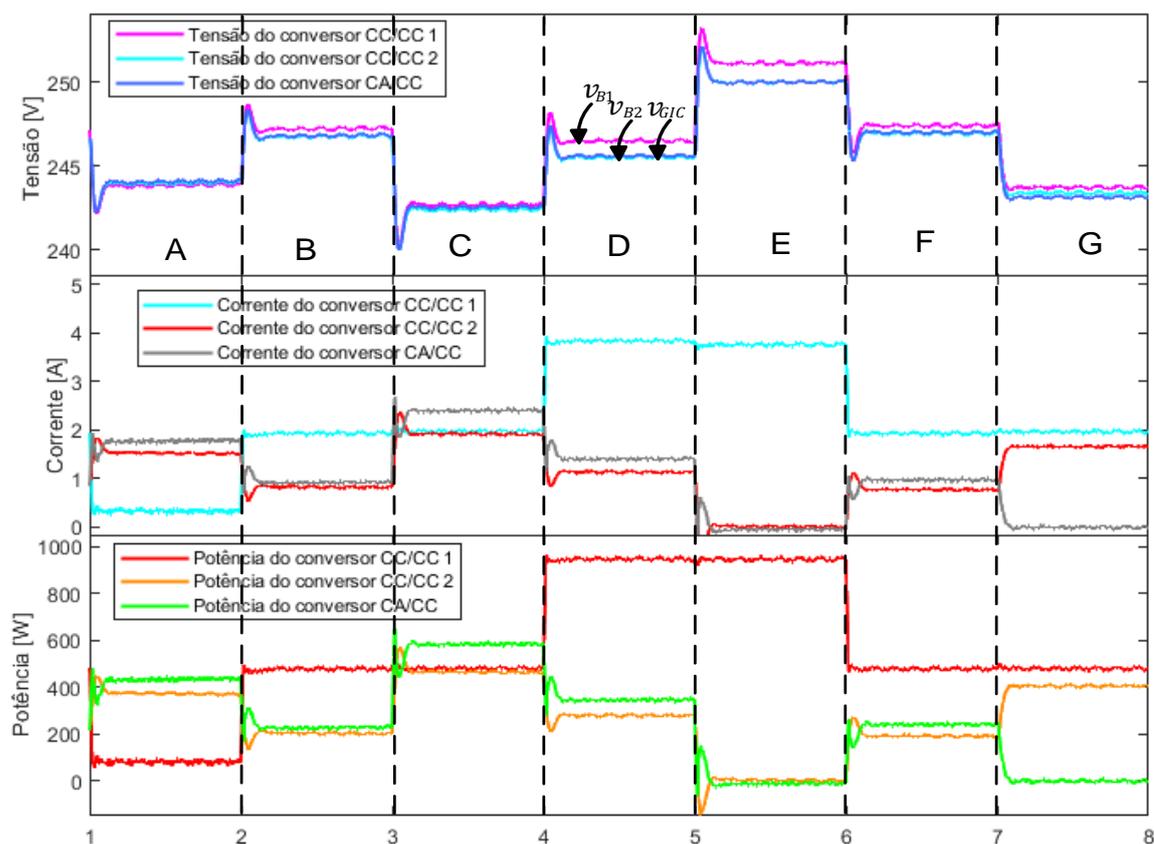
Os modos de operações que a microrrede CC estão representadas pela sequência lógica disposta na Tabela 24. Os resultados dinâmicos da tensão, corrente e potência da saída dos conversores estão exibidos na Figura 41 e os valores em regime permanente para cada modo estão indicados na Tabela 25.

Tabela 24 - Modos de operação controle primário: Cenário 3.

Condição	Modos de Operação							
	A	B	C	D	E	F	G	
I	1	1	0	0	1	1	1	
II	0	0	1	1	0	0	0	
III	1	1	1	1	1	1	1	
VIII	0	1	1	0	0	1	1	
IX	0	0	0	1	1	0	0	
X	1	1	1	1	1	1	0	

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 41 - Desempenho do controle primário baseado em simulação: Cenário 3.



Fonte: Autoria Própria (2023).

No cenário 3, são utilizados dois conversores formadores de rede e um conversor seguidor de rede, que transfere o máximo de sua energia para o barramento. Isso pode ser observado na situação (B), quando ocorre um degrau na irradiância de 0 para 400 W/m^2 . Nesse momento, a energia fornecida pelos conversores formadores de rede é reduzida para se adequar à carga.

Em seguida, na etapa (D), ocorre um novo degrau na irradiância, aumentando de 400 W/m^2 para 750 W/m^2 . Isso resulta em outra redução na potência fornecida pelos conversores formadores de rede. Durante o degrau de carga na etapa (E), a energia gerada pelo arranjo FV é capaz de suprir praticamente toda a potência exigida.

Com a redução da irradiância na etapa (F), os conversores formadores de rede voltam a fornecer uma parcela mais significativa de potência. Por fim, quando o sistema é isolado da rede elétrica, a potência do conversor formador de rede restante é ajustada para atender à demanda da carga.

A Tabela 25 mostra os resultados do controle primário em regime permanente para o cenário 3 e na sequência a Tabela 26 exibe os erros obtidos entre os desempenhos numéricos obtidos.

Tabela 25 - Desempenho numéricos em regime permanente do controle primário do cenário 3.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	243,85	243,97	244,05	0,34	1,52	1,76	82,91	370,83	429,53
B	247,20	246,75	246,79	1,93	0,83	0,91	477,10	204,80	224,58
C	242,68	242,38	242,53	1,97	1,91	2,41	478,08	462,95	584,50
D	246,54	245,56	245,64	3,84	1,12	1,41	946,71	275,03	346,35
E	251,11	249,98	249,97	3,77	0,02	0,00	946,68	5,00	0,00
F	247,41	246,94	247,00	1,92	0,77	0,98	475,03	190,14	242,06
G	243,69	243,35	243,09	1,97	1,67	0,00	480,07	406,39	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 26 - Erros obtidos por meio de simulação do controle primário em regime permanente: Cenário 3

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2}[\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,09	0,14	0,18	0,00	4,67	17,21	0,00	6,97	19,18
B	0,09	0,09	0,08	1,53	10,02	9,53	2,63	8,59	10,69
C	0,19	0,07	0,13	0,51	1,80	7,07	2,43	4,80	9,85
D	1,38	0,16	0,20	4,49	7,45	12,61	3,04	9,09	14,14
E	0,44	0,02	0,02	2,59	3,16	0	3,04	3,16	0
F	0,17	0,02	0,01	2,04	2,07	2,57	3,06	0,82	3,74
G	2,52	0,16	2,73	0,51	5,13	0,00	2,03	7,65	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.3.8 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em linha

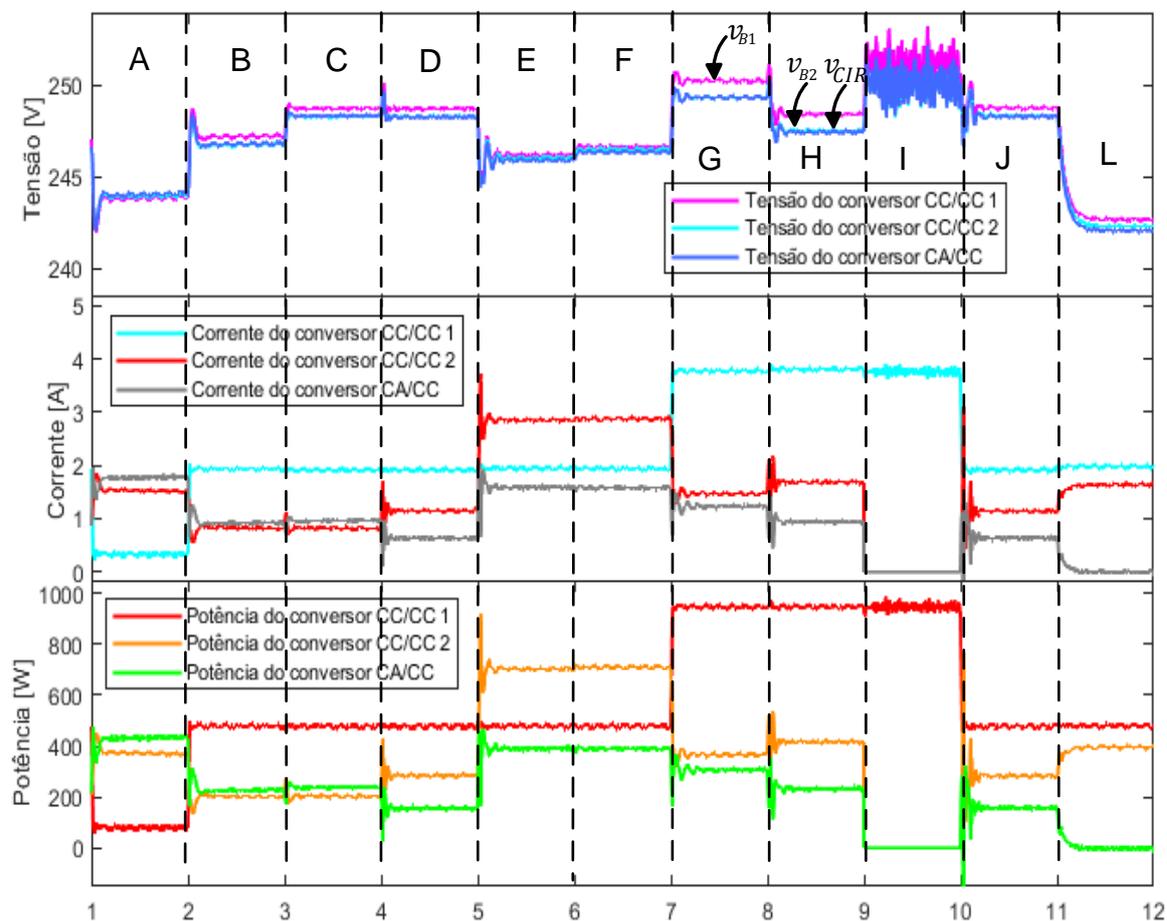
A seguir serão apresentados os resultados da implementação do controle secundário. Primeiramente, os resultados obtidos empregando a topologia em linha, as sequências dos modos de operação podem ser visualizadas na Tabela 27. Na sequência, na Figura 42 é mostrado o comportamento das grandezas de corrente, tensão e potência da saída dos conversores que compõem a microrrede CC. O ajuste da resistência de *droop* e do desvio de tensão do barramento CC estão apresentados na Figura 43, e por fim, os valores obtidos em regime permanente estão consolidados na Tabela 28.

Tabela 27 - Modos de operação controle secundário: Cenário 3.

Condição	Modos de Operação										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
I	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
II	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IV	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
VI	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VII	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
VIII	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
IX	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 42 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 3 - Linha.



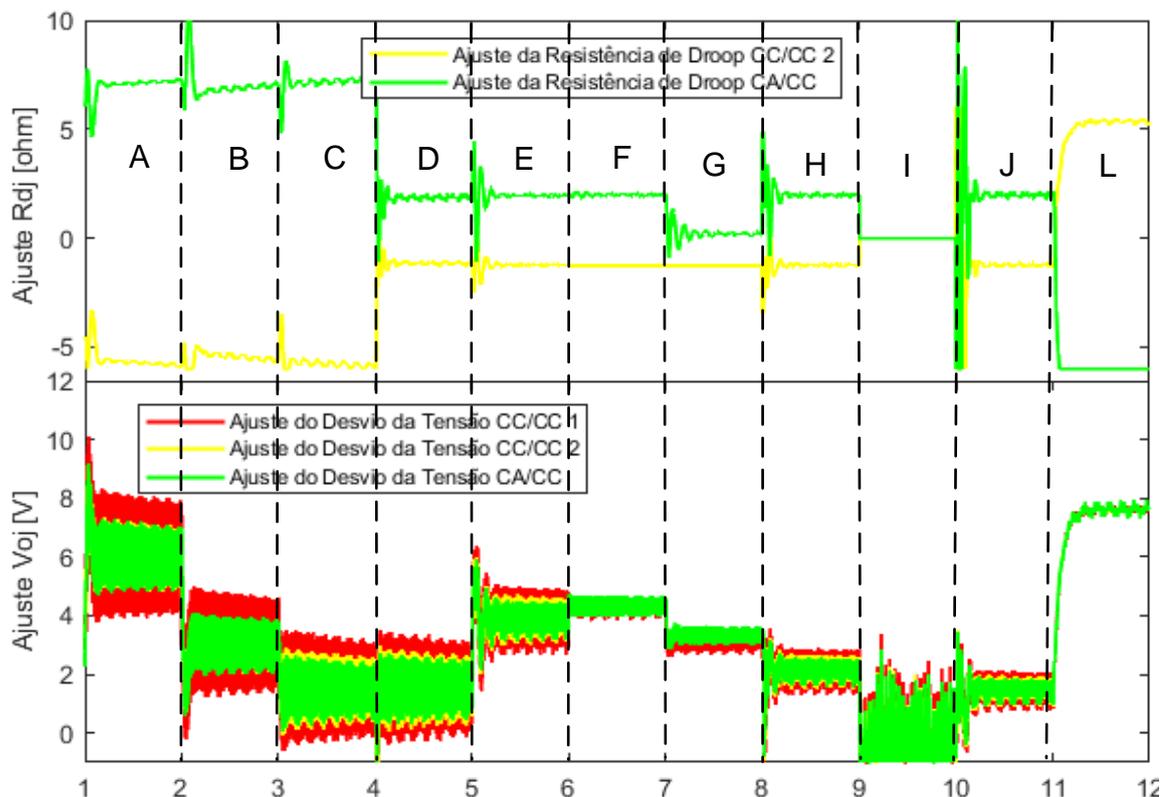
Fonte: Autoria Própria (2023).

O controle secundário implementado neste cenário prioriza o uso de recursos internos ao invés da rede elétrica CA, como pode ser observado a partir da etapa (D), quando o controle de compartilhamento de corrente/potência entra em operação. Além disso, um sistema de geração fotovoltaica é empregado, fornecendo a máxima potência possível para a microrrede.

Na etapa (F), uma falha de comunicação não altera imediatamente os níveis de potência dos conversores formadores de rede, pois o sistema estava operando em regime. No entanto, na etapa seguinte, ocorre uma variação na microrrede, com um aumento na energia proveniente do sistema fotovoltaico. Isso resulta em um compartilhamento de potência entre os formadores de rede que difere do esperado, ou seja, a potência do conversor CA/CC é maior do que o desejado, enquanto a potência do conversor CC/CC é menor.

Na etapa (H), a comunicação é restabelecida, ajustando os níveis de potência conforme o esperado.

Figura 43 - Ajuste da resistência de *droop* δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 3 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Observa-se uma notável oscilação nos ajustes da resistência de droop, especialmente durante a transição da etapa (I) para a etapa (J). Isso ocorre quando o sistema fotovoltaico estava fornecendo praticamente toda a potência, enquanto os formadores de rede estavam ociosos, para o momento em que os formadores voltam a operar.

Em termos gerais, o ajuste da resistência de *droop* tem o propósito simultâneo de reduzir a potência fornecida pela interface CA/CC, por meio de um aumento positivo na resistência, e aumentar a contribuição do formador de rede CC/CC, diminuindo sua resistência.

Tabela 28 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	243,81	243,95	244,05	0,32	1,53	1,77	78,90	373,41	433,16
B	247,20	246,75	246,79	1,93	0,83	0,91	477,97	204,57	224,55
C	248,75	248,30	248,33	1,91	0,83	0,95	475,50	206,63	236,36
D	248,74	248,34	248,30	1,92	1,15	0,63	477,46	284,82	156,20
E	246,19	246,04	245,89	1,94	2,85	1,60	476,52	701,86	392,36
F	246,67	246,52	246,37	1,94	2,88	1,58	478,04	709,33	389,47
G	250,32	249,40	249,41	3,78	1,45	1,25	946,93	360,47	311,46
H	248,42	247,53	247,46	3,81	1,68	0,94	947,61	414,85	231,83
I	250,91	249,84	249,63	3,83	0,00	0,00	962,01	0,00	0,00
J	248,76	248,35	248,29	1,91	1,14	0,64	475,69	283,65	159,22
L	242,66	242,31	242,07	1,98	1,65	0	479,83	399,01	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 29 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Linha.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,08	0,13	0,18	0,00	4,04	16,74	0,00	3,87	16,36
B	0,09	0,09	0,08	1,53	10,02	9,53	1,26	9,79	9,61
C	1,29	0,28	0,27	2,55	10,02	5,55	3,73	10,00	5,63
D	1,30	0,26	0,28	2,04	6,67	19,30	3,34	7,16	18,80
E	3,53	0,55	0,61	1,02	10,29	17,51	4,73	10,71	16,48
F	3,34	0,36	0,42	1,02	9,35	16,04	4,42	9,76	15,62
G	1,15	0,41	0,41	2,86	26,64	47,57	1,75	26,57	48,03
H	1,90	0,34	0,37	3,67	15,00	10,97	1,83	15,50	10,18
I	0,34	0,05	0,14	4,22	0,00	0,00	4,69	0,00	0,00
J	1,29	0,26	0,28	2,55	7,48	21,20	3,70	7,55	21,09
L	3,84	1,22	4,07	1,02	6,26	0,00	2,99	7,59	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

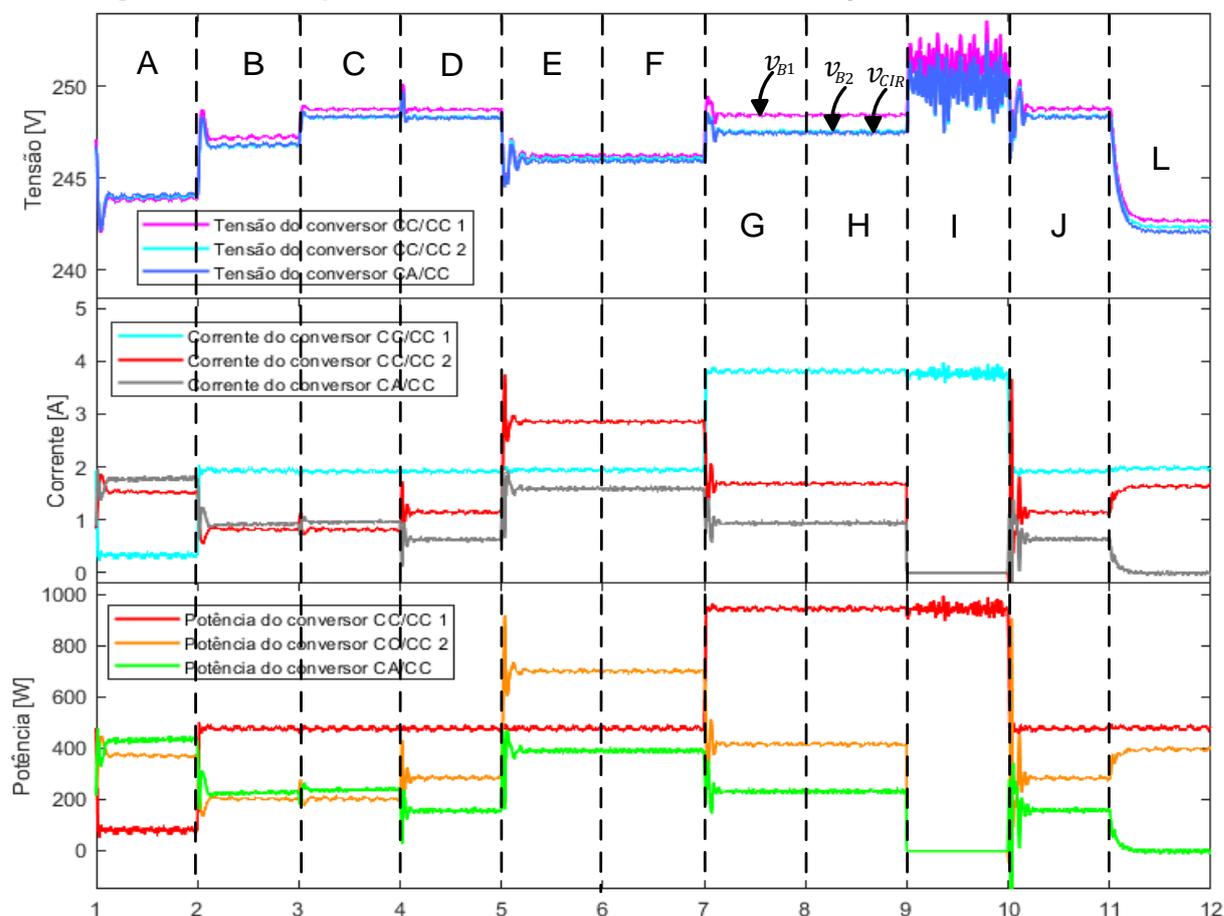
6.3.9 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em anel

Por fim, serão dispostos os resultados obtidos empregando a topologia de comunicação em anel para o controle secundário. Os modos de operações foram os mesmos da Tabela 27. A Figura 44 exibe o desempenho dinâmico da microrrede

considerando as grandezas de saída dos conversores, tais como tensão, corrente e potência.

A robustez da comunicação na configuração em anel, em comparação com a configuração em linha, é evidenciada na Figura 44. Durante a etapa (F), ocorre uma falha na comunicação que é completamente restabelecida na etapa (H). No entanto, é importante notar que essa falha na comunicação não resulta em alterações significativas nos níveis de energia quando se utiliza a configuração em anel.

Figura 44 - Desempenho do controle secundário em simulação: Cenário 3 - Anel.

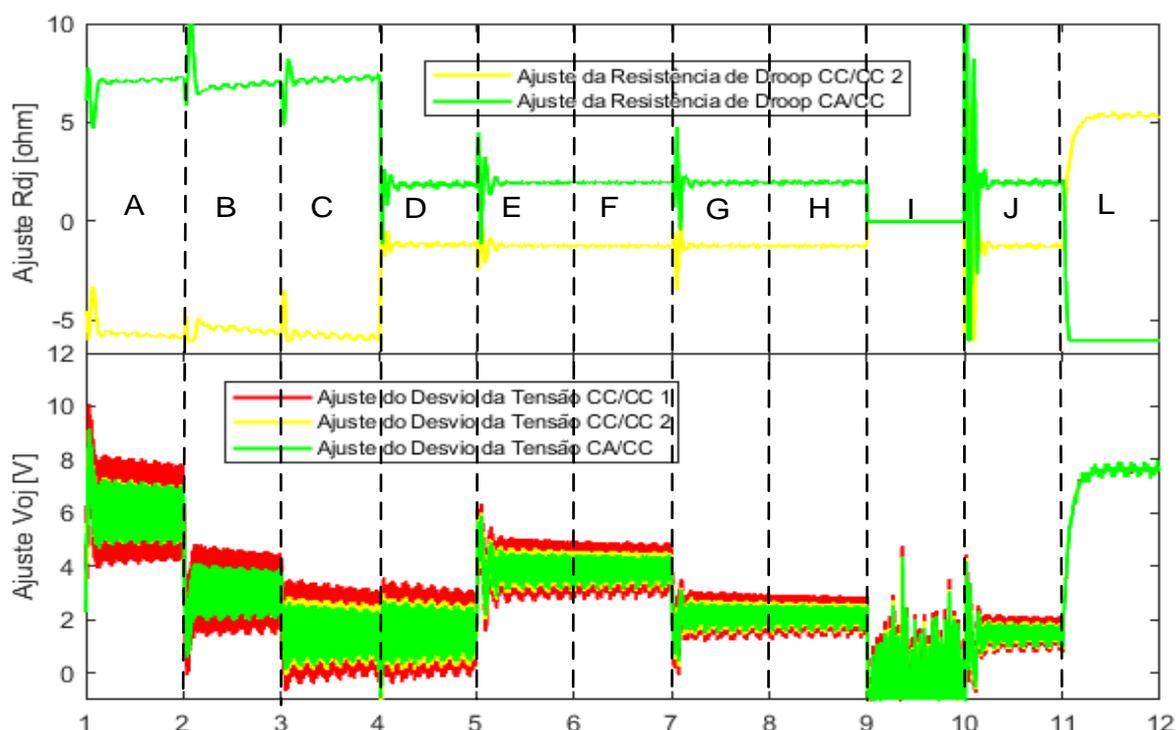


Fonte: Autoria Própria (2023).

Assim como na estratégia de comunicação em linha, no cenário 3 ocorre a priorização do uso da energia proveniente do formador CC/CC em relação ao formador CA/CC. Os ajustes na resistência de *droop* são direcionados para esse fim. Além disso, é observada uma considerável oscilação nos ajustes da resistência de *droop* durante a transição da situação (I) para a etapa (J). É possível notar também uma clara diferença nas transições de (F) para (G) e de (G) para (H), graças à robustez da estratégia de comunicação em anel, que é capaz de manter o compartilhamento de informações mesmo na presença de falhas.

A configuração da resistência de *droop* e da compensação de tensão do barramento CC é ilustrada na Figura 45. Os resultados alcançados em estado estacionário são resumidos na Tabela 30. Na sequência, na Tabela 31 apresenta os erros comparados obtidos.

Figura 45 - Ajuste da resistência de droop δR_{Dj} e ajuste do desvio de tensão do barramento CC δV_{Oj} Cenário 3 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 30 - Desempenho numérico do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	243,81	243,95	244,05	0,32	1,53	1,77	78,90	373,41	433,16
B	247,20	246,75	246,79	1,93	0,83	0,91	477,97	204,57	224,55
C	248,75	248,30	248,33	1,91	0,83	0,95	475,50	206,63	236,36
D	248,74	248,34	248,30	1,92	1,15	0,63	477,46	284,82	156,20
E	246,19	246,04	245,89	1,94	2,85	1,60	476,52	701,86	392,36
F	246,24	246,09	245,95	1,94	2,86	1,58	478,15	704,15	389,10
G	248,45	247,56	247,47	3,81	1,67	0,94	947,25	414,32	233,07
H	248,43	247,53	247,46	3,81	1,68	0,94	947,60	414,82	231,92
I	250,49	249,45	249,10	3,84	0,23	0,00	960,63	57,57	0,00
J	248,76	248,36	248,29	1,91	1,14	0,64	475,69	283,62	159,26
L	242,66	242,31	242,07	1,98	1,65	0,00	479,83	399,01	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 31 - Erros obtidos por meio de simulação do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Anel.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,08	0,13	0,18	0,00	4,04	16,74	0,00	3,87	16,36
B	0,09	0,09	0,08	1,53	10,02	9,53	1,26	9,79	9,61
C	1,29	0,28	0,27	2,55	10,02	5,55	3,73	10,00	5,63
D	1,30	0,26	0,28	2,04	6,67	19,30	3,34	7,16	18,80
E	3,53	0,55	0,61	1,02	10,29	17,51	4,73	10,71	16,48
F	3,51	0,53	0,59	1,02	9,98	16,04	4,40	10,41	15,51
G	1,89	0,33	0,37	3,67	15,51	10,97	1,79	15,61	10,77
H	1,89	0,34	0,37	3,67	15,00	10,97	1,83	15,50	10,23
I	0,18	0,21	0,35	4,49	0,00	0,00	4,54	0,00	0,00
J	1,29	0,25	0,28	2,55	7,48	21,20	3,70	7,56	21,12
L	3,84	1,22	4,07	1,02	6,26	0,00	2,99	7,59	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo da microrrede em estudo empregado para aquisição dos resultados experimentais é exibido na Figura 46, a qual apresenta um aspecto geral da microrrede. Já a Figura 47 apresenta em detalhes os DSCs utilizados e as conexões utilizadas na comunicação serial (ver linhas vermelhas tracejadas).

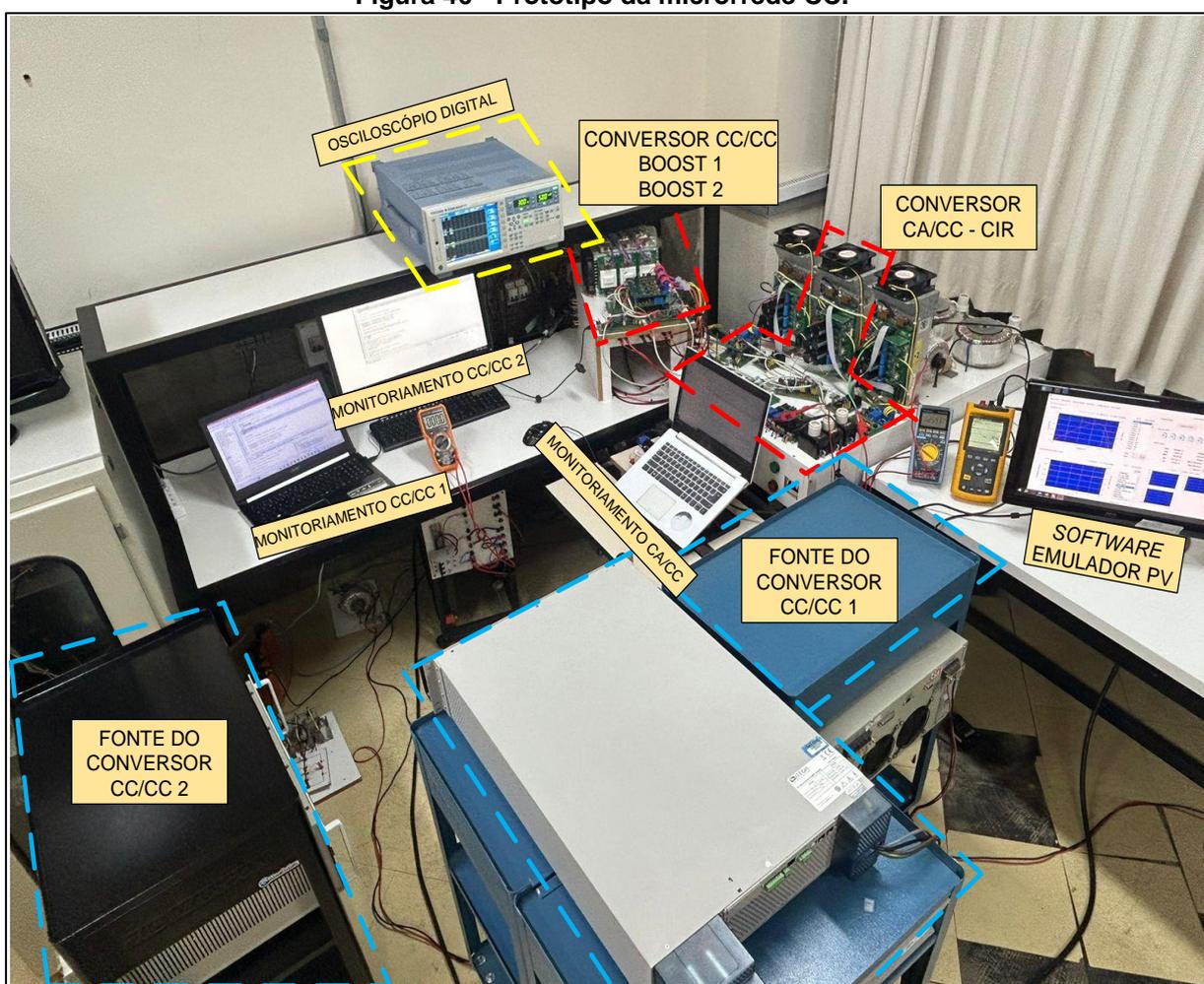
A estrutura é composta por um conversor *full-bridge* monofásico SKS 30F B2CI 10 V12 da SEMIKRON conectado ao sistema elétrico através de um indutor de filtragem. Dentro do protótipo, estão presentes também os dois conversores CC/CC que atuam como formadores de rede, os conversores são do tipo *boost*, que empregam duas fontes de alimentação CC fabricadas pela SUPPLIER, garantindo o suprimento energético necessário. Já o conversor CC/CC controlado por uma fonte de corrente é alimentado por uma fonte bidirecional modelo IT6012C-800-50 (*Itech*), a qual integrada com o software SAS100L (*Itech*), é capaz de gerar as características do arranjo FV.

As tensões, correntes e potências das saídas dos conversores foram medidas utilizando placas de condicionamento de sinais que empregam transdutores de efeito Hall da marca LEM modelo LA-100P e LV-25P da marca LEM. Os resultados foram

obtidos por meio de um analisador de precisão de qualidade de energia, modelo WT3000 da marca *Yokogawa*.

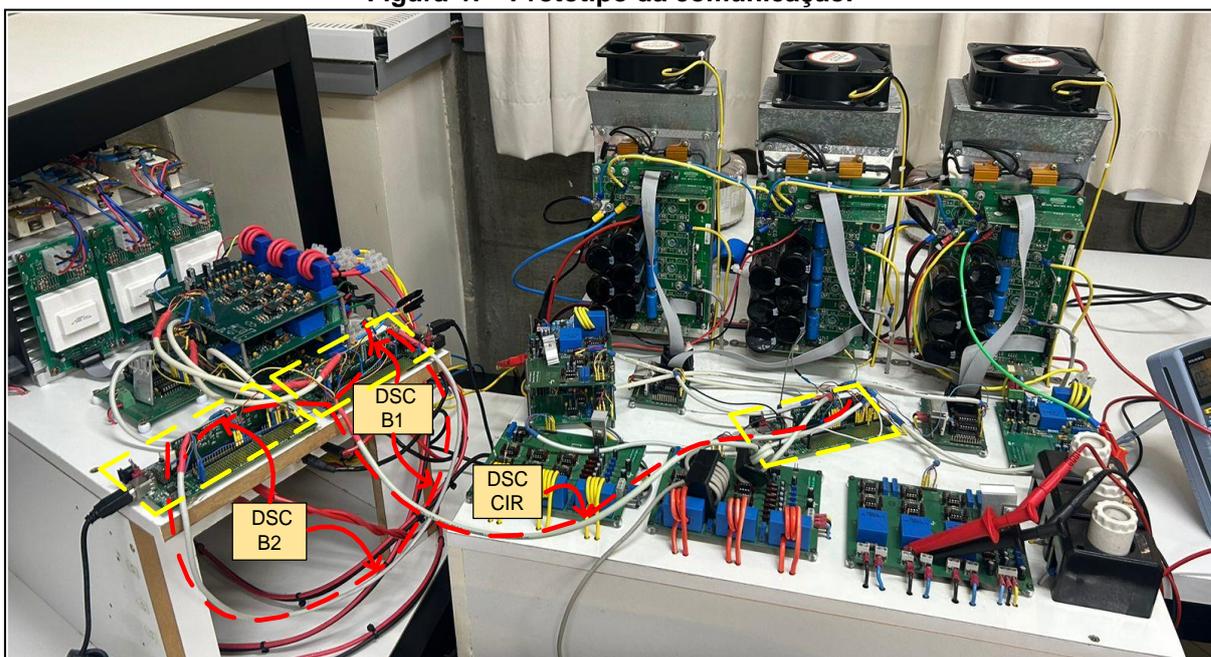
A estratégia de controle e os algoritmos foram implementados experimentalmente em DSCs TMS320F28335 da Texas Instruments em UART, com o módulo SCI. Os parâmetros do sistema de comunicação aplicados experimentalmente estão dispostos na Tabela 32. É importante ressaltar que foram empregados os mesmos dados de parâmetros para todos os DSCs.

Figura 46 - Protótipo da microrrede CC.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 47 - Protótipo da comunicação.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 32 – Parâmetros de comunicação do módulo SCI.

Parâmetros	
SYSCCLKOUT	150 MHz
LSPCLK	37,5 MHz
Taxa SCI	9600
BRR	487

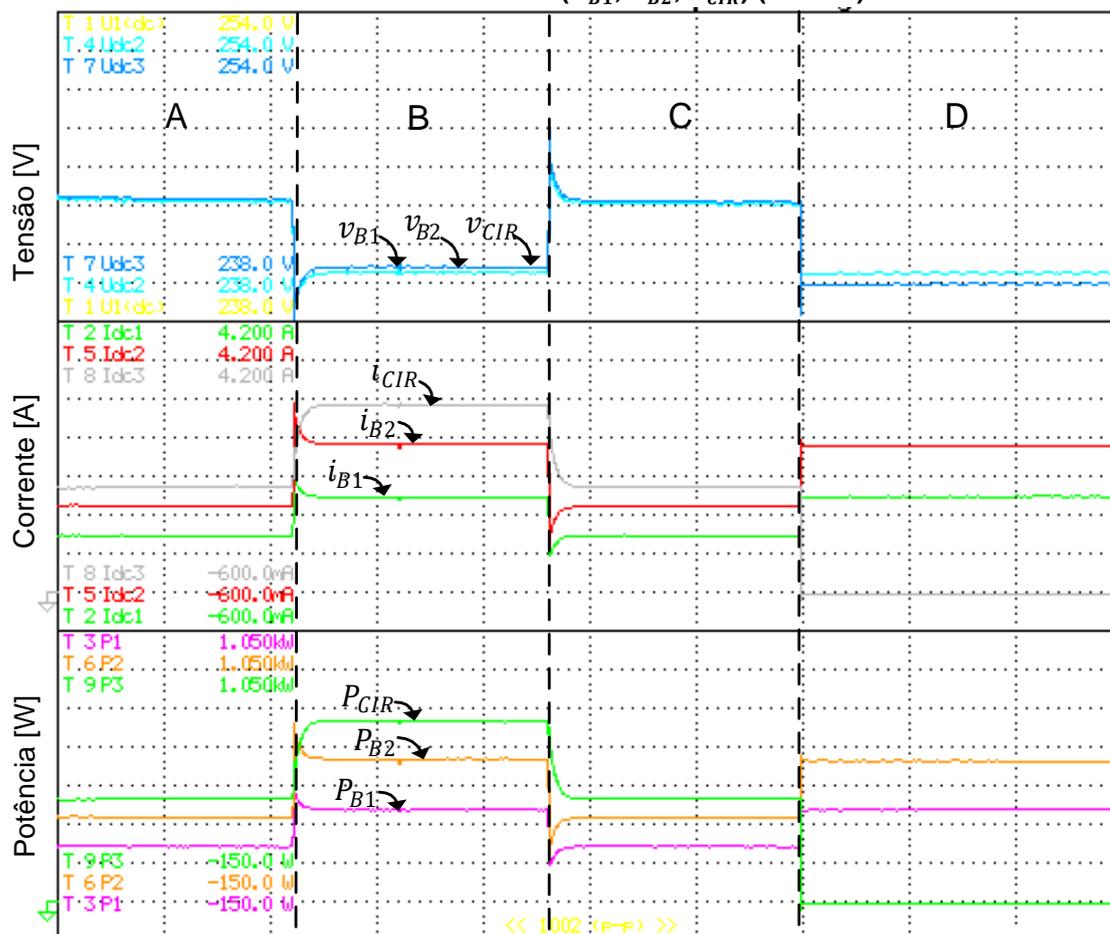
Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.1 Cenário 1: Controle primário

A Figura 48 exibe o desempenho do controle primário envolvendo as tensões de saída, correntes de saída e potências de saída dos conversores da microrrede CC. Foram analisados quatro modos operacionais.

Inicialmente no modo de operação (A), a microrrede CC opera com uma carga de $R_{L1} = 67,2 \Omega$ com tensão média de $v_{MGmed} = 244,78 V$, com o controle por *droop* ativo. No modo de operação (B) adicionada uma carga de $R_{L2} = 90 \Omega$ em paralelo na microrrede, resultando em $R_{L2} = 38,47 \Omega$, neste momento a tensão média no barramento CC passa a ser $v_{MGmed} = 240,88 V$ forçando o conversor CIR a injetar mais potência na microrrede, como também pode ser visto na Tabela 33 que apresenta os valores numéricos em regime permanente. Já na operação C a carga de R_{L2} é desconectada do barramento CC e retorna as mesmas condições da operação A, retornando a tensão média de $v_{MGmed} = 244,71 V$. Por fim, na microrrede é ilhada, operando apenas os conversores CC/CC bidirecionais.

Figura 48 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 1: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 33 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 1.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	244,81	244,70	244,84	0,84	1,29	1,72	204,69	315,49	421,61
B	240,88	240,77	241,06	1,46	2,28	2,96	350,96	548,26	712,90
C	244,72	244,61	244,76	0,82	1,28	1,73	201,79	312,59	424,54
D	240,74	240,71	240,15	1,46	2,28	0,00	351,17	548,80	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 34 - Erros experimentais obtidos do controle primário em regime permanente: Cenário 1.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,05	0,01	0,06	20,97	2,90	29,46	22,97	5,01	26,94
B	0,07	0,02	0,14	21,37	1,76	27,54	24,39	5,51	22,87
C	0,01	0,03	0,03	22,85	3,66	30,22	24,06	5,89	27,82
D	0,41	0,42	0,65	11,70	10,32	0,00	15,04	6,21	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.2 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em linha

Após a avaliação do controle primário, serão analisados os resultados do controle secundário da microrrede CC neste cenário, empregando a topologia de comunicação em linha. A microrrede CC será submetida a onze modos de operação na microrrede CC.

Inicialmente na situação (A), os conversores que compõem a microrrede CC estão operando exclusivamente com o controle por *droop* com uma carga conectada ao barramento CC corresponde a $R_{L1} = 67,2 \Omega$. Neste caso, a tensão média do barramento CC está em $v_{MGmed} = 244,48 V$, isto é, abaixo do valor da tensão nominal de $v_{MG} = 250 V$. A nível de geração, a microrrede está importando energia da rede elétrica CA.

Na situação (B), é ativado o controle secundário para a regulação de tensão do barramento CC e a tensão converge para $v_{MGmed} = 246,67 V$. Posteriormente, na situação (C), o compartilhamento proporcional de corrente é habilitado, resultando em alterações nas correntes de saída dos conversores se alterem de forma proporcional com a variável de alocação da potência dos conversores em 30% para os conversores CC/CC (B1 e B2) e 40% para os conversor CA/CC (CIR), sendo assim há o deslocamento de $i_{B1} = 0,84 A$, $i_{B2} = 1,30 A$ e $i_{GIC} = 1,73 A$ para $i_{B1} = 1,09 A$, $i_{B2} = 1,20 A$ e $i_{GIC} = 1,58 A$, respectivamente.

No modo de operação (D), uma carga adicional de $R_{L2} = 90 \Omega$ é conectada em paralelo na microrrede, resultando em uma nova configuração de carga para $37,8 \Omega$, o que provoca alterações nas tensões de saída dos conversores. No entanto, graças à atuação do controle secundário, as tensões do barramento CC são reestabelecidas e convergem para $v_{MGmed} = 245,27 V$. É importante destacar que as resistências de linha não foram modificadas ao longo do experimento. Consequentemente, percebe-se um aumento proporcional das potências dos conversores.

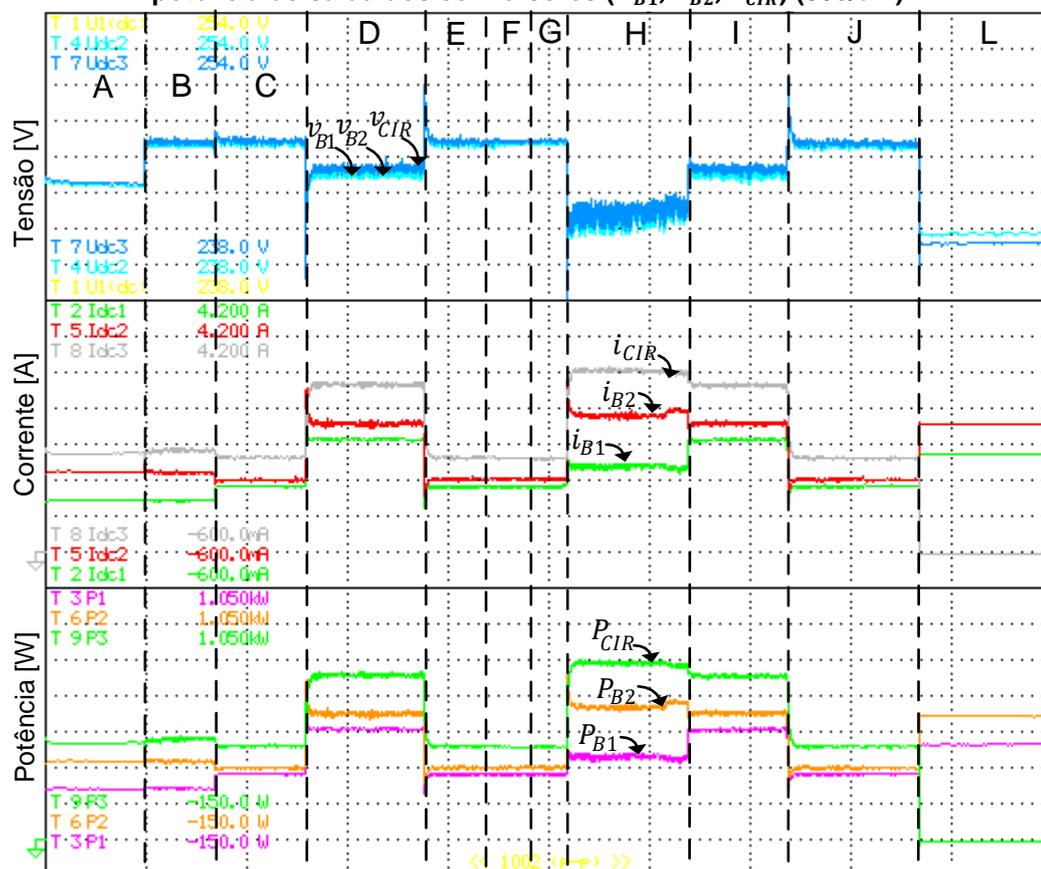
Na situação (E), a carga de $R_{L2} = 90 \Omega$ é desconectada do barramento CC e retorna para as mesmas condições do modo de operação (C), e na sequência em (F) ocorre uma falha no sistema de comunicação com perda de dados entre o conversor B2 e o conversor CIR. No entanto, como não há modificação na carga, a regulação de tensão no barramento CC é mantida, assim como os ajuste da resistência de *droop* (R_{Dj}) e desvio de tensão do barramento CC (V_{Oj}). Em seguida (G), uma nova de

comunicação física ocorre, gerando a perda de dados entre o conversor B1 e o conversor B2, comprometendo totalmente a comunicação na microrrede CC. Na situação (H), a carga R_{L2} é novamente conectada do barramento CC, resultando em um novo evento de perturbação de tensão e corrente. No entanto, como a comunicação está integralmente afetada, não ocorre a atuação do controle secundário para correção eficiente do desvio de tensão do barramento CC e para o compartilhamento do corrente.

Na situação (I) a comunicação é totalmente restabelecida, tanto do conversor B2 e o conversor CIR que ocorreu na situação (F) quanto do conversor B1 e conversor B2 na situação (H). Nesse momento, o ajuste do desvio de tensão é retomado, assim como o compartilhamento de corrente entre os conversores que compõem a microrrede CC.

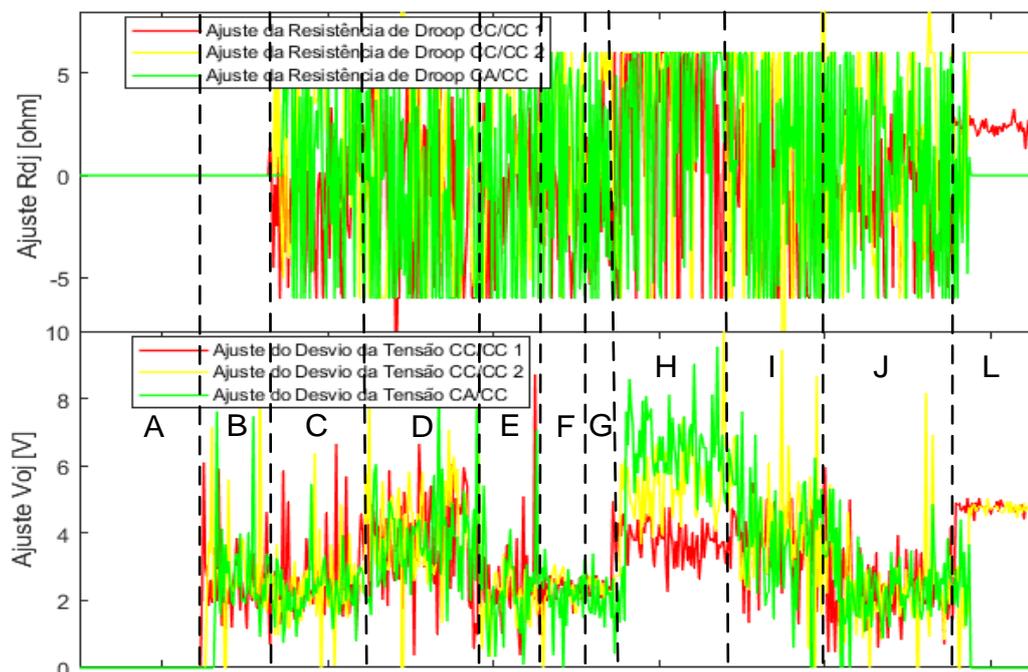
Por fim, na situação (J), a carga de R_{L2} é desconectada do barramento CC e a microrrede opera em modo ilhado (L), ocorrendo a desconexão com a rede elétrica CA.

Figura 49 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 1 – Linha: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 50 - Ajuste da resistência de droop (R_{DB1} , R_{DB2} , R_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (V_{OB1} , V_{OB2} , V_{OCIR}) do cenário 1 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 35 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 1 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	244,48	244,39	244,50	0,86	1,32	1,66	209,93	323,69	404,85
B	246,69	246,59	246,72	0,84	1,30	1,73	206,14	321,06	427,82
C	246,97	246,76	246,88	1,09	1,20	1,58	270,29	296,18	389,04
D	245,27	244,98	245,27	1,88	2,12	2,80	462,06	519,40	687,93
E	246,82	246,62	246,76	1,10	1,19	1,58	270,89	294,49	389,91
F	246,89	246,54	246,66	1,10	1,19	1,57	270,19	292,87	388,27
G	246,76	246,68	246,39	1,08	1,21	1,55	266,50	298,48	381,90
H	241,55	241,48	241,78	1,35	2,30	3,06	326,25	556,13	740,72
I	245,06	244,70	245,01	1,91	2,04	2,85	466,98	499,41	697,62
J	246,90	246,70	246,88	1,10	1,20	1,58	271,66	295,96	389,30
L	242,25	242,11	241,62	1,63	2,10	0,00	395,62	509,40	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 36 exhibe as discrepâncias originadas entre os valores teóricos ideais e os resultados experimentais obtidos. É notável destacar que na etapa de operação (H), os erros se elevam consideravelmente, decorrente da interferência na comunicação. Subseqüentemente, na categoria (I), observa-se a redução dos erros devido ao restabelecimento da comunicação.

**Tabela 36 - Erros obtidos experimentais do controle secundário em regime permanente:
Cenário 1 – Linha.**

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2} [\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,08	0,12	0,08	22,94	18,27	11,55	23,13	18,53	11,19
B	1,32	1,36	1,31	24,74	16,48	16,26	26,12	15,07	15,00
C	1,21	1,30	1,25	2,34	7,52	6,18	3,13	6,15	4,57
D	1,89	2,01	1,89	3,57	8,74	7,72	5,20	6,57	5,86
E	1,27	1,35	1,30	1,44	6,62	6,18	2,91	5,55	4,81
F	1,24	1,38	1,34	1,44	6,62	5,50	3,16	4,96	4,37
G	1,30	1,33	1,44	3,23	8,42	4,16	4,49	6,98	2,65
H	0,35	0,32	0,44	27,29	0,90	31,84	27,00	0,46	32,58
I	1,98	2,12	2,00	2,03	4,64	9,64	4,19	2,47	7,35
J	1,24	1,32	1,25	1,44	7,52	6,18	2,64	6,07	4,64
L	3,10	3,16	3,35	6,11	20,96	0,00	8,85	17,37	0,00

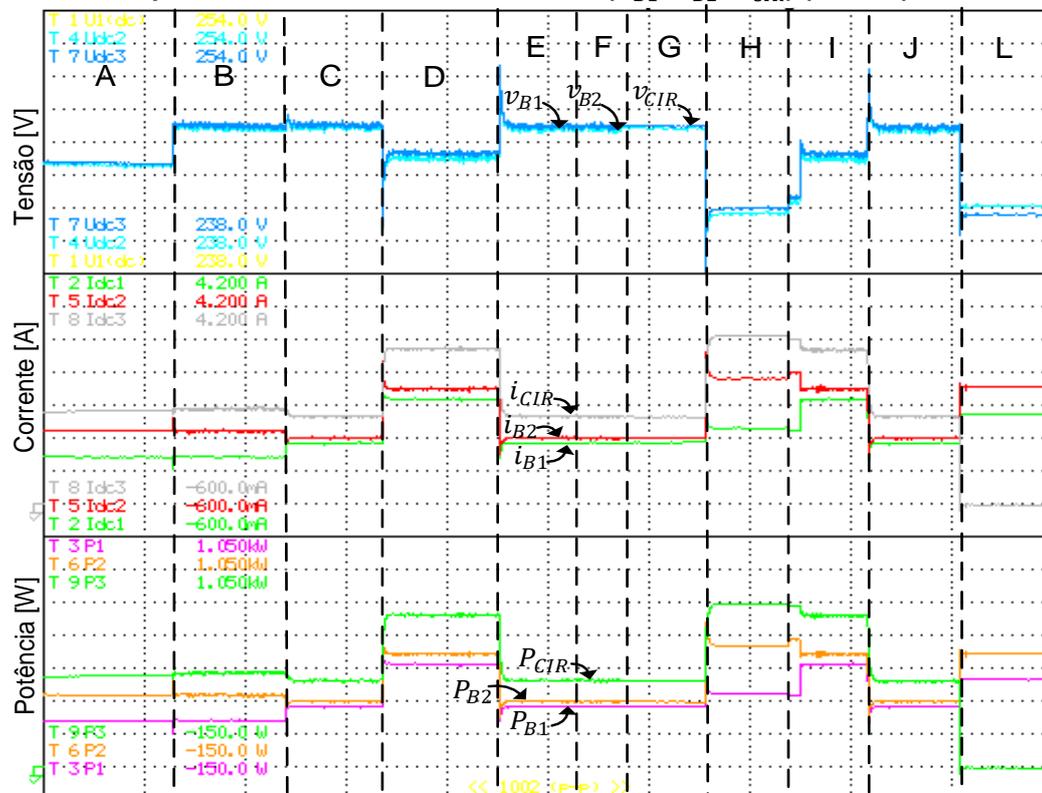
Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.3 Cenário 1: Controle secundário com comunicação em anel

Por fim, é realizada a análise operacional do cenário 1, no qual a operação ocorre por meio da topologia de comunicação em formato de anel. Os onze modos de operação correspondentes serão igualmente aos sujeitos na análise anterior.

A condição inicial da microrrede CC apresenta uma configuração na qual o controle por *droop* está ativo com uma carga conectada ao barramento CC corresponde a R_{L1} . Nota-se, o desvio da tensão média do barramento CC está em $v_{MGmed} = 244,49 V$ em relação ao valor da tensão nominal de $v_{MG} = 250 V$.

Figura 51 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 1 – Anel: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

O desempenho dinâmico do controle para a correção do desvio de tensão foi validado na situação (B) e a tensão do barramento CC é restaurada para $v_{MGmed} = 246,71 \text{ V}$. Na próxima situação (C), o compartilhamento proporcional de corrente é ativado e as correntes/potências são alteradas de maneira proporcional com as variáveis de alocação de potência desejadas, conforme foi apresentado na Tabela 3, $K_{\alpha CIR} = 40\%$, $K_{\alpha B1} = 30\%$, $K_{\alpha B2} = 30\%$.

No modo de operação (D), ao adicionar uma carga extra de $R_{L2} = 90 \Omega$ em paralelo à microrrede, resulta em uma reconfiguração para $37,8 \Omega$, impactando diretamente as tensões de saída dos conversores. Contudo, é importante notar que o controle secundário entra em operação de imediato, restaurando as tensões no barramento CC, levando-as a convergir para $v_{MGmed} = 244,97 \text{ V}$.

Na subsequente circunstância (E), a carga de $R_L = 90 \Omega$ é desconectada da microrrede CC. Entretanto, uma adversidade acomete o sistema de comunicação, resultando na perda de dados na conexão entre o conversor B2 e o conversor CIR, delineando a configuração indicada pela situação (F). Em virtude da topologia de comunicação adotada ser em formato de anel, a falha de comunicação transforma a

rede de comunicação em uma configuração linear. Portanto, mesmo diante da primeira ocorrência de falha, o sistema de comunicação mantém-se em operação.

No entanto, na situação subsequente (G), mais uma vez o sistema de comunicação enfrenta uma falha, acarretando a interrupção da transmissão de dados entre o conversor B1 e o conversor B2. Posteriormente, situação (H), a carga R_{L2} reintegrada, desencadeando uma nova perturbação de tensão. Isso resulta em uma diminuição de aproximadamente 2 V na média de tensão e gera um desequilíbrio de potência entre os conversores. Além disso, o compartilhamento de corrente também é comprometido.

Na situação (I), a restauração completa da comunicação se efetiva, permitindo a observação de que, após a reconexão, o controle secundário destinado ao ajuste de desvio de tensão exibe a capacidade de assegurar a estabilidade e corrigir a compartilhamento de corrente de acordo com as variáveis de alocação definidas.

Prosseguindo, na ocasião em que a carga R_{L2} é desconectada da microrrede CC, retratando a situação (J), e culminando na avaliação da última situação, designada como (L), a microrrede CC opera em um estado de isolamento, ocorrendo a desconexão da rede elétrica CA. Os conversores B1 e B2 mantêm suprindo o atendimento de consumo da carga R_{L1} .

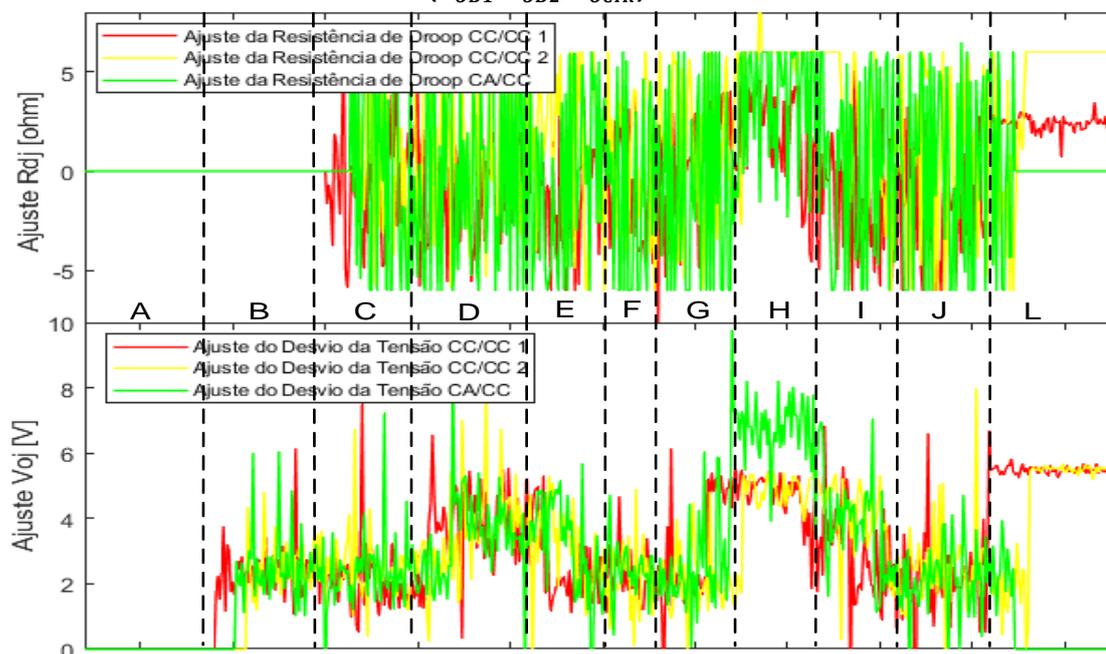
A Tabela 37 compila os valores numéricos das tensões, correntes e potências de saída de cada conversor em regime estacionário, em cada modo operacional.

Tabela 37 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 1 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	244,49	244,40	244,51	0,87	1,34	1,61	213,17	326,52	394,14
B	246,74	246,64	246,77	0,86	1,32	1,68	213,08	326,60	414,22
C	246,98	246,76	246,91	1,10	1,20	1,57	270,91	295,06	386,56
D	245,06	244,77	245,07	1,91	2,09	2,79	467,40	512,41	682,78
E	246,98	246,76	246,93	1,11	1,21	1,58	274,14	298,58	390,15
F	246,99	246,80	246,91	1,10	1,20	1,57	270,92	295,10	386,56
G	246,97	246,74	246,92	1,09	1,19	1,55	270,41	293,62	382,73
H	242,05	242,02	242,28	1,31	2,41	2,99	317,39	583,92	723,41
I	245,00	244,69	245,00	1,91	2,08	2,79	466,89	509,68	682,71
J	246,94	246,76	246,89	1,12	1,20	1,59	276,57	295,05	392,56
L	242,16	242,03	241,51	1,65	2,44	0,00	398,74	591,03	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 52 - Ajuste da resistência de droop (R_{DB1} , R_{DB2} , R_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (V_{OB1} , V_{OB2} , V_{OCIR}) do cenário 1 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

De forma análoga aos resultados apresentados na topologia em linha, a Tabela 38 expõe os desvios obtidos na topologia em anel do cenário 1.

Tabela 38 - Erros obtidos experimentais do controle secundário em regime permanente: Cenário 1 – Anel.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,08	0,12	0,07	22,05	20,06	8,19	21,94	19,57	8,25
B	1,30	1,34	1,29	22,94	18,27	12,90	23,63	17,05	11,34
C	1,21	1,30	1,24	1,44	7,52	5,50	2,91	5,75	3,91
D	1,98	2,09	1,97	2,03	7,20	7,33	4,10	5,13	5,07
E	1,21	1,30	1,23	0,54	8,42	6,18	1,75	7,01	4,87
F	1,20	1,28	1,24	1,44	7,52	5,50	2,90	5,76	3,91
G	1,21	1,30	1,23	2,34	6,62	4,16	3,09	5,23	2,88
H	0,55	0,54	0,65	29,45	3,84	28,83	28,99	4,52	29,48
I	2,00	2,12	2,00	2,03	6,69	7,33	4,21	4,57	5,06
J	1,22	1,30	1,24	0,35	7,52	6,85	0,88	5,75	5,52
L	3,14	3,19	3,40	4,96	40,54	0,00	8,13	36,17	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.4 Cenário 2: Controle primário

Este panorama segue a metodologia previamente exposta na seção 6.3.2 durante a fase de simulação, abrangendo uma potência de $P_T = 3700 \text{ W}$. Com o propósito de analisar a dinâmica operacional da microrrede em nível primário de controle, a Figura 53 ilustra a eficácia da estratégia de regulação, visualizando as saídas de tensão, as correntes de saída e as potências de cada conversor na microrrede CC em cinco modos de operação.

Em uma etapa inicial, no modo de operação (A), a microrrede CC se encontra em funcionamento com uma carga de R_{L1} , mantendo uma média de tensão de $v_{MGmed} = 246,16 \text{ V}$, enquanto o controle por *droop* permanece ativo. Em um passo subsequente, na condição (B), a carga R_{L2} é inserida em paralelo à microrrede, resultando em um afundamento da tensão do barramento CC, $v_{MGmed} = 243,76 \text{ V}$.

Em um intervalo subsequente, identificado como (C), a carga R_{L2} é removida do barramento CC, retornando-se às mesmas condições observadas no modo de operação (A). Conseqüentemente, a microrrede é posteriormente isolada, com apenas os conversores CC/CC bidirecionais em operação. Na transição final, a carga R_{L2} é reintroduzida no sistema, resultando em um aumento das potências fornecidas pelos conversores CC/CC, a fim de atender às demandas da nova unidade consumidora.

A Tabela 39 sintetiza os valores numéricos obtidos em regime permanente para cada um dos modos de operação mencionados. Na sequência, na Tabela 40 são apresentados os erros obtidos em relação ao valor teórico.

Tabela 39 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 2.

	$v_{B1} [V]$	$v_{B2} [V]$	$v_{CIR} [V]$	$i_{B1} [A]$	$i_{B2} [A]$	$i_{CIR} [A]$	$P_{B1} [W]$	$P_{B2} [W]$	$P_{CIR} [W]$
A	246,28	246,15	246,04	1,20	1,59	1,03	295,86	392,51	253,12
B	243,92	243,74	243,63	2,10	2,76	1,85	512,62	673,66	450,64
C	246,28	246,18	246,02	1,21	1,61	1,04	298,00	396,35	255,86
D	244,93	244,82	244,28	1,64	2,16	0,00	402,57	528,61	0,00
E	240,23	239,80	239,09	3,36	3,18	0,00	806,20	763,01	0,00

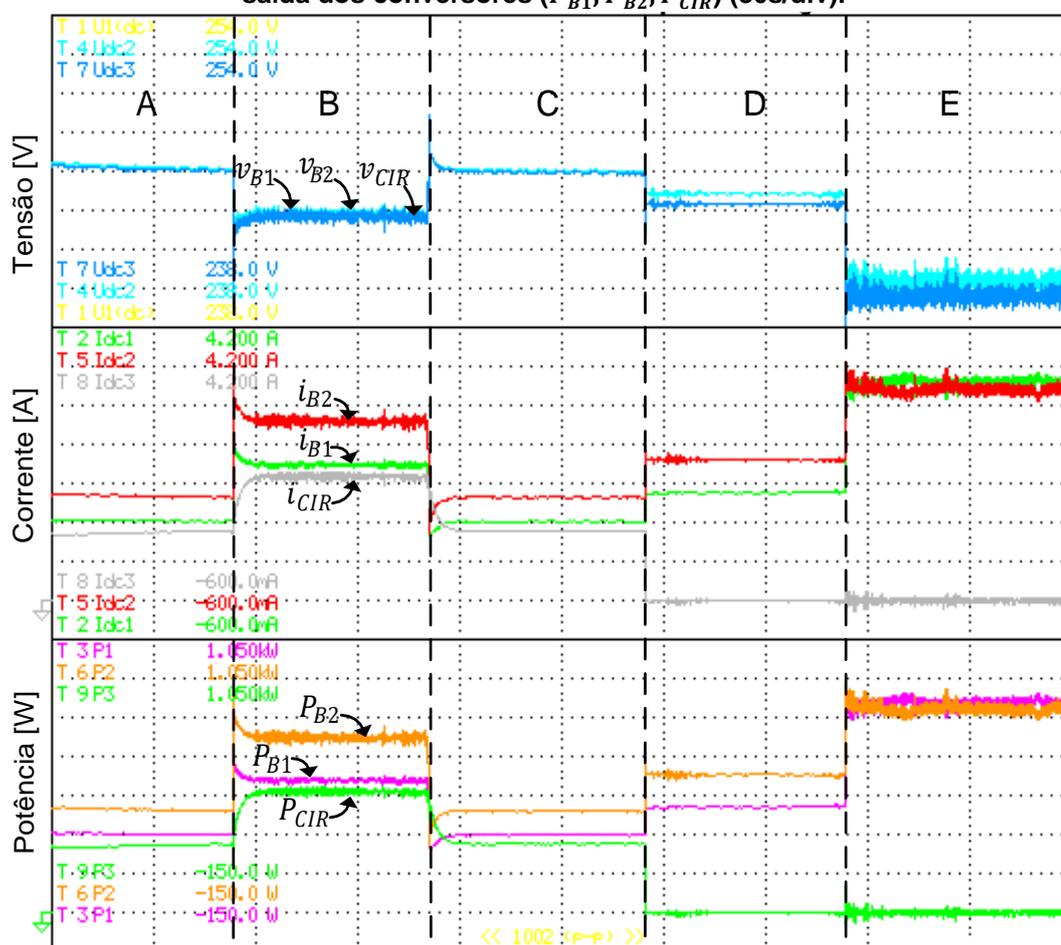
Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 40 - Erros obtidos experimentais do controle primário em regime permanente: Cenário 2.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,28	0,34	0,38	0,54	5,42	2,44	1,92	4,10	0,70
B	0,33	0,40	0,45	0,36	4,76	5,33	2,71	2,28	2,63
C	0,28	0,33	0,39	0,28	6,75	3,43	1,21	5,12	1,79
D	0,38	0,43	0,65	0,81	4,51	0,00	2,61	2,31	0,00
E	1,05	1,23	1,52	16,33	11,92	0,00	11,65	15,46	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 53 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 2: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.5 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em linha

Em conformidade com os resultados obtidos por meio de simulações computacionais, conforme delineado na seção 6.1.4, na estrutura de rede de comunicação linear, o presente cenário foi submetido a validações experimentais. A

Figura 54 compila dez contextos explorados dentro deste paradigma, exibindo as variáveis de corrente, tensão e potência de saída dos conversores que compõem o cenário 2. $K_{\alpha CIR} = 20\%$, $K_{\alpha B1} = 40\%$, $K_{\alpha B2} = 40\%$.

Primeiramente a microrrede CC opera com o controle por *droop* ativo fornecendo potência para uma carga ligada ao barramento CC de $R_{L1} = 67,2 \Omega$, com tensão de referência de $v_{MG} = 250 V$. Entretanto, verifica-se que a tensão está abaixo desse valor, apresentando um desvio na média do barramento CC $v_{MGmed} = 244,49 V$, essa diferença é referente ao controle primário. Para corrigir esse desvio, no estágio subsequente (B), o controle secundário de regulação de tensão é ativado. Este estágio demonstra que o controle foi eficaz em estabilizar a tensão no barramento CC $v_{MGmed} = 247,64 V$, o que resulta em um ganho $\delta V_{omed} = 1,31 V$.

Já no cenário (C), a estratégia de compartilhamento de corrente/potência opera de acordo com as proporções definidas pelo controle secundário, ou seja, as variáveis de alocação de potência os conversores para o cenário 2, $K_{\alpha CIR} = 20\%$, $K_{\alpha B1} = 40\%$, $K_{\alpha B2} = 40\%$. A concordância dessas variáveis pode ser notada na Tabela 26, em que apresenta os valores em regime permanente, onde as correntes de saída dos conversores partem de $i_{B1} = 1,20 A$, $i_{B2} = 1,54 A$ e $i_{CIR} = 1,14 A$ para $i_{B1} = 1,47 A$, $i_{B2} = 1,53 A$ e $i_{CIR} = 0,87 A$.

A transição para o modo de operação (D) traz um novo evento com a inclusão da carga R_{L2} em paralelo, alterando substancialmente as correntes e tensões de saída dos conversores. A estratégia de controle, então, corrige o balanço de potência do sistema, bem como a regulação de tensão no barramento CC.

No subsequente evento (E), a carga R_{L2} é desconectada, causando uma perturbação no barramento. Contudo, a atuação da estratégia de controle secundário restabelece a estabilidade, retornando para as mesmas condições do modo de operação (A). Posteriormente, ocorre uma falha na comunicação (F) entre os conversores B1 e B2, comprometendo a troca de informações necessárias para o controle secundário. No entanto, como não ocorrem eventos perturbadores adicionais, o controle secundário mantém os ajustes anteriores.

A situação (G) emerge com a reintegração da carga R_{L2} , ocasionando perturbações no barramento CC. Devido ao comprometimento parcial da comunicação da estratégia de controle secundário, onde se revela incapaz de corrigir a tensão do barramento CC em conformidade com a referência, resultando em uma média de $v_{MGmed} = 244,01 V$.

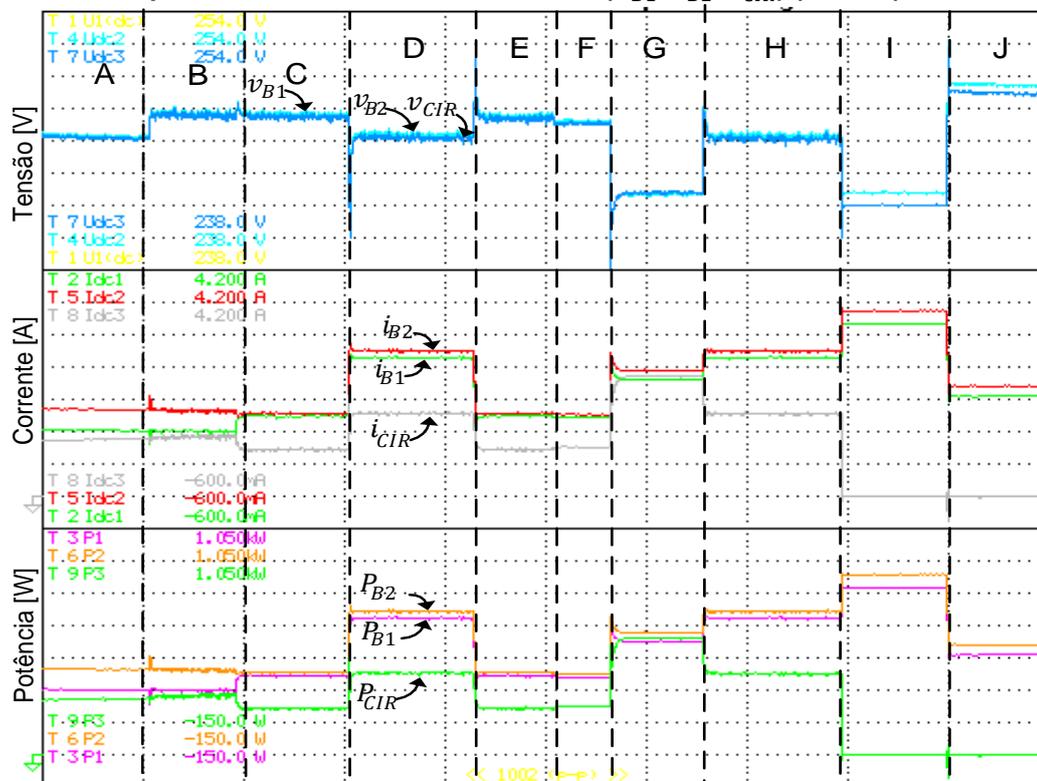
Contudo, o cenário (H) testemunha a restauração do sistema de comunicação, reativando o compartilhamento de corrente/potência e a regulação da tensão no barramento CC. Em seguida, no evento (I), a microrrede CC opera em modo autônomo, suprindo a potência demandada pelas cargas conectadas ao seu barramento CC com os conversores CC/CC. Por fim, a situação (J) revela a desconexão da carga R_{L2} da microrrede, direcionando os conversores CC/CC apenas para o fornecimento de potência à carga R_{L2} . Nas circunstâncias mais recentes, a microrrede CC exibiu sua capacidade de atender às exigências das cargas conectadas, mesmo em face da situação de desconexão da rede elétrica CA.

Tabela 41 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 2 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	246,45	246,32	246,22	1,20	1,58	1,06	295,69	389,08	262,12
B	247,75	247,62	247,55	1,20	1,54	1,14	297,00	380,29	281,84
C	247,71	247,47	247,34	1,47	1,53	0,87	115,83	377,94	214,89
D	246,57	246,21	246,08	2,57	2,63	1,62	633,38	647,67	397,66
E	247,72	247,48	247,35	0,46	1,51	0,88	113,95	373,69	217,67
F	246,35	245,98	245,88	2,54	2,58	1,67	624,73	634,74	410,72
G	244,17	243,91	243,93	2,27	2,47	1,97	553,83	603,39	479,62
H	246,32	245,97	245,83	2,56	2,60	1,60	630,51	640,16	392,91
I	239,07	238,61	237,89	3,37	3,18	0,00	805,35	759,54	0,00
J	248,72	248,44	247,98	1,95	1,90	0,00	486,02	471,41	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 54 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 2 – Linha: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Ao examinar os padrões de comportamento na Tabela 42, fica claro que alguns eventos apresentam erros consistentemente menores em comparação com outros. Essa observação sugere que o sistema de controle funciona de forma mais eficiente em situações ou condições específicas. Em situações (B) e (C), os erros são relativamente baixos. Isso indica que o sistema de controle secundário é capaz de manter um desempenho próximo ao ideal quando as condições estão dentro dos parâmetros esperados. O controle responde prontamente a variações e mantém as variáveis dentro das metas estabelecidas.

O evento (E), que envolve a desconexão de uma carga, exibe erros relativamente baixos à medida que o sistema retorna ao equilíbrio. O controle secundário é eficaz para restabelecer rapidamente as condições ideais após perturbações controladas. No evento (F), que envolve a falha na comunicação entre os conversores B1 e B2, os erros percentuais apresentados são notavelmente mais elevados em comparação com alguns outros eventos. Isso sugere que o sistema de controle secundário enfrenta desafios significativos quando a comunicação entre os conversores é comprometida. Após a restauração do sistema de comunicação no

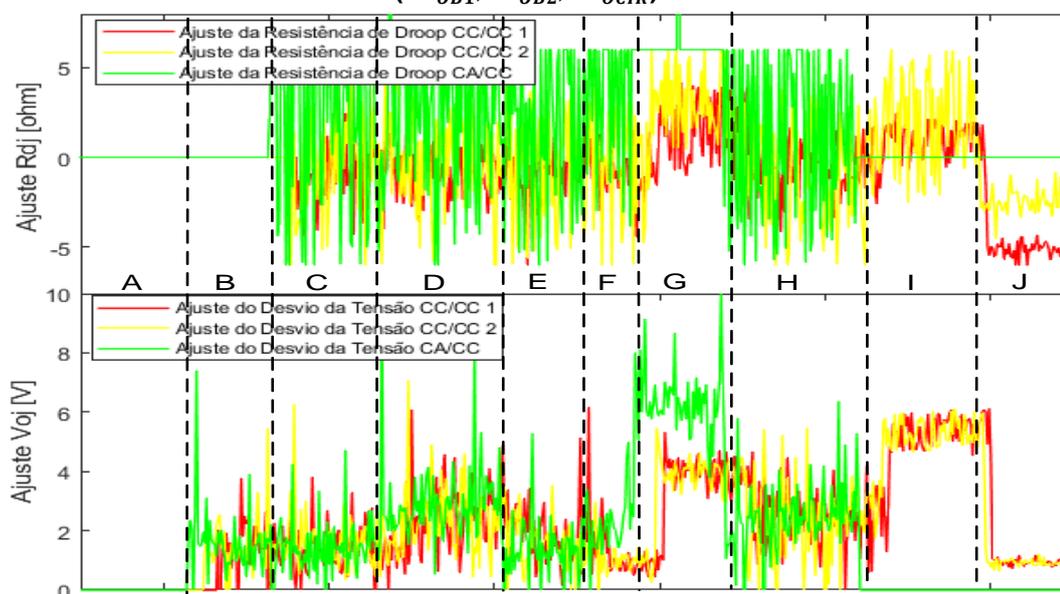
evento (H), os erros diminuem rapidamente, refletindo a capacidade do controle secundário de recuperar o controle total do sistema e restaurar a estabilidade.

**Tabela 42 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente:
Cenário 2 – Linha.**

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,22	0,27	0,31	0,54	4,76	5,42	0,78	4,45	5,55
B	0,10	0,15	0,18	0,54	2,11	13,38	0,74	1,68	13,03
C	0,11	0,21	0,26	1,22	2,82	16,93	68,61	2,41	16,46
D	0,03	0,11	0,17	1,13	1,18	24,64	1,15	1,08	24,13
E	0,11	0,21	0,26	69,09	1,47	18,27	69,12	1,26	17,97
F	0,66	0,81	0,85	70,69	73,38	66,09	69,29	72,00	64,72
G	0,23	0,34	0,33	7,70	6,25	12,16	5,11	8,39	9,23
H	0,07	0,21	0,27	1,52	0,02	23,10	1,59	0,09	22,65
I	2,49	2,68	2,98	3,72	2,13	0,00	11,53	15,85	0,00
J	0,60	0,48	0,30	4,83	2,14	0,00	17,58	8,77	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 55 - Ajuste da resistência de droop (δR_{DB1} , δR_{DB2} , δR_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (δV_{OB1} , δV_{OB2} , δV_{OCIR}) do cenário 2 - Linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

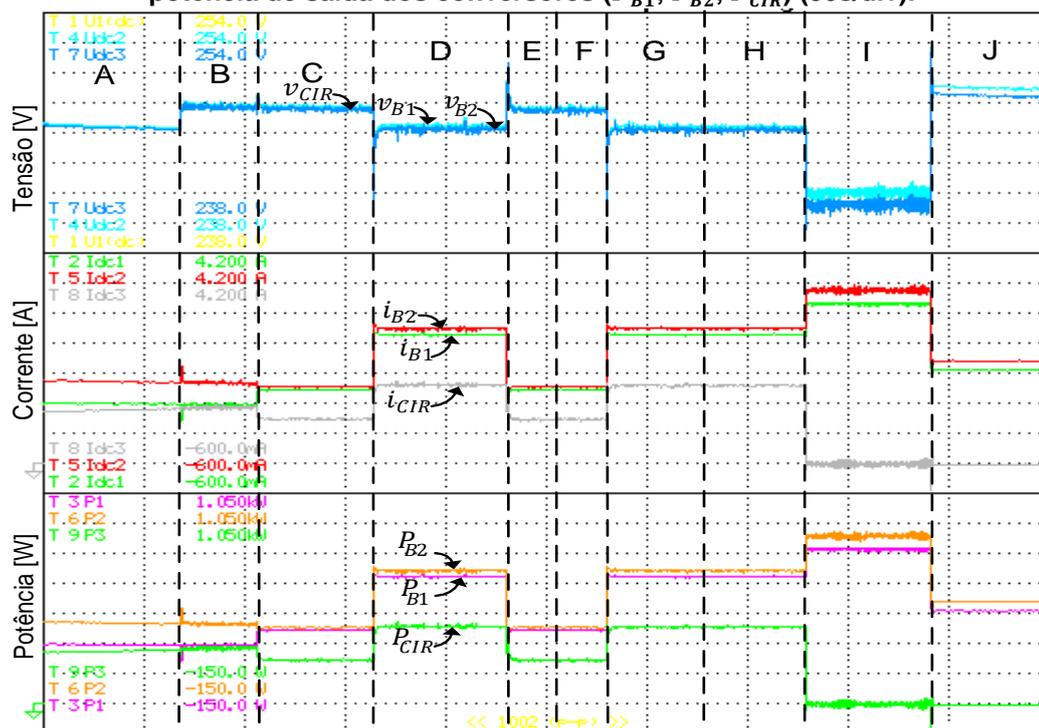
6.4.6 Cenário 2: Controle secundário com comunicação em anel

Os resultados a seguir dizem respeito à configuração 1 da rede de comunicação em anel. Assim como nos resultados obtidos por meio de simulação computacional, serão examinados dez modos de operação.

Assim como na análise anterior, serão submetidas as mesmas condições, iniciando a partida da microrrede CC com o controle por *droop*, com uma carga ligada ao barramento CC de R_{L1} , com tensão de referência de $v_{MG} = 250 \text{ V}$. Já na situação (B) o controle secundário para desvio da tensão do barramento CC é habilitado, atingido a tensão média do barramento CC de $v_{MGmed} = 247,51 \text{ V}$. Na sequência, em (C), a técnica de controle para compartilhamento de corrente/potência é habilitada de acordo com as variáveis de alocação definidas.

Na próxima instância (D), a carga R_{L2} é conectado em paralelo, provocando uma redução de tensão de $1,37 \text{ V}$ no barramento CC. No evento (E), a carga de R_{L2} é desconectada do sistema. A falha no sistema de comunicação ocorre na situação (F) entre o conversor B1 e o conversor B2. Apesar de comprometer parcialmente com essa falha de comunicação, a comunicação que é em anel se transforma em linha, mantendo a comunicação de todo o sistema, o que torna essa topologia de comunicação mais robusta.

Figura 56 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 2 – Anel: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

A perturbação ocorre em (G) quando a carga R_{L2} é reintegrada, gerando distúrbios no barramento CC. Embora a comunicação seja afetada, a troca de dados permanece inalterada, devido à transição da topologia de anel para linha. Isso preserva a troca de informações e, conseqüentemente, a correção da tensão no barramento CC e a atuação do controle secundário de corrente/potência.

Em (H) o sistema de comunicação é restaurado, retornando para a topologia de comunicação em anel. Logo em seguida em (I) a microrrede CC opera independente da rede elétrica CA, mantendo o compartilhamento de corrente/potência. Por fim, em (J) a carga R_{L2} é desconectada da microrrede, e os conversores CC/CC fornecem potência apenas para carga R_{L1} .

A sequência fornece os valores numéricos das tensões, correntes e potências de saída de cada conversor em regime permanente, delineados em cada modo de operação, conforme indicado na Tabela 43.

Tabela 43 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 2 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	246,34	246,20	246,11	1,18	1,57	1,11	290,26	387,02	272,81
B	247,62	247,49	247,42	1,19	1,56	1,12	294,37	385,32	277,48
C	248,41	247,83	247,69	1,48	1,53	0,86	366,78	380,25	211,97
D	246,90	246,58	246,36	2,58	2,70	1,51	635,98	666,78	371,26
E	248,41	247,83	247,69	1,48	1,53	0,86	366,78	380,25	211,97
F	248,41	247,84	247,71	1,46	1,54	0,86	362,68	381,67	212,73
G	246,73	246,40	246,21	2,57	2,68	1,53	633,36	660,56	377,75
H	246,74	246,39	246,22	2,58	2,69	1,54	636,59	662,79	379,18
I	242,54	242,22	241,44	3,18	3,44	0,00	771,83	832,14	0,00
J	249,23	249,02	248,54	1,84	2,03	0,00	458,15	505,43	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

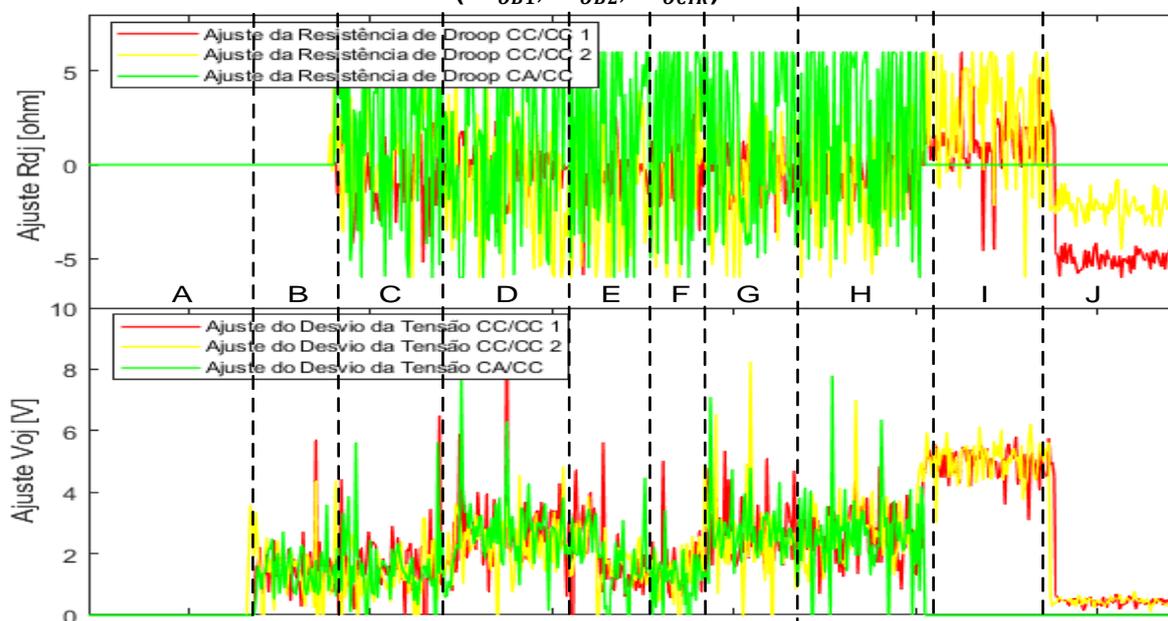
Os próximos dados exibem os erros obtidos em cada etapa de operação, na Tabela 44. A principal diferença em relação aos resultados da topologia em linha está na capacidade do sistema em manter os ajustes anteriores após uma falha na comunicação (F) e (G), onde os erros percentuais são notavelmente menores. Essa diferença destaca a resiliência da topologia em anel em manter a comunicação e o controle em situações desafiadoras.

**Tabela 44 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente:
Cenário 2 – Anel.**

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,26	0,32	0,35	2,20	4,10	10,40	2,60	3,90	9,86
B	0,15	0,20	0,23	1,37	3,43	11,39	1,62	3,02	11,28
C	0,17	0,06	0,12	0,54	2,82	15,58	0,61	3,04	14,88
D	0,17	0,04	0,05	0,75	3,87	16,18	0,74	4,07	15,89
E	0,17	0,06	0,12	0,54	2,82	15,58	0,61	3,04	14,88
F	0,17	0,06	0,11	1,89	3,49	14,47	1,72	3,42	14,68
G	0,82	0,68	0,60	21,94	1,72	12,89	20,20	0,29	13,97
H	0,10	0,04	0,11	0,75	3,48	18,49	0,65	3,44	18,36
I	1,08	1,21	1,53	2,13	5,87	0,00	6,89	7,80	0,00
J	0,80	0,72	0,52	1,08	9,13	0,00	10,84	2,18	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 57 - Ajuste da resistência de droop (δR_{DB1} , δR_{DB2} , δR_{DCIR}) e ajuste do desvio de tensão do barramento CC (δV_{OB1} , δV_{OB2} , δV_{OCIR}) do cenário 2 - Anel.



Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.7 Cenário 3: Controle primário

Este cenário apresenta tanto o controle primário quanto o secundário por meio da configuração 2, como apresentada na seção 5.1. A Figura 58 proporciona uma

visualização das grandezas, incluindo as tensões de saída, correntes de saída e potências de saída dos conversores da microrrede CC.

A operação inicial da microrrede CC, situada na etapa (A), engloba o conversor B2 e o conversor de interface CIR, com a carga de R_{L1} . Em seguida, na situação (B), o sistema FV entra em funcionamento operando em MPPT na microrrede CC com o conversor B1 com irradiância de 400 W/m^2 . Nesse momento, a tensão média do barramento CC converge para $v_{MGmed} = 247,15 \text{ V}$, assumindo o fornecimento de potência para a microrrede CC. Nota-se uma redução na potência injetada pela rede elétrica CA por meio do conversor CIR, conforme o esperado.

A etapa seguinte, (C), envolve a adição de uma carga em paralelo de R_{L2} , levando a uma redução na tensão média do barramento CC para $v_{MGmed} = 242,65 \text{ V}$. Em seguida, na situação (D), a irradiância sofre um degrau para 750 W/m^2 . Nesse cenário, prioriza-se o fornecimento de energia do sistema FV às cargas, com contribuições proporcionais dos outros conversores. Já em (E), a carga de R_{L2} é desconectada do barramento CC, deixando somente o sistema FV responsável por fornecer a energia necessária para abastecer a carga R_{L1} . Na situação (F), a irradiância é reduzida novamente para 400 W/m^2 , retornando às condições semelhantes àsquelas da situação (B). Por fim, a microrrede CC é isolada em (G), e a carga é suprida apenas pelos conversores B2 e o B1 associado ao sistema FV.

As Tabela 46 e Tabela 47 compilam os valores numéricos obtidos em regime permanente para cada um dos modos de operação descritos e os erros gerados em relação aos valores teóricos ideais, respectivamente.

Tabela 45 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle primário do cenário 3.

	$v_{B1} [V]$	$v_{B2} [V]$	$v_{CIR} [V]$	$i_{B1} [A]$	$i_{B2} [A]$	$i_{CIR} [A]$	$P_{B1} [W]$	$P_{B2} [W]$	$P_{CIR} [W]$
A	243,87	244,22	243,54	0,12	1,50	2,32	30,00	367,38	564,23
B	246,98	247,22	247,26	2,09	0,56	1,23	516,71	137,73	304,87
C	242,51	242,93	242,50	2,13	1,77	2,79	516,49	431,05	677,77
D	245,34	245,65	2485,87	3,96	1,00	1,81	972,39	244,91	450,83
E	250,45	250,46	251,20	3,88	0,01	0,03	972,26	1,68	8,31
F	246,81	247,32	247,29	1,98	0,57	1,23	488,68	140,97	304,91
G	242,68	242,31	242,72	2,13	1,66	0,00	517,23	401,80	0,00

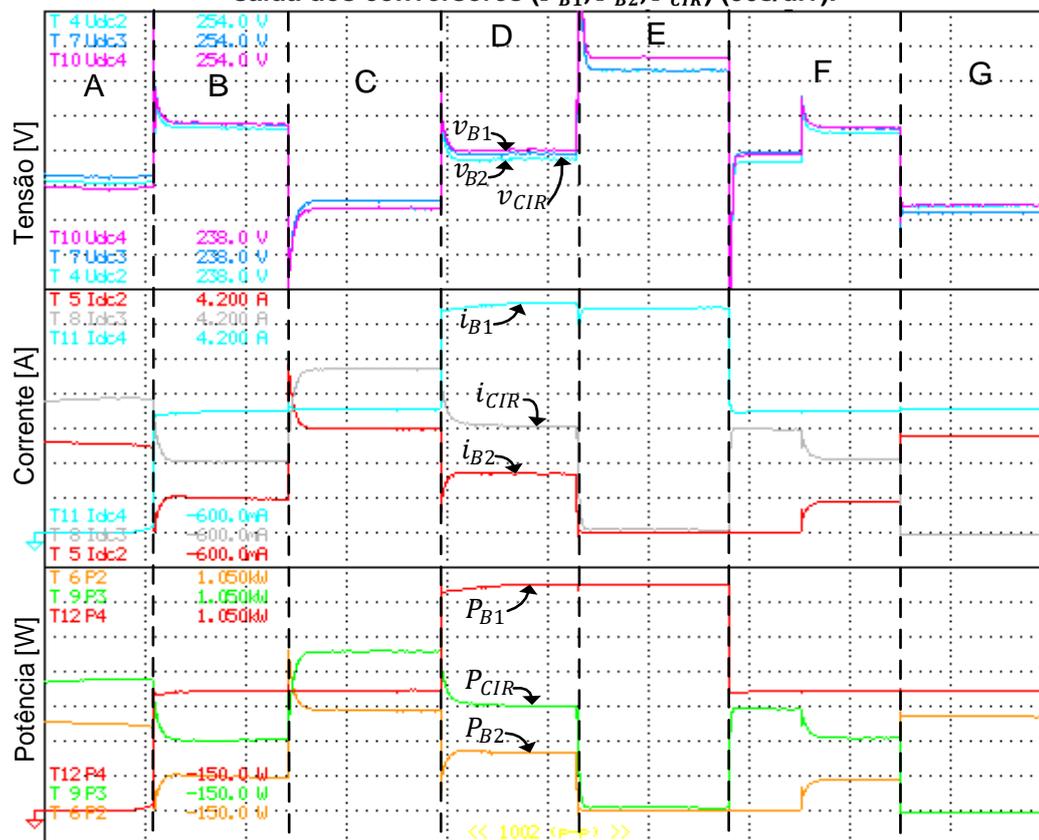
Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 46 – Erros experimentais obtidos do controle primário em regime permanente: Cenário 3.

	v_{B1} [%]	v_{B2} [%]	v_{CIR} [%]	i_{B1} [%]	i_{B2} [%]	i_{CIR} [%]	P_{B1} [%]	P_{B2} [%]	P_{CIR} [%]
A	0,10	0,25	0,03	0,00	5,92	9,13	0,00	7,83	6,17
B	0,00	0,10	0,11	6,63	25,77	22,28	5,45	26,97	21,24
C	0,12	0,29	0,12	8,67	9,00	7,58	5,41	11,36	4,53
D	0,07	0,20	1,40	7,76	17,36	12,18	5,84	19,04	11,77
E	0,18	0,22	0,51	5,58	0,00	0,00	5,82	65,34	28,59
F	0,07	0,14	0,12	1,02	24,44	22,28	0,27	25,25	21,25
H	2,93	0,27	2,88	8,67	5,69	0,00	5,56	8,69	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 58 - Desempenho experimental do controle primário do cenário 3: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.8 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em linha

Essa configuração foi examinada sob a óptica da topologia de comunicação em linha. Os resultados apresentados correspondem às mesmas condições avaliadas por meio de simulação computacional em dez condições operacionais.

Inicialmente em (A) apenas o conversor B2 e o conversor de interface CIR estão conectados ao barramento CC, operando sob o controle de *droop* e fornecendo potência a carga de R_{L1} . Posteriormente em (B), o sistema FV com irradiância de 400 W/m^2 começa a contribuir com energia no sistema, operando com o acompanhamento do MPPT, conforme ilustrado na Figura 59, assim como demonstrado nos resultados anteriores relativos ao controle primário. Observa-se que a média das tensões de saída dos conversores CC é $v_{MGmed} = 246,91 \text{ V}$. A fim de corrigir esse desvio da tensão de referência de $v_{MG}^* = 250 \text{ V}$, é ativado o controle secundário para correção da tensão no barramento CC em (C), resultando em um aumento nas tensões de saída dos conversores e uma média de $v_{MGmed} = 248,46 \text{ V}$.

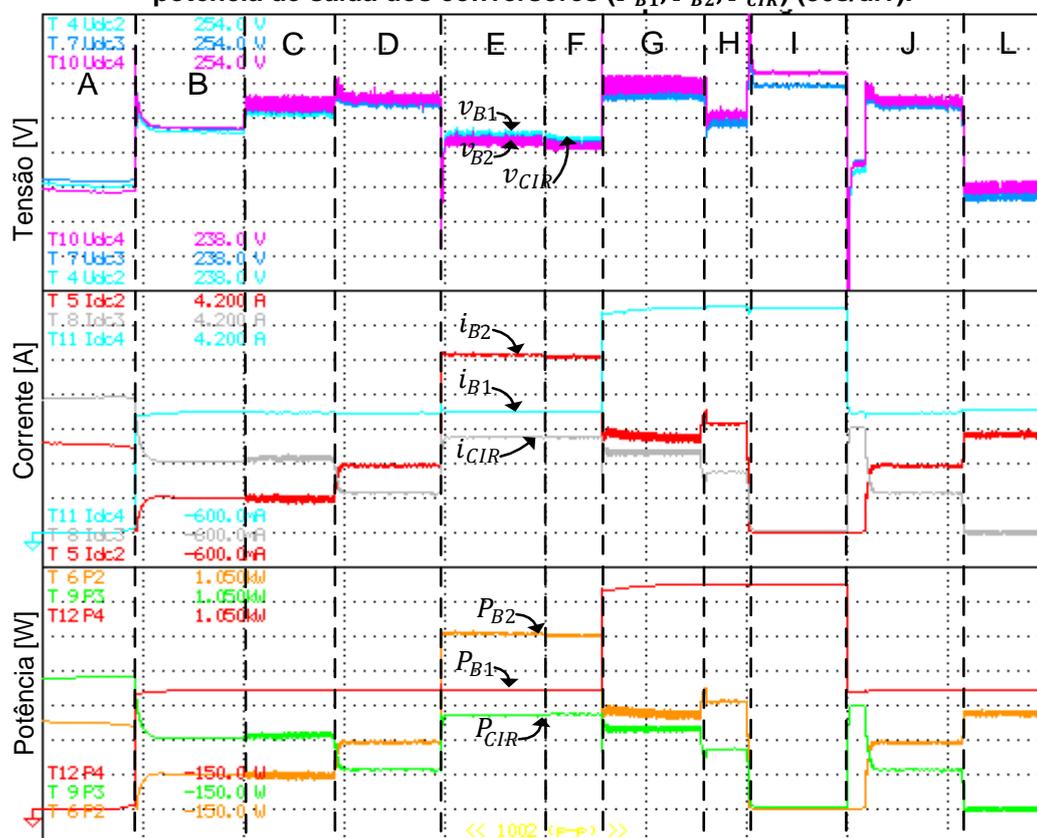
Em (D) é habilitado o controle secundário para contornar o compartilhamento de corrente/potência de acordo com as variáveis de alocação de proporção definida em $K_{\alpha CIR} = 70\%$ e $K_{\alpha B2} = 30\%$. É interessante ressaltar que o conversor B1 continua fornecendo a máxima energia disponibilizada no sistema FV. Na próxima etapa de operação da microrrede CC, em (E), a carga de R_{L2} é conectada em paralelo, mantendo a proporção definida para o compartilhamento de corrente para a carga conectada. Contudo, em (F), ocorre uma falha de comunicação entre o conversor B1 e o conversor de interface CIR, afetando a troca de informações do controle secundário.

Em (G), a irradiância aumenta para 750 W/m^2 , resultando em um aumento na corrente do sistema FV, e conseqüentemente, na injeção de mais potência na microrrede CC. No entanto, essa injeção não ocorre de forma proporcional, como definido anteriormente, devido ao comprometimento do sistema de comunicação. Entretanto, em (H), a comunicação entre os conversores é restaurada, o que restabelece a tensão no barramento CC e ajusta o compartilhamento de corrente/potência mais próximo dos definidos pelas variáveis $K_{\alpha CIR} = 70\%$ e $K_{\alpha B2} = 30\%$.

Em (I), a carga de R_{L2} é desconectada do barramento CC, fazendo com que apenas o sistema FV seja capaz de fornecer quase toda a potência necessária para alimentar a carga R_{L1} . Na situação (J), a irradiância é reduzida para 400 W/m^2 , retornando às condições equivalentes à situação (D). Em seguida, a microrrede CC é isolada (L), e a carga é suprida exclusivamente pelo conversor B2 e o conversor B1 associado ao sistema FV.

A Tabela 47 apresenta uma síntese dos valores numéricos obtidos em regime permanente para cada um dos modos de operação.

Figura 59 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 3 – Linha: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 47 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 3 - Linha.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{GIC} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	244,49	244,81	245,12	0	1,49	2,39	0	364,77	585,84
B	248,01	247,73	247,96	2,09	0,55	1,32	518,34	136,25	327,31
C	249,07	248,8	249,03	2,06	0,53	1,36	513,08	131,86	338,68
D	249,79	249,65	249,59	2,07	1,14	0,72	517,07	284,6	179,7
E	247,08	247,37	247,14	2,09	3,07	1,67	516,4	759,43	412,72
F	246,89	247,17	246,94	2,1	3,08	1,66	518,47	761,28	409,92
G	250,5	250,15	250,12	3,88	1,73	1,33	971,94	432,76	332,66
H	248,3	247,97	247,84	3,93	1,87	1,05	975,82	463,7	260,23
I	250,87	250,13	250,15	3,88	0,01	0,66	973,38	2,5013	165,1
J	249,09	248,95	248,88	2,08	1,13	0,69	518,11	281,31	171,73
L	243,4	243,704	243,33	2,12	1,7	0	528,07	423,22	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 48 destaca os erros experimentais em relação aos valores teóricos, e observa-se que a ativação do controle secundário para a correção de tensão (C) influencia significativamente as correntes de saída dos conversores, com erros mais notáveis em cenários de falha de comunicação. A restauração da comunicação desempenha um papel crucial na mitigação dos erros no compartilhamento de corrente. Em situações autônomas, o controle se ajusta de acordo com as exigências da carga, resultando em modificações nas correntes de saída. Em síntese, a eficácia do controle secundário varia de acordo com as condições operacionais e a integridade da comunicação entre os conversores, desempenhando um papel vital na preservação da estabilidade da microrrede CC.

**Tabela 48 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente:
Cenário 3 – Linha.**

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2}[\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,36	0,49	0,61	0,00	6,55	12,43	0,00	6,09	13,12
B	0,42	0,30	0,40	6,63	27,09	31,23	7,08	26,87	31,75
C	1,17	0,08	0,01	5,10	29,74	35,21	3,88	29,80	35,23
D	0,88	0,26	0,24	5,61	7,48	36,35	4,68	7,24	36,67
E	3,18	0,01	0,11	6,63	3,37	22,65	3,25	3,38	22,52
F	3,25	0,10	0,19	7,14	3,05	21,92	3,66	3,15	21,69
G	1,08	0,71	0,70	5,58	12,47	57,01	4,44	11,85	58,11
H	1,95	0,17	0,22	6,94	5,39	23,96	4,86	5,55	23,68
I	0,36	0,06	0,07	5,58	0,00	0,00	5,96	0,00	0,00
J	0,04	0,02	0,05	6,12	8,29	30,66	6,16	8,31	30,60
L	0,78	0,65	0,81	8,16	3,42	0,00	9,83	1,99	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.4.9 Cenário 3: Controle secundário com comunicação em anel

Por fim, a última análise será referente a topologia de comunicação em anel. Os resultados apresentados refletem as mesmas condições exploradas na topologia em linha.

A Figura 60 apresenta o desempenho dinâmico desse experimento. No modo de operação (A), apenas o conversor B2 e o conversor CIR estão conectados ao

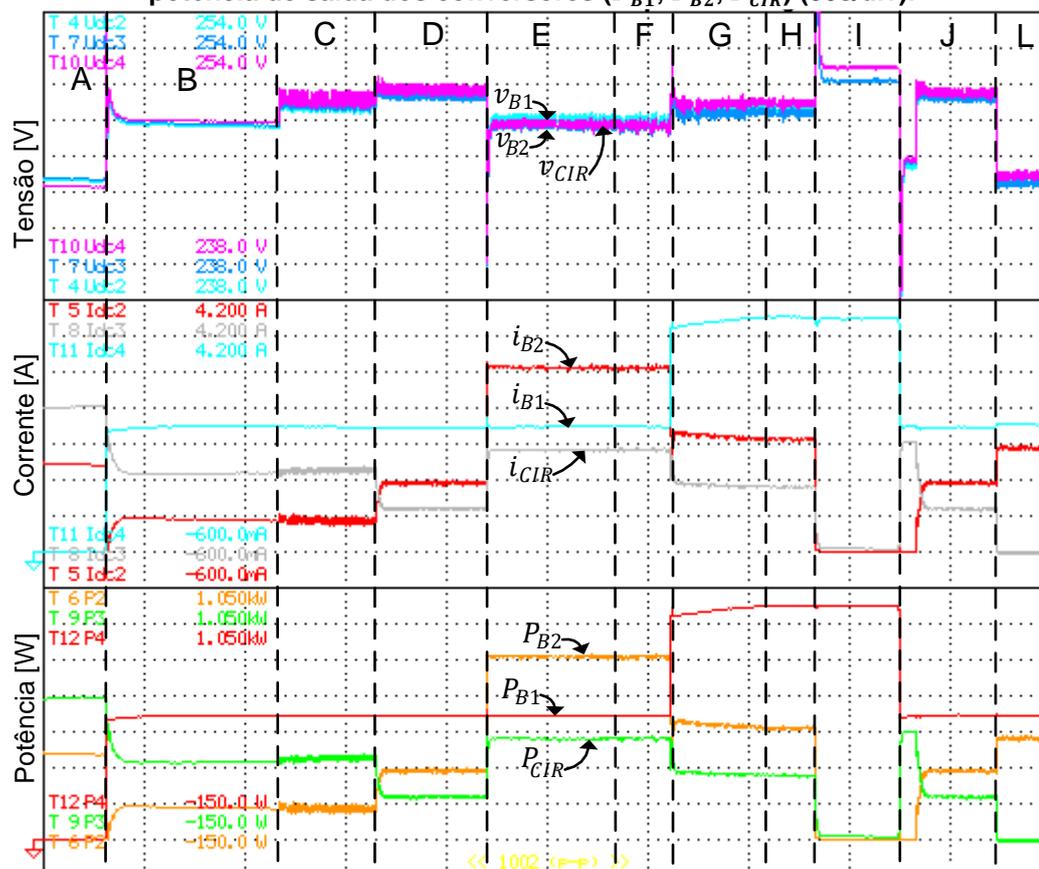
barramento CC. Em (B), o sistema FV, com uma irradiância de 400 W/m^2 . Em (C) é ativo o controle secundário para regulação da tensão no barramento CC, resultando em um aumento nas tensões de saída dos conversores, como pode ser visto na Tabela 30. Já em (D), o controle secundário é acionado para gerenciar o compartilhamento de corrente/potência de acordo com as variáveis de alocações. Em seguida, na situação (E), a carga R_{L2} é conectada em paralelo, seguindo a proporção definida para o compartilhamento de corrente na Tabela 3.

Entretanto, no cenário (F), uma interrupção na comunicação física entre o conversor B1 e o conversor CIR é observada. Na topologia de comunicação em anel, os dados fluem através de cada dispositivo conforme atravessam o anel. Quando um ponto no anel é afetado, os dados continuam a circular como em um modelo de comunicação em linha. No ponto (G), apesar da elevação na irradiância para 750 W/m^2 e da interrupção na comunicação, os dados ainda são trocados, permitindo a manutenção da tensão no barramento CC e a adaptação do compartilhamento de corrente/potência conforme os parâmetros estabelecidos. Na situação (H), a comunicação entre os conversores é restaurada, fechando novamente o anel da rede de comunicação.

Na situação (I), a carga R_{L2} é desconectada do barramento CC, resultando em uma situação em que somente o sistema FV é capaz de fornecer praticamente toda a potência necessária para alimentar a carga R_{L1} . Na situação (J), a irradiância é reduzida para 400 W/m^2 , retornando às condições equivalentes à situação (C). Em seguida, a microrrede CC é isolada (L), e a carga é suprida exclusivamente pelo conversor B2 e o conversor B1 associado ao sistema FV.

A Tabela 49 resume os valores numéricos obtidos em regime permanente para cada um dos modos de operação. Essas análises demonstram a capacidade de adaptação e controle da microrrede em diferentes cenários operacionais.

Figura 60 - Desempenho experimental do controle secundário do cenário 3 – Anel: Tensão de saída dos conversores (v_{B1} , v_{B2} , v_{CIR}); correntes de saída dos conversores (i_{B1} , i_{B2} , i_{CIR}) e potência de saída dos conversores (P_{B1} , P_{B2} , P_{CIR}) (30s/div).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 49 - Valores numéricos experimentais em regime permanente do controle secundário do cenário 3 - Anel.

	v_{B1} [V]	v_{B2} [V]	v_{CIR} [V]	i_{B1} [A]	i_{B2} [A]	i_{CIR} [A]	P_{B1} [W]	P_{B2} [W]	P_{CIR} [W]
A	244,04	243,70	244,31	0,00	1,55	2,31	0,00	377,49	565,32
B	247,13	247,40	247,33	2,10	0,58	1,23	519,70	143,74	304,46
C	248,28	248,55	248,49	2,09	0,56	1,28	517,90	139,19	317,32
D	248,72	248,86	248,74	2,09	1,14	0,67	518,59	284,70	166,41
E	246,83	246,55	246,59	2,10	3,03	1,64	517,60	748,03	403,42
F	246,83	246,55	246,59	2,10	3,03	1,64	517,60	748,03	403,42
G	247,87	248,20	247,72	3,95	1,86	1,04	978,82	460,65	256,88
H	248,29	248,43	247,89	3,91	1,86	1,06	970,82	462,07	261,78
I	249,87	250,62	249,88	3,87	0,00	0,00	966,00	0,00	0,00
J	248,40	248,76	248,54	2,08	1,16	0,65	517,66	287,57	161,55
L	243,76	243,80	243,39	2,12	1,69	0,00	517,75	411,29	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 50 compara os erros experimentais do controle secundário em regime permanente na topologia de comunicação em anel. Na topologia em anel, é importante destacar que, mesmo durante uma interrupção na comunicação (evento F), os dados continuam a circular devido ao fluxo em anel se tornar em linha. Isso permite que a microrrede mantenha a estabilidade da tensão e se adapte às condições de carga, embora com erros notáveis. A restauração da comunicação (H) corrige esses erros.

Tabela 50 - Erros experimentais obtidos do controle secundário em regime permanente: Cenário 3 – Anel.

	$v_{B1}[\%]$	$v_{B2}[\%]$	$v_{CIR}[\%]$	$i_{B1}[\%]$	$i_{B2}[\%]$	$i_{CIR}[\%]$	$P_{B1}[\%]$	$P_{B2}[\%]$	$P_{CIR}[\%]$
A	0,17	0,03	0,28	0,00	2,85	8,85	0,00	2,82	9,16
B	0,06	0,17	0,14	7,30	22,98	22,38	7,36	22,85	22,56
C	1,48	0,18	0,20	6,43	25,77	26,96	4,85	25,90	26,70
D	1,31	0,05	0,10	6,38	7,16	26,69	4,99	7,20	26,56
E	3,28	0,35	0,33	6,99	4,50	20,16	3,48	4,83	19,76
F	3,28	0,35	0,33	6,99	4,50	20,16	3,48	4,83	19,76
G	2,12	0,08	0,27	7,46	6,10	22,42	5,18	6,17	22,09
H	1,95	0,02	0,20	6,39	5,89	24,66	4,32	5,88	24,42
I	0,04	0,26	0,04	5,20	0,00	0,00	5,15	0,00	0,00
J	0,24	0,09	0,18	6,33	6,18	23,09	6,07	6,27	22,86
L	0,63	0,61	0,78	8,37	4,16	0,00	7,68	4,75	0,00

Fonte: Autoria Própria (2023).

6.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Em suma, os resultados obtidos por meio das simulações computacionais e os testes experimentais proporcionaram uma análise abrangente da microrrede CC, sob diversas condições operacionais e utilizando duas estratégias de controle secundário. Através das configurações em linha e anel de comunicação, foi possível observar como a rede se comporta diante de variações de carga, perturbações e falhas de comunicação.

As análises detalhadas dos diferentes modos de operação destacaram a eficácia das estratégias de controle secundário. A abordagem de compensação do desvio de tensão por média mostrou-se capaz de manter a estabilidade do barramento CC ao corrigir os desvios originados pelo controle por *droop*. Além disso, a proposta

de compartilhamento de potência permitiu uma distribuição eficiente de corrente e potência. Diante da literatura existente, a técnica proposta neste trabalho se difere, pois é capaz de alcançar o compartilhamento de corrente de acordo com o desejado. Os experimentos com o sistema FV também evidenciaram o impacto positivo da geração distribuída, contribuindo para a redução da dependência da rede elétrica CA.

As falhas de comunicação, em específico na topologia em anel, evidenciaram a resiliência do sistema, uma vez que, mesmo com interrupções pontuais, os dados conseguiram fluir e manter a integração dos conversores. Isso ressalta a importância do projeto robusto das estratégias de controle e da infraestrutura de comunicação.

Portanto, essas análises permitiram compreender o desempenho da microrrede CC em cenários diversos, proporcionando *insights* valiosos para aprimorar as estratégias de controle, melhorar a eficiência energética e garantir a confiabilidade da operação.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi desenvolvido um sistema de comunicação para o controle secundário de uma microrrede CC, juntamente com uma proposta de estratégia de compartilhamento de corrente/potência. A comunicação entre DSCs necessária para aplicação do controle é baseada em uma rede de comunicação que faz uso do protocolo UART. O enfoque foi dado a uma proposta de compartilhamento proporcional de potência/corrente em uma topologia de microrrede radial simples composta por três conversores.

Na implementação da técnica de controle secundário, visando corrigir os desvios de tensão e garantir o compartilhamento adequado, foi adotada uma abordagem distribuída. A correção da tensão do barramento CC foi realizada pela diferença entre a média das tensões de saída dos conversores e a tensão de referência.

A técnica proposta para compartilhamento de corrente/potência envolveu o cálculo da diferença entre a potência gerada pelo conversor atual e a soma das potências ativas dos conversores vizinhos. O ajuste dessa diferença, através da modificação do coeficiente de *droop*, permitiu alcançar a alocação desejada da potência nos três cenários trabalhados.

Ao utilizar o módulo SCI para o sistema de comunicação, obteve-se uma solução eficaz e versátil. O SCI ofereceu uma infraestrutura sólida para a troca de informações entre os conversores, promovendo o controle e compartilhamento precisos de corrente/potência. Suas vantagens incluem uma interface serial de baixo custo e amplamente disponível, juntamente com a capacidade de transmissão confiável. Entretanto, reconhece-se que o uso do módulo SCI apresenta algumas limitações, como a capacidade limitada de canais de transmissão de dados. Para microrredes com maior demanda de transferência de informações, a exploração de alternativas pode ser necessária.

A avaliação da rede de comunicação foi realizada em duas arquiteturas: anel e linha. Nota-se que a abordagem em anel se destaca devido à sua robustez em situações de falha e à sua capacidade de ser adaptada para uma arquitetura em linha, garantindo a comunicação entre os conversores e de testes com falhas de comunicação.

Outra contribuição relevante deste trabalho foi a simulação computacional da estratégia de controle secundário em uma microrrede CC. A utilização do *TrueTime-Toolbox* permitiu a modelagem da rede de comunicação, viabilizando a transmissão das variáveis de potência entre os conversores.

Há potencial para explorar abordagens mais complexas de controle secundário e/ou terciário, considerando outras técnicas e configurações de microrredes. Esta pesquisa serve como base para futuras investigações visando aprimorar ainda mais o desempenho e a eficácia das microrredes CC.

7.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Como direções para o desenvolvimento futuro desta pesquisa, identificam-se os seguintes aspectos:

- Implementar o controle Proporcional-Integral (PI) como parte da estratégia de controle secundário para lidar com desvios de tensão;
- Implementar o controle a nível terciário na microrrede estudada;
- Investigar outras abordagens de controle secundário encontradas na literatura, tanto para o compartilhamento de corrente/potência quanto para a correção de desvios de tensão no barramento CC;
- Comparar a técnica de compartilhamento de potência proposta com outras técnicas disponíveis na literatura;
- Explorar diferentes redes de comunicação;
- Expandir o escopo da pesquisa para incluir sistemas trifásicos.

Essas propostas de continuidade enriqueceriam ainda mais o conhecimento e a aplicabilidade das microrredes, contribuindo para o avanço das tecnologias de distribuição de energia eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

_____. TMS320x2833x, 2823x System Control and Interrupts Reference Guide. Dallas, TX, 2010.

ABDELGAWAD, H.; SOOD, V. K. **A comprehensive review on microgrid architectures for distributed generation**. 2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). **Anais IEEE**, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 12 abr., 2019.

AHMETHODZIC, L.; MUSTAFA MUSIC. Comprehensive review of trends in microgrid control. **Renewable energy focus**, v. 38, p. 84–96, 2021.

ALFERGANI, A. et al. **Control of master-slave microgrid based on CAN bus**. 2017 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT). **Anais...IEEE**, 2017.

ALMON, L. et al. **Desynchronization and MitM attacks against neighbor awareness networking using OpenNAN**. Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access. **Anais...** New York, NY, USA: ACM, 2021.

ALTIN, N.; EYIMAYA, S. E. **A review of microgrid control strategies**. 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA). **Anais... IEEE**, 2021.

ANAND, S.; FERNANDES, B. G.; GUERRERO, J. **Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, n. 4, p. 1900–1913, abr. 2013.

ANGÉLICO, B. A.; CAMPANHOL, L. B. G.; OLIVEIRA DA SILVA, S. A. Proportional–integral/proportional–integral–derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET power electronics**, v. 7, n. 10, p. 2647–2659, 2014.

AUGUSTINE, S.; LAKSHMINARASAMMA, N.; MISHRA, M. K. Control of photovoltaic-based low-voltage dc microgrid system for power sharing with modified droop algorithm. **IET Power Electronics**, v. 9, n. 6, p. 1132–1143, 18 maio 2016.

BASSO, T.; HAMBRICK, J.; DEBLASIO, D. **Update and review of IEEE P2030 Smart Grid Interoperability and IEEE 1547 interconnection standards**. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). **Anais...IEEE**, 2012.

BBC NEWS BRASIL. O dia em que a Terra vai atingir 8 bilhões de habitantes, segundo a ONU. **BBC**, 11 jul. 2022.

BIDRAM, A. et al. **Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 28, n. 3, p. 3462–3470, 2013.

BIDRAM, A.; DAVOUDI, A. **Hierarchical Structure of Microgrids Control System**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 3, n. 4, p. 1963–1976, dez. 2012.

BRITO, M. A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. 2013. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Fei/UNESP, Ilha Solteira, 2013.

BROOKS, A. et al. Demand dispatch. IEEE Power and Energy Magazine, v. 8, n. 3, p. 20–29, 2010.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. **Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação**. Eletrônica de Potência, Florianópolis, v. 13, n.3, p.141-146, 2008

CARNEIRO, A. V. **Implementação de uma microrrede supervisionada de conversão solar fotovoltaica na Universidade Federal do Ceará**. Mestrado, 2017.

CERVIN, A.; HENRIKSSON, D.; OHLIN, M. **TRUETIME 2.0 Reference Manual**. Department of Automatic Control, Lund University (fev, 2016), 2016. Disponível em: <https://archive.control.lth.se/media/Research/Tools/TrueTime/report_2016-02-10.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2023.

CHANG, G. et al. **Energy production and its emission generation impact on the environment**. Current science, v. 121, n. 2, p. 316, 2021.

CHVOSTEK, T.; KRATKY, A.; FOLTIN M. **Simulation of Network Using TrueTime Toolbox**. Institute of Control and Industrial Informatics, Faculty of Informatics and Information Technologies, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovak Republic, 2007

(PDF) Simulation of Wireless Network Using TrueTime Toolbox. Available from: https://www.researchgate.net/publication/334762098_Simulation_of_Wireless_Network_Using_TrueTime_Toolbox [accessed Nov 01 2023]. DAM, D. H.; LEE, H. **A power distributed control method for proportional load power sharing and bus voltage restoration in a DC microgrid**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, n. 4, p. 3616–3625, 1 jul. 2018.

DOMIJAN JR, A. et al. **Simulation Study of the World's First Distributed Premium Power Quality Park**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1483–1492, abr. 2005.

DRAGIČEVIĆ, T. et al. **Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 2, p. 695–706, fev. 2014a.

DRAGIČEVIĆ, T.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. **A Distributed Control Strategy for Coordination of an Autonomous LVDC Microgrid Based on Power-Line Signaling**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 61, n. 7, p. 3313–3326, 1 jul. 2014b.

DRAGIČEVIĆ, Tomislav et al. **DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues**. IEEE transactions on power electronics, v. 31, n. 5, p. 3528-3549, 2016.

DUAN, J. et al. **Study on the voltage level sequence of future urban DC distribution network in China: A Review**. International journal of electrical power & energy systems, v. 117, n. 105640, p. 105640, 2020.

EDIRISINGHE, S. et al. Universal optical network architecture for future wireless LANs [Invited]. **Journal of optical communications and networking**, v. 13, n. 9, p. D93, 2021.

EUROSTAT. **Electricity from renewable sources on the rise**. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230127-1>>. Acesso em: 26 out. 2023.

FOTOPOULOU, M. et al. State of the art of low and Medium Voltage direct current (DC) microgrids. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5595, 2021

FOVINO, I. N. et al. Design and implementation of a secure modbus protocol. Em: **IFIP Advances in Information and Communication Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 83–96.

FRANQUELO, L. G.; LEON, J. I. How power electronics contribute to the current energy arena. 2013 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). Anais...IEEE, 2013.

GAO, F. et al. **Primary and secondary control in DC microgrids: a review**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, v. 7, n. 2, p. 227–242, 19 dez. 2018.

GOMES DE OLIVEIRA, J. F.; GUIMARAES TRINDADE, T. C. **Sustainability performance evaluation of renewable energy sources: The case of Brazil**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

GUERRERO, J. M. et al. **Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 1, p. 158–172, 1 jan. 2011.

GULIN, M. **Control of a DC Microgrid**, 2012.

GUPTA, A. K. et al. **Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (UART)**. 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). Anais...IEEE, 2020.

HANZAEI, S. H. et al. **Control of DC microgrids: A review**. 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Anais...IEEE, 2021.

HATZIARGYRIOU, N. D. et al. **Microgrids - Large scale integration of microgeneration to low voltage grids**. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00526633/>>. Acesso em: 19 out. 2022.

HELDWEIN, M.L., **Microrredes em Corrente Contínua: Qualidade de Fornecimento e Eficiência em Futuras Redes de Distribuição**. 2010.

HUNT, S.; SHUTTLEWORTH, G. **Competition and choice in electricity**. [s.l.] Chichester John Wiley & Sons, 1999.

IEA – International Energy Agency. Solar PV – Tracking Clean Energy Progress. Disponível em: <<https://www.iea.org/tcep/power/renewables/solar/>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

IEEE. **IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers - IEEE Std 2030.7™-2017**. Nova Iorque, 2017.

JOLFAEI, A., Kant, K. A **lightweight integrity protection scheme for low latency smart grid applications**. Computers and Security, 2018 Oct 13.

JOLFAEI, A., Kant, K. A. lightweight integrity protection scheme for fast communications in smart grid. In Proceedings of the 14th International Conference on Security and Cryptography, Madrid, Spain, 2017, pp. 31–42.

JUSTO, J. J. et al. **AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 24, p. 387–405, ago. 2013.

KAKIGANO, H. et al. **Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system**. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, jun. 2010.

KAUSHIK, P.; SINGH, D. P.; RAJPOOT, S. **Fibre optic communication in 21st century**. 2020 International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM). **Anais...IEEE**, 2020.

KONDORO, A. et al. A low latency secure communication architecture for microgrid control. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6262, 2021.

KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. **IEEE access: practical innovations, open solutions**, v. 5, p. 12230–12256, 2017.

KUMAR, J. et al. **A review on overall control of DC microgrids**. Journal of Energy Storage, v. 21, p. 113–138, fev. 2019.

KUMAR, S.; ISLAM, S.; JOLFAEI, A. Microgrid communications - protocols and standards. Em: **Variability, Scalability and Stability of Microgrids**. [s.l.] Institution of Engineering and Technology, 2019. p. 291–326.

LI, J. et al. **UART controller with FIFO buffer function based on APB bus**. 2022 IEEE 16th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID). **Anais...IEEE**, 2022.

LU, X. et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy. **IEEE transactions on power electronics**, v. 29, n. 4, p. 1800–1812, 2014.

LU, X. et al. **Hierarchical Control of Parallel AC-DC Converter Interfaces for Hybrid Microgrids**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 5, n. 2, p. 683–692, mar. 2014.

MACHADO, S., **Técnicas de modelagem de pequenos sinais para microrredes CA ilhadas considerando impedância virtual e conversores multifuncionais controlados em corrente**. 2021. Tese (Doutorado em Sistemas Dinâmicos) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2021. doi:10.11606/T.18.2021.tde-21092021-174051. Acesso em: 2022-10-19.

MATHEBULA, V. C.; SAHA, A. K. Mission critical safety functions in IEC-61850 based Substation Automation System - A reliability review. **International journal of engineering research in Africa**, v. 48, p. 149–161, 2020.

MENG, L. et al. **Modeling and Sensitivity Study of Consensus Algorithm-Based Distributed Hierarchical Control for DC Microgrids**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 7, n. 3, p. 1504–1515, maio 2016.

MITRA, S. **Digital signal processing: A computer-based approach**. 4. ed. Nova Iorque, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 2010.

MOHAMMED, A. et al. AC microgrid control and management strategies: Evaluation and review. **IEEE power electronics magazine**, v. 6, n. 2, p. 18–31, 2019.

MORADI, M.; RAZINI, S.; HOSSEINIAN, S. **State of art of multiagent systems in power engineering: A review**. 2016. 814-824

NASIRIAN, V. et al. **Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 29, n. 4, p. 944–956, 1 dez. 2014.

NASIRIAN, V. et al. **Distributed Cooperative Control of DC Microgrids**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 4, p. 2288–2303, 1 abr. 2015.

NREL. **Electrification & Decarbonization: Exploring U.S. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Scenarios with Widespread Electrification and Power Sector Decarbonization**. julho de 2017.

ONS, Nota Técnica nº NT-ONS DPL 0067-2023, “**Diagnóstico da rede básica de fronteira das regiões norte e triângulo de Minas Gerais**”, de julho de 2023.

ORGANIZAÇÃO LATINO AMERICANA DE ENERGIA – OLADE. (2017). Energy Planning Manual – 2017.

OTOPOULOU, M. et al. State of the art of low and Medium Voltage direct current (DC) microgrids. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5595, 2021.

PARHIZI, S. et al. **State of the art in research on microgrids: A review**. IEEE Access, v. 3, p. 890–925, 2015.

POURBEIK, P.; KUNDUR, P. S.; TAYLOR, C. W. **The anatomy of a power grid blackout - Root causes and dynamics of recent major blackouts**. IEEE Power and Energy Magazine, v. 4, n. 5, p. 22–29, set. 2006.

PRABHALA, V. et al. **An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits**. Energies, v. 11, n. 9, p. 2463, 17 set. 2018.

PRABHU, M. et al. **A comprehensive review of PLC based intelligent traffic light control system**. 2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). **Anais...IEEE**, 2021.

PRAGALLAPATI, N., RANADE, S. J., & LAVROVA, O. **Cyber physical implementation of improved distributed secondary control of DC microgrid**. 2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE).

QIAO, W.; YIN, X. Understanding the impact on energy transition of consumer behavior and enterprise decisions through evolutionary game analysis. **Sustainable production and consumption**, v. 28, p. 231–240, 2021.

QIN, Z. et al. Low-power wide-area networks for sustainable IoT. **IEEE wireless communications**, v. 26, n. 3, p. 140–145, 2019.

QUELHAS, D. N. G. S. S. **Multiple Sensor Interface by the same hardware to USB and serial connection**. 2023. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2107.10258>>.

REBOURS, Y.; KIRSCHEN, D. “**A Survey of Definitions and Specifications of Reserve Services**,” Internal Report of the University of Manchester, Release 2, Oct. 2005.

RICHARD, A.; APPIAH-KUBI, P. **Design and performance of a split protocol architecture on Distributed Network Protocol 3 (DNP3)**. 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). **Anais...IEEE**, 2017.

SAHOO, S.; MISHRA, S. A. **Distributed Finite-Time Secondary Average Voltage Regulation and Current Sharing Controller for DC Microgrids**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 10, n. 1, p. 282–292, jan. 2019.

SAKKAS, S. Control of a DC Microgrid, 2018.

SAMPAIO, L P.; **Uma nova metodologia de projeto e controle para o inversor Boost (CSI) monofásico para o aproveitamento de fontes alternativas e renováveis de energia elétrica**. 2010. 111f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2013.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de automação distribuído: Uma abordagem baseada em multiagentes aplicada a sistemas de distribuição de energia elétrica em média tensão**. N.226. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SERBAN, I., CESPEDES, S., MARINESCU, C., AZURDIA-MEZA, C. A., GOMEZ, J. S., & HUEICHAPAN, D. S. (2020). Communication requirements in microgrids: A

practical survey. *IEEE access: practical innovations, open solutions*, 8, 47694–47712. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977928>

SETIAWAN, M. A. et al. **ZigBee-Based Communication System for Data Transfer Within Future Microgrids**. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 5, p. 2343–2355, set. 2015.

SHUAI, Z. et al. Microgrid stability: Classification and a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 167–179, 2016

SHUKLA, P. et al. **Design and development of a MODBUS automation system for industrial applications**. 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). **Anais...IEEE**, 2017.

SILVA, S. A. O. **Sistema de energia ininterrupta *line interactive* trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. 2001. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, W. W. A. G. **Desenvolvimento de métodos para controle distribuído em nanoredes c.c.: compartilhamento de potência e Restauração de tensão**. 2020.

SILVA, W. W. A. G.; OLIVEIRA, T. R.; DONOSO-GARCIA, P. F. **Hybrid Distributed and Decentralized Secondary Control Strategy to Attain Accurate Power Sharing and Improved Voltage Restoration in DC Microgrids**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 35, n. 6, p. 6458–6469, jun. 2020.

TAVASSOLI, B.; FERREIDUNIAN, A.; MEHDI, S. Communication system effects on the secondary control performance in microgrids. **IET renewable power generation**, v. 14, n. 12, p. 2047–2057, 2020.

THALE, S.; AGARWAL, V. **Controller Area Network (CAN) based smart protection scheme for Solar PV, fuel cell, Ultra-Capacitor and wind energy system based microgrid**. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. **Anais...IEEE**, 2012.

TON, D. T.; SMITH, M. A. The US department of energy's microgrid initiative. **The Electricity Journal**, v. 25, n. 8, p. 84-94, 2012

TOPA GAVILEMA, Á. O. et al. Towards optimal management in microgrids: An overview. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 5202, 2021.

VILLENEUVE, P. L. **Concerns generated by islanding**. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 2, n. 3, p. 49–53, maio 2004.

VOUMICK, D.; DEB, P.; KHAN, M. M. Operation and control of microgrids using IoT (internet of things). *Journal of software engineering and applications*, v. 14, n. 08, p. 418–441, 2021.

VU, T. V. et al. **Robust adaptive droop control for DC microgrids**. *Electric Power Systems Research*, v. 146, p. 95–106, maio 2017.

WANG, H. et al. **Distributed secondary and tertiary controls for I–V droop-controlled-paralleled DC–DC converters**. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 7, p. 1538–1546, 19 fev. 2018.

WANG, P. et al. **An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids With Enhanced Dynamic Current Sharing Performance.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 31, n. 9, p. 6658–6673, set. 2016.

WOOLDRIDGE, M. J. **An Introduction to MultiAgent Systems.** 2nd Edition. 2009.

XIA, Y. et al. **Decentralized control for parallel bidirectional power converters of a grid-connected DC microgrid.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7793726>>. Acesso em: 6 nov. 2022.

YANG, J. et al. **A Decentralized Control Method for DC Microgrids With Improved Current Sharing Accuracy.** 2016.

YONGGANG, F. Multiple access point operation of a wireless network. Patent, 2020.

ZAERY, M. et al. **Operational cost reduction based on distributed adaptive droop control technique in DC microgrids.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8096498>>. Acesso em: 6 nov. 2022.

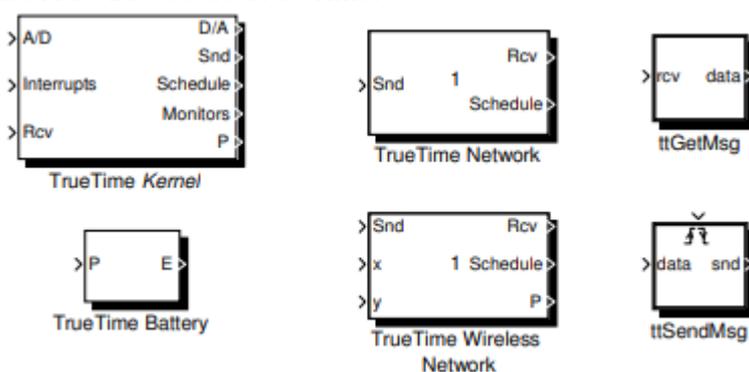
APÊNDICES

APÊNDICE A – TOOLBOX TRUE TIME

O simulador *True Time* no Simulink/MATLAB® foi desenvolvido pelo Departamento de Automação e Controle da Universidade de Lund, Suécia. Composto por seis blocos (Figura A 1), disponibiliza para o usuário ferramentas capazes de facilitar a co-simulação no estudo da execução, em tempo real, de *Kernels*, transmissões em redes e da dinâmica de instalações (CERVIN; HENRIKSSON; OHLIN, 2016).

Esta *toolbox* oferece a possibilidade de escrever tarefas como arquivos M, funções C++ ou chamar diagramas de blocos do Simulink de dentro das funções do código. Os blocos *TrueTime* geralmente incluem redes como Ethernet, CAN, TDMA, FDMA, Round Robin ou Switched Ethernet). Suporta a simulação de redes sem fio (802.11b/g WLAN e 802.15.4 ZigBee) e dispositivos alimentados por bateria. Em uma breve descrição podemos dizer, que TrueTime é uma pequena biblioteca de blocos de simulação que estendem a usabilidade do Simulink/MATLAB® para simular o processo de controle de redes (CHVOSTEK et. al, 2007).

Figura A 1 - Blocos do True Time.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A.1 BLOCO KERNEL TRUE TIME

O bloco *Kernel* do *True Time* utiliza uma função do Simulink/MATLAB® que simula uma central de processamento com um *Kernel* baseado em eventos, operações de conversão A/D e D/A, interface de dados (I/O), comunicação via rede, canal externo para interrupções e variáveis de monitoramento (Schedule e Monitors). (OHLIN et. al., 2007).

Este bloco do *True Time* é utilizado para especificar o número de entradas e saídas do bloco, definir a política de agendamento das mensagens, criação das tarefas, tratamentos de interrupções, eventos, monitoração etc. na simulação. Isto é efetuado através dos parâmetros de inicialização existentes para cada bloco de *Kernel*.

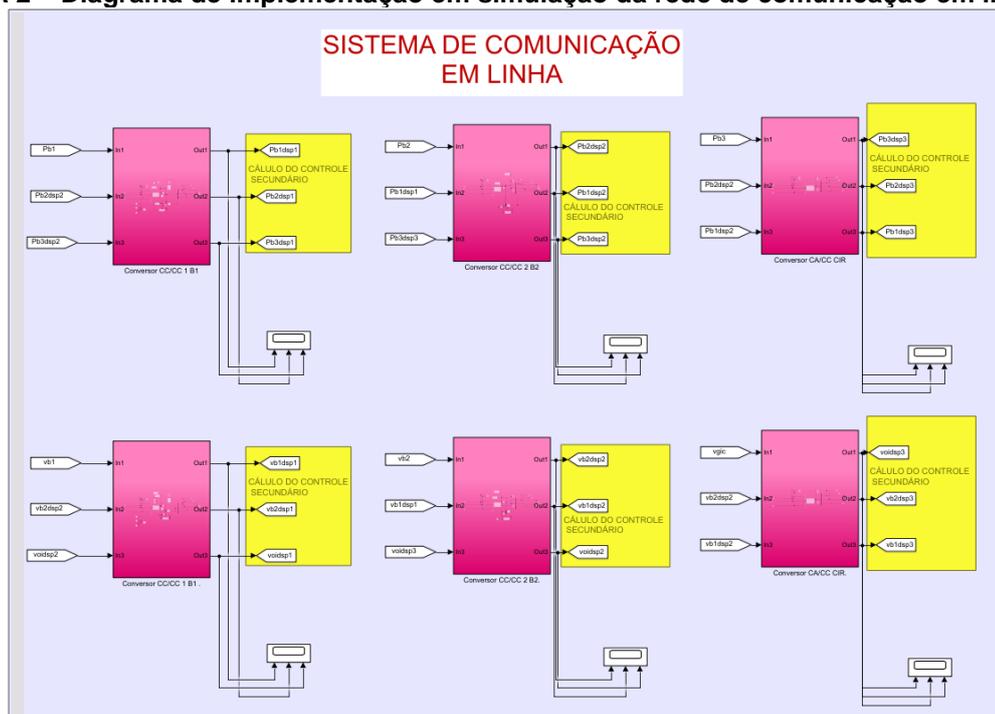
Parâmetros do *TrueTime kernel* (CHVOSTEK et. al, 2007):

- Função de inicialização, define o nome de um arquivo M ou um arquivo MEX onde o código de inicialização está armazenado;
- Bateria, é um parâmetro opcional que pode ser usado se o dispositivo for alimentado por bateria;
- Desvio do relógio e deslocamento do relógio, pode configurar a diferença de tempo do valor do tempo padrão. Quando o desvio do relógio é definido como 0,01, significa que a hora local do dispositivo funcionará 1% mais rápido do que tempo real. O deslocamento do relógio define o deslocamento de tempo da primeira execução da simulação.

A.2 DIAGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRUETIME

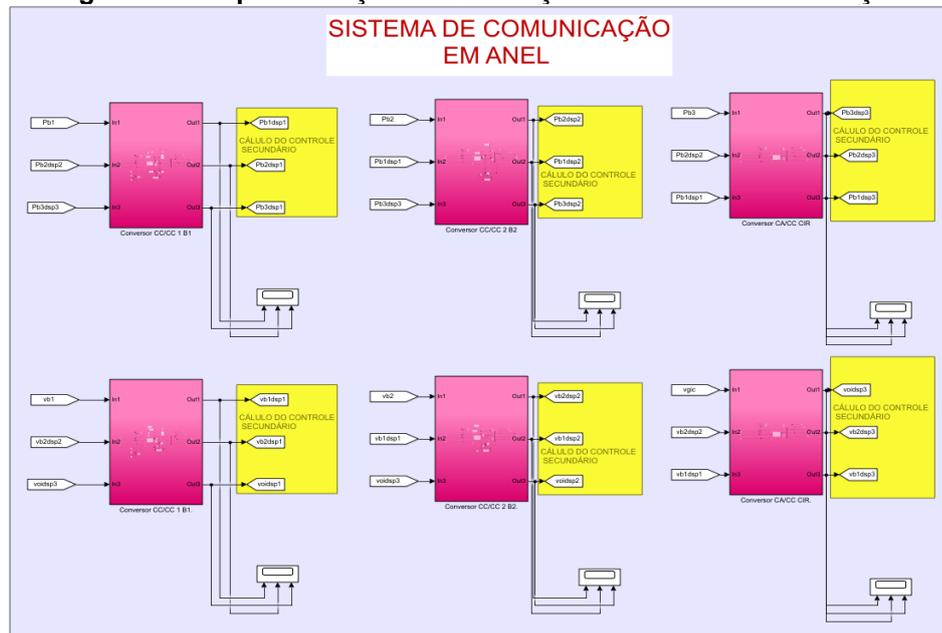
O diagrama de implementação do *truetime* para a rede de comunicação em linha e anel estão expostos nas Figuras A 2 e A 3, respectivamente.

Figura A 2 – Diagrama de implementação em simulação da rede de comunicação em linha.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura A 3 – Diagrama de implementação em simulação da rede de comunicação em linha.

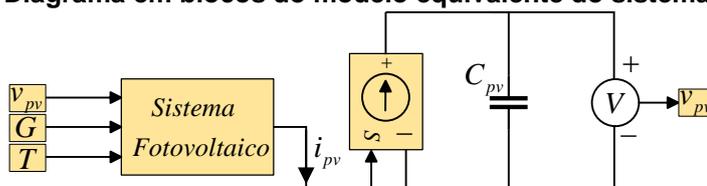


Fonte: Autoria Própria (2023).

APÊNDICE B – Modelo Equivalente da Célula Fotovoltaica

Na literatura, (CASARO; MARTINS, 2008) apresenta o equacionamento por meio de um circuito equivalente que descreve o funcionamento da célula fotovoltaica considerando as não idealidades, o qual pode ser representado por uma fonte de corrente conectada em paralelo com um capacitor, conforme Figura B 1.

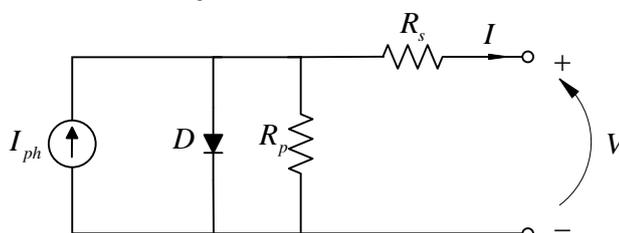
Figura B 1 - Diagrama em blocos do modelo equivalente do sistema FV.



Fonte: Autoria Própria (2023).

onde, v_{pv} e i_{pv} representam a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico. As variáveis T e G indicam as condições climáticas, sendo a temperatura em Kelvin e a irradiância em W/m^2 , respectivamente.

Figura B 2 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A determinação da corrente i_{pv} , mostrada na Figura B.1 de saída da célula fotovoltaica é expressa por:

$$i_{pv} = IM_p \quad (\text{B.1})$$

Em que M_p indica o número de placas fotovoltaicas colocadas em paralelo.

Já I pode ser obtido como segue:

$$I = I_{ph} - I_r \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{\eta k T}} - 1 \right) - \frac{(V+R_s I)}{R_p} \quad (\text{B.2})$$

onde: V é a tensão de saída da célula fotovoltaica, I é a corrente de saída da célula fotovoltaica, I_{ph} é a fotocorrente, I_r é a corrente de saturação reversa da célula, R_s e R_p representam a resistência série e paralela, respectivamente, q é a carga do elétron,

dada por $1,6 \cdot 10^{-19} C$, n é o fator de idealizada da junção p-n, k é a constante de Boltzmann dada por $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$.

A influência das variáveis climáticas G e T está condicionada à fotocorrente I_{ph} que depende desses parâmetros, a Equação (B.3) descreve essa relação. Já a corrente de saturação reversa da célula I_r é descrita pela Equação (B.4).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_r)] \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (B.3)$$

$$I_r = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left[\frac{qEg}{\eta k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (B.4)$$

Em circuito aberto, $I = 0$ e $V = V_{oc}$, a corrente de saturação reversa da célula é dada por:

$$I_r = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{qV_{oc}}{\eta kT}} - 1} \quad (B.5)$$

Nas condições STC (do inglês - *Standard Test Conditions*), a corrente de saturação reversa da célula é igual a corrente de saturação reversa de referência $I_r = I_{rr}$, que pode ser obtido por:

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{qV_{oc}}{\eta kT}} - 1} \quad (B.6)$$

Nas três últimas equações, I_{sc} é a corrente de curto-circuito por célula, V_{oc} é a tensão de circuito aberto por célula, α é o coeficiente de temperatura de I_{sc} , T_r é temperatura de referência 298 K.

Entretanto para a solução de (B.2) é necessário a utilização de algum método numérico, já que não há solução algébrica. Como uma alternativa de solução, (CASARO; MARTINS, 2008) apresenta o método número de Newton Rapshon, que aplicado em (B.2) resulta nas equações (B.7) e (B.8).

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{\eta kT}} - 1 \right) - \frac{(V+R_s I)}{R_p} \quad (B.7)$$

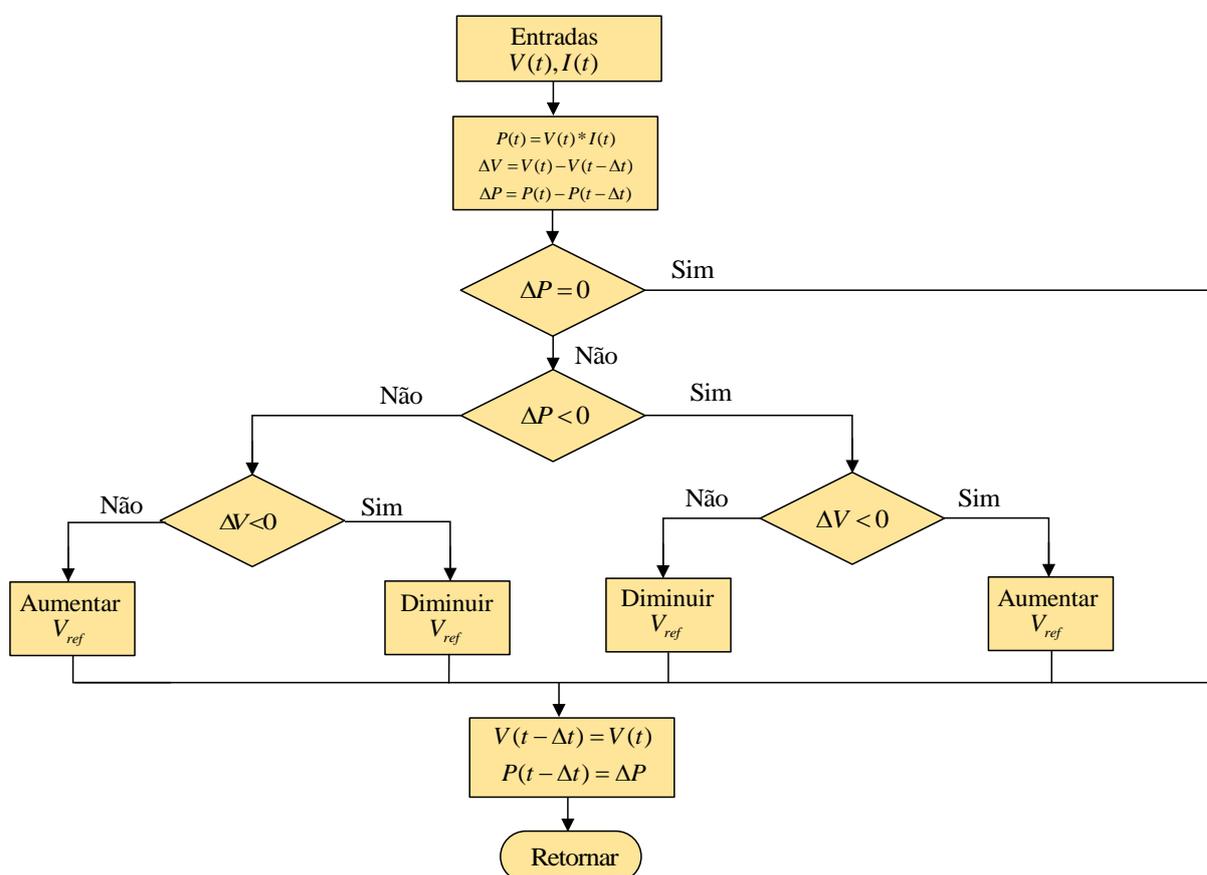
$$f'(I) = -1 - I_r \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{\eta kT}} \right) - \frac{qR_s}{\eta kT} - \frac{R_s}{R_p} \quad (B.8)$$

A partir da solução das equações apresentadas é possível gerar as curvas características I-V e P-V.

APÊNDICE C – Técnica de Seguimento do Ponto de Máxima Potência P&O

O método da Perturba e Observa (P&O – do Inglês *Perturb and Observe*) funciona incrementando e decrementando periodicamente a tensão de saída do FV e comparando com a potência do passo anterior e atual. Sendo assim, caso a tensão altere e a potência se intensifica, o sistema de controle atua no ponto de operação continuando na posição medida, entretanto se a tensão não mudar, o ponto de operação atua na posição oposta, conforme pode ser visto na Figura C.1. Este método requer sensores de tensão e de corrente para o cálculo da potência (BRITO, 2013).

Figura C 1 - Fluxograma do algoritmo P&O.



Fonte: Autoria Própria (2023).

APÊNDICE D – Projetos dos Controladores

No trabalho de Angélico, Campanhol e Silva, (2014) é apresentado uma metodologia baseada na análise de frequência via diagrama de bode. Nesta metodologia a frequência de cruzamento e margem de fase são requisitos de projetos. O procedimento para obtenção dos ganhos K_i e K_p são descritos adiante.

Etapa 1 – Plotar o diagrama de Bode do sistema a ser compensado ($G_p(s)$) e avaliar o ângulo de fase (φ_p) na frequência de cruzamento especificada, ω_c .

Etapa 2 – Verificar a contribuição angular (φ_c atraso de fase) que o compensador deve fornecer para atender às especificações de margem de fase desejada MF_d na frequência de cruzamento especificada ω_c . A contribuição angular é determinada por:

$$\varphi_c = MF_d - (\varphi_p + 180^\circ) \quad (D.1)$$

Etapa 3 – Com a finalidade de ajustar o ângulo de fase do sistema compensado em malha aberta $G_{MAC}(s)$ de acordo com a margem de fase é necessário adicionar um compensador de fase com a planta a ser compensada, conforme:

$$C(s) = \frac{T_i s + 1}{s} \quad (D.2)$$

Em que T_i é dado por:

$$T_i = \frac{\text{tg}(\omega_c + 90^\circ)}{\omega_c} \quad (D.3)$$

Etapa 4 – Incluir um ganho em série com o sistema compensado, calculado por meio da equação (D.4), com o objetivo que o módulo compensado em malha aberta G_{MAC} cruze 0 dB na frequência de cruzamento especificada.

$$K_C = \frac{1}{|G_{MAC}|} \quad (D.4)$$

Sendo assim, de acordo com a equação (D.2), que descreve a função de transferência do controlador PI, os ganhos K_i e K_p podem ser obtidos pelas equações (D.5), (D.6) e (D.7), respectivamente.

$$G_{PI}(s) = K_i \left(\frac{T_i s + 1}{s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (D.5)$$

$$K_p = K_i T_i \quad (D.6)$$

$$K_i = K_C \quad (D.7)$$