

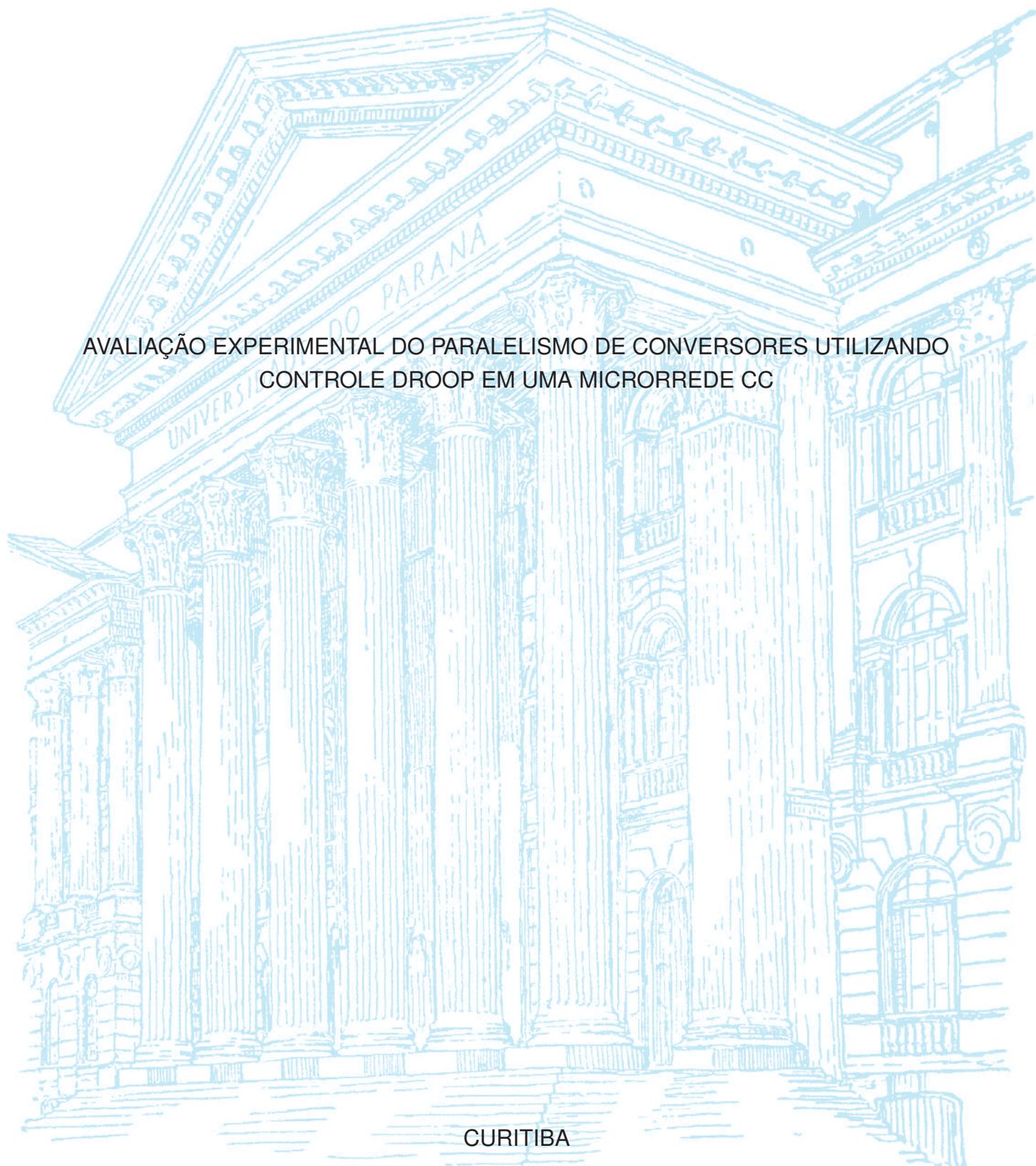
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO AFFONSO GUARINHO SILVA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PARALELISMO DE CONVERSORES UTILIZANDO  
CONTROLE DROOP EM UMA MICRORREDE CC

CURITIBA

2023



RODRIGO AFFONSO GUARINHO SILVA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PARALELISMO DE CONVERSORES UTILIZANDO  
CONTROLE DROOP EM UMA MICRORREDE CC

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silva, Rodrigo Affonso Guarinho

Avaliação experimental do paralelismo de conversores utilizando controle *Droop* em uma microrrede CC. / Rodrigo Affonso Guarinho Silva – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior.

1. Redes Inteligentes de energia (Microrredes). 2. Armazenamento de energia. I. Vilela Junior, João Américo. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
ELÉTRICA - 40001016043P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RODRIGO AFFONSO GUARINHO SILVA** intitulada: **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PARALELISMO DE CONVERSORES UTILIZANDO CONTROLE DROOP EM UMA MICRORREDE CC**, sob orientação do Prof. Dr. JOAO AMERICO VILELA JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 16 de Junho de 2023.

Assinatura Eletrônica  
21/06/2023 19:16:58.0

JOAO AMERICO VILELA JUNIOR  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
21/06/2023 16:42:17.0

GIDEON VILLAR LEANDRO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
26/06/2023 17:35:27.0

EDUARDO FELIX RIBEIRO ROMANELI  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
22/06/2023 10:45:25.0

GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que me apoiaram e me incentivaram ao longo deste processo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, o Professor Vilela, por sua orientação, dedicação e esforços em gerenciar as demandas necessárias ao longo deste trabalho. Além disso, agradeço ao Professor Gustavo por ter fornecido equipamentos, o que possibilitou a realização dos experimentos.

De maneira especial, agradeço à minha família pelo apoio e incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que me apoiaram e encorajaram a prosseguir com meu mestrado, tanto durante quanto após a graduação. Sem o incentivo e o apoio dessas pessoas, eu não teria tido o ímpeto necessário para enfrentar os desafios da área acadêmica.

Por fim, agradeço à CAPES pelo financiamento, que foi essencial para a realização deste trabalho. Sem o suporte financeiro da CAPES, este trabalho não teria sido possível.

*"Dedica-se a esperar o futuro apenas quem não sabe viver o presente."*

*Seneca*

## RESUMO

Nos últimos anos, o número de unidades de geração distribuída e de sistemas de armazenamento de energia tem aumentado significativamente, gerando um interesse crescente no controle de microrredes (MRs) como solução para os desafios decorrentes da maior penetração dessas modalidades na rede elétrica. Nesta dissertação, foram desenvolvidas estratégias de controle para o compartilhamento de carga entre dois conversores CC-CC através de um controle descentralizado em uma MR CC localizada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foram realizados ensaios em dois conversores de 30 kW acoplados em baterias de íons de lítio, conectados em paralelo. Utilizando um controlador lógico programável (CLP) foram implementados o controle *droop* de tensão e o controle *droop* de corrente, que foram responsáveis por definir os valores de referência das malhas internas de cada conversor de acordo com o modo de operação. Para avaliar a eficácia do controle, foram gerados degraus de carga por meio de resistências variáveis acopladas na MR CC, permitindo a análise do compartilhamento de carga, regulação e estabilidade da tensão na saída de cada conversor. Inicialmente, foram comparadas duas topologias de controle *droop*: a primeira baseada no paralelismo de duas fontes de tensão (FT) e a segunda aplicada em um conversor operando como FT em paralelo com outro conversor operando como fonte de corrente (FC). As medições obtidas revelaram diferenças inferiores a 1% entre os coeficientes *droop* parametrizados e medidos nos conversores operando individualmente como FT ou FC. Em condições de paralelismo, observou-se melhores resultados de compartilhamento de carga para cargas de mais alta potência conectadas na rede. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da metodologia adotada no controle primário, bem como os parâmetros que influenciam a estabilidade. O controle *droop* padrão do conversor apresenta limitações significativas, uma vez que está restrito a uma faixa de valores pré-definidos e não permite modificações em tempo real. Por fim, através da implementação do controle externo ao conversor, foi possível superar essas limitações, permitindo ajustes em tempo real e a aplicação de estratégias de controle mais flexíveis.

**Palavras-chaves:** Controle Droop. Compartilhamento de carga. Microrrede CC. Sistemas de Armazenamento de Energia.

## ABSTRACT

Over the last few years, the number of distributed generation units and energy storage systems has significantly increased, generating a growing interest in microgrid (MG) control as a solution to the challenges resulting from the greater penetration of these modalities in the electrical grid. Control strategies have been developed for load sharing between two parallel-operated DC-DC converters through decentralized control in a DC microgrid located at the Department of Electrical Engineering (DELT) of the Federal University of Paraná (UFPR). Tests were conducted on two 30 kW DC-DC converters connected in parallel and coupled with lithium-ion batteries. Using a programmable logic controller (PLC), voltage droop control and current droop control were implemented, which were responsible for defining the reference values of the internal loops of each converter according to the operating mode. To evaluate the control effectiveness, voltage steps were generated through variable loads connected to the DC microgrid, allowing the analysis of current sharing, regulation, and voltage stability of each converter. Finally, two droop control topologies were compared: the first one based on the parallelism of two voltage sources (VS), and the second one applied to a converter operating as a voltage source in parallel with another converter operating as a current source (CS). The measurements obtained unveiled disparities of less than 1% between the parameterized and measured droop coefficients in converters functioning autonomously as VS or CS. In conditions of parallel operation, superior load sharing outcomes were observed for higher power loads linked to the grid. The findings obtained underscored the effectiveness of the chosen methodology in primary control, as well as the parameters that exert an influence on stability. The conventional converter droop control system demonstrates notable constraints, as it is confined to a predefined range of values and lacks the capacity for real-time modifications. Ultimately, through the incorporation of external control mechanisms for the converter, these constraints were overcome, thereby permitting real-time adjustments and the implementation of more adaptable control strategies.

**Key-words:** Droop Control. Load Sharing. DC Microgrid. Energy Storage Systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Diagrama simplificado de uma possível configuração de MR . . . . .	20
FIGURA 2 – Análise de frequência de palavras-chave em publicações sobre microrredes . . . . .	22
FIGURA 3 – Curva de descarga genérica de uma bateria . . . . .	29
FIGURA 4 – Controle centralizado, descentralizado e distribuído . . . . .	30
FIGURA 5 – Topologias de controle primário em um conversor CC-CC . . . . .	30
FIGURA 6 – Modelo equivalente <i>Thévenin</i> do conversor com o controle <i>droop</i> . . . . .	32
FIGURA 7 – Diagrama de blocos do controle <i>droop</i> - Fonte de Tensão . . . . .	33
FIGURA 8 – Diagrama de blocos do controle <i>droop</i> - Fonte de Corrente . . . . .	34
FIGURA 9 – Autorregulação no gerador síncrono . . . . .	35
FIGURA 10 – Cálculo do coeficiente <i>droop</i> em um conversor bidirecional . . . . .	36
FIGURA 11 – Limitações do controle <i>droop</i> convencional . . . . .	37
FIGURA 12 – Modelo simplificado de MR com dois conversores em paralelo . . . . .	38
FIGURA 13 – Modelo simplificado de dois conversores em paralelo com controle <i>droop</i> . . . . .	39
FIGURA 14 – Corrente desigual entre conversores paralelos com resistência de cabos variável . . . . .	40
FIGURA 15 – Diagrama de blocos do controle <i>droop</i> adaptativo . . . . .	42
FIGURA 16 – Coeficiente <i>droop</i> adaptativo em função estado de carga de uma bateria . . . . .	43
FIGURA 17 – Controle <i>droop</i> baseado em quadrante duplo da <i>SoC</i> . . . . .	45
FIGURA 18 – Fluxograma do controle <i>droop</i> baseado em quadrante duplo da <i>SoC</i> . . . . .	46
FIGURA 19 – Série histórica de publicações entre 1965 até 2020 . . . . .	50
FIGURA 20 – Índice G dos principais autores . . . . .	52
FIGURA 21 – Impacto da citação normalizada . . . . .	53
FIGURA 22 – Evolução cronológica de palavras-chaves na literatura . . . . .	54
FIGURA 23 – Diagrama de Venn da seleção de artigos na revisão sistemática da literatura . . . . .	55
FIGURA 24 – Barramento da microrrede CC - DELT . . . . .	63
FIGURA 25 – Conversor SINAMICS DCP 30 kW . . . . .	64
FIGURA 26 – Curva característica corrente-tensão do SINAMICS DCP 30kW . . . . .	65
FIGURA 27 – Curvas da bateria de modelo 21700 . . . . .	67
FIGURA 28 – SAE de íon-lítio . . . . .	67
FIGURA 29 – Controlador lógico programável: SIMATIC S7-1515-2 PN . . . . .	68

FIGURA 30 – IHM com o supervisor desenvolvido . . . . .	69
FIGURA 31 – Diagrama esquemático da comunicação e conexão elétrica . . . . .	70
FIGURA 32 – Malha fechada de controle de tensão simplificada do conversor SINAMICS DCP 30kW . . . . .	72
FIGURA 33 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário I . . . . .	72
FIGURA 34 – Degrau de carga para o <i>droop</i> interno (2,4 $\Omega$ ) - Cenário I . . . . .	73
FIGURA 35 – Corrente x Tempo - Cenário I . . . . .	76
FIGURA 36 – Tensão x Tempo - Cenário I . . . . .	76
FIGURA 37 – Tensão x Corrente - Cenário I . . . . .	77
FIGURA 38 – Diagrama de controle: <i>droop</i> externo para fonte de tensão . . . . .	78
FIGURA 39 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário II . . . . .	79
FIGURA 40 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo (2,4 $\Omega$ ) - Cenário II . . . . .	80
FIGURA 41 – Corrente x Tempo - Cenário II . . . . .	82
FIGURA 42 – Tensão x Tempo - Cenário II . . . . .	83
FIGURA 43 – Tensão x Corrente - Cenário II . . . . .	83
FIGURA 44 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário III . . . . .	84
FIGURA 45 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo (1,2 $\Omega$ ) e interno (1,2 $\Omega$ ) - Cenário III . . . . .	85
FIGURA 46 – Diagrama de controle: <i>droop</i> externo para fonte de corrente . . . . .	86
FIGURA 47 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário IV . . . . .	87
FIGURA 48 – Corrente x Tempo - Cenário IV . . . . .	89
FIGURA 49 – Tensão x Tempo - Cenário IV . . . . .	90
FIGURA 50 – Tensão x Corrente - Cenário IV . . . . .	90
FIGURA 51 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário V . . . . .	91
FIGURA 52 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário V - 1,2 $\Omega$ e 1,2 $\Omega$	94
FIGURA 53 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário V - 1,2 $\Omega$ e 0,6 $\Omega$	95
FIGURA 54 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário V - 1,2 $\Omega$ e 1,2 $\Omega$	96
FIGURA 55 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário V - 0,6 $\Omega$ e 1,5 $\Omega$	97
FIGURA 56 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário VI . . . . .	98
FIGURA 57 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário VI - 1,2 $\Omega$ e 1,2 $\Omega$ . . . . .	101
FIGURA 58 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário VI - 1,2 $\Omega$ e 0,6 $\Omega$ . . . . .	102
FIGURA 59 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário VI - 1,2 $\Omega$ e 1,2 $\Omega$ . . . . .	103
FIGURA 60 – Degrau de carga para o <i>droop</i> externo do Cenário VI - 1,2 $\Omega$ e 0,6 $\Omega$ . . . . .	104
FIGURA 61 – Faixas de carga na rede CC . . . . .	107
FIGURA 62 – Compartilhamento de carga ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) . . . . .	109

FIGURA 63 – Regulação de tensão ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) . . . . .	110
FIGURA 64 – Controle de malha fechada de tensão do SINAMICS DCP 30kW .	121
FIGURA 65 – Controle de malha fechada de corrente do SINAMICS DCP 30kW	122
FIGURA 66 – Aproximação da derivada no tempo para o método reverso de Euler	125

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Temas e Palavra-Chave . . . . .	48
TABELA 2 – Número de publicações encontradas em cada base em relação a palavra-chave . . . . .	49
TABELA 3 – Quantidade de artigos citados na literatura baseadas no número de publicações . . . . .	50
TABELA 4 – Principais periódicos da base da dados . . . . .	51
TABELA 5 – Dez principais artigos citados na literatura . . . . .	53
TABELA 6 – Artigos selecionados na revisão sistemática da literatura . . . . .	56
TABELA 7 – Artigos selecionados na revisão narrativa da literatura . . . . .	56
TABELA 8 – Parâmetros do Conversor CC-CC Bidirecional 30kW . . . . .	65
TABELA 9 – Parâmetros fixos das malhas de controle interna de tensão e corrente	66
TABELA 10 – Parâmetros das células de íon-lítio utilizados no SAE . . . . .	66
TABELA 11 – Especificações técnicas do controlador e seus periféricos . . . . .	68
TABELA 12 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário I	74
TABELA 13 – Resultados para o controle <i>droop</i> interno ( $R_{d_{int}} = 0 \Omega$ ) - Cenário I	74
TABELA 14 – Resultados para o controle <i>droop</i> interno ( $R_{d_{int}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário I	75
TABELA 15 – Resultados para o controle <i>droop</i> interno ( $R_{d_{int}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário I	75
TABELA 16 – Resultados para o controle <i>droop</i> interno ( $R_{d_{int}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário I	75
TABELA 17 – Resultados para o controle <i>droop</i> interno ( $R_{d_{int}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário I	75
TABELA 18 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário II	80
TABELA 19 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário II	81
TABELA 20 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário II	81
TABELA 21 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário II	82
TABELA 22 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário II	82
TABELA 23 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário III	84
TABELA 24 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário IV	88
TABELA 25 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário IV	88
TABELA 26 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário IV	88
TABELA 27 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário IV	88
TABELA 28 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário IV	89
TABELA 29 – Parâmetros do comissionamento dos conversores CC-CC - Cenário V . . . . .	91
TABELA 30 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) - Cenário V . . . . .	92

TABELA 31 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $0,6 \Omega$ ) - Cenário V . . . . .	93
TABELA 32 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) - Cenário V . . . . .	93
TABELA 33 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$ e $1,5 \Omega$ ) - Cenário V . . . . .	93
TABELA 34 – Parâmetros do comissionamento do conversor II (Modo: Fonte de Corrente) - Cenário VI . . . . .	99
TABELA 35 – Parâmetros do comissionamento do conversor I (Modo: Fonte de Tensão) - Cenário VI . . . . .	99
TABELA 36 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) - Cenário VI . . . . .	100
TABELA 37 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $0,6 \Omega$ ) - Cenário VI . . . . .	100
TABELA 38 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) - Cenário VI . . . . .	100
TABELA 39 – Resultados para o controle <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $0,6 \Omega$ ) - Cenário VI . . . . .	100
TABELA 40 – Coeficiente <i>droop</i> parametrizado e coeficiente <i>droop</i> medido . . .	105
TABELA 41 – Degrau de carga para o controle <i>droop</i> ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ): Fonte de Tensão . . . . .	106
TABELA 42 – Controle <i>droop</i> ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) . . . . .	107
TABELA 43 – Controle <i>droop</i> ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $0,6 \Omega$ ) . . . . .	108
TABELA 44 – Controle <i>droop</i> ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ e $1,2 \Omega$ ) - Diversas Cargas . . . . .	109
TABELA 45 – Parâmetros Gerais do conversor SINAMICS DCP . . . . .	123
TABELA 46 – Parâmetros de operação: Fonte de corrente . . . . .	123
TABELA 47 – Parâmetros de operação: Fonte de tensão . . . . .	123

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**BICO** Conectores e Binectores (do inglês - Binector and Connector )

**CA** Corrente Alternada

**CC** Corrente Contínua

**DOI** Identificador de Objeto Digital (do inglês - Digital Object Identifier)

**DoD** Profundidade de descarga (do inglês - Depth of Discharge)

**FC** Fonte de Corrente

**FT** Fonte de Tensão

**GD** Geração Distribuída

**MR** Microrrede

**OCV** Tensão de Circuito Aberto (do inglês - Open Circuit Voltage)

**RTDS** Simulador digital em tempo real (do inglês - Real Time Digital Simulator)

**SAE** Sistema de Armazenamento de Energia

**SoC** Estado de Carga (do inglês - State of Charge)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$R_b$	coeficiente <i>droop</i> adaptativo
$V_{ref}^*$	nova tensão de referência
$V_{ref}$	tensão de referência
$R_d$	coeficiente <i>droop</i> convencional
$V_{cc}$	tensão de saída do conversor
$I_{cc}$	corrente de saída do conversor
$I_{ref}$	corrente de referência
$R_{dm}$	coeficiente <i>droop</i> máximo
$R_{dp}$	coeficiente <i>droop</i> parametrizado
$i_{cc,max}$	corrente máxima de saída do conversor
$\Delta T$	intervalo de tempo
$R_{linha}$	resistências do cabo
$R_{carga}$	resistência da carga
$V_{carga}$	tensão da carga
$\Delta v$	regulação de tensão
$Soc_{min}^n$	estado de carga mínimo
$P_{cc,max}$	potência máxima de saída do conversor
$P_{cc}$	potência de saída do conversor
$V_{ref_p}^*$	nova tensão de referência do <i>droop</i> adaptativo
$P_{bat}$	potência da bateria

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>26</b>
2.1	MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA	26
2.1.1	Conversores CC-CC e Sistemas de armazenamento de energia	27
2.2	CONTROLE CENTRALIZADO, DESCENTRALIZADO E DISTRIBUÍDO	29
2.3	CONTROLE DE CORRENTE E DE TENSÃO	30
2.3.1	Controle <i>Droop</i> : Fonte de Tensão	31
2.3.2	Controle <i>Droop</i> : Fonte de Corrente	33
2.3.3	Coeficiente <i>Droop</i>	34
2.4	CONTROLE <i>DROOP</i> LINEAR PARA CONVERSORES PARALELOS	37
2.5	CONTROLE <i>DROOP</i> ADAPTATIVO	42
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>48</b>
3.1	METODOLOGIA PARA REVISÃO DE LITERATURA	48
3.1.1	Análise estatística da base de dados	49
3.1.2	Seleção de publicações da revisão da literatura	54
3.2	ANÁLISE DA LITERATURA	57
3.2.1	Controle <i>droop</i> linear	57
3.2.2	Controle linear com coeficiente <i>droop</i> variável	59
<b>4</b>	<b>ESTRUTURA DO LABORATÓRIO DE MICRORREDES</b>	<b>63</b>
4.1	MICRORREDE CC	63
4.2	CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL 30KW	64
4.2.1	Comissionamento e Operação das Malhas de controle do Conversor SINAMICS DCP	65
4.3	BATERIA DE ÍON-LÍTIO	66
4.4	CONTROLADOR SIMATIC S7-1515-2 PN	68
4.5	IHM — INTERFACE HOMEM MÁQUINA	68
4.6	REDE DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE DA MICRORREDE C.C.	69

<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E COMISSONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS</b>	<b>71</b>
5.1	CENÁRIO I - CONTROLE <i>DROOP</i> INTERNO: FONTE DE TENSÃO	71
5.1.1	Degrau de carga - Cenário I	73
5.1.2	Resultados do Cenário I	74
5.2	CENÁRIO II - CONTROLE <i>DROOP</i> EXTERNO: FONTE DE TENSÃO	77
5.2.1	Degrau de carga - Cenário II	79
5.2.2	Resultados do Cenário II	80
5.3	CENÁRIO III - CONTROLE <i>DROOP</i> EXTERNO E INTERNO: FONTE DE TENSÃO	83
5.3.1	Degrau de carga - Cenário III	84
5.4	CENÁRIO IV - CONTROLE <i>DROOP</i> EXTERNO: FONTE DE CORRENTE	85
5.4.1	Resultados do Cenário IV	88
5.5	CENÁRIO V - CONTROLE <i>DROOP</i> EXTERNO: FONTES DE TENSÃO EM PARALELO	90
5.5.1	Resultados do Cenário V	92
5.6	CENÁRIO VI - CONTROLE <i>DROOP</i> EXTERNO: FONTE DE TENSÃO E FONTE DE CORRENTE EM PARALELO	98
5.6.1	Resultados do Cenário VI	99
5.7	DISCUSSÃO E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS	105
5.7.1	Coeficiente <i>droop</i> parametrizado e medido	105
5.7.2	Tempos de resposta para um degrau de carga	105
5.7.3	Controle <i>droop</i> : fonte de tensão e fonte de corrente	106
5.7.4	Degraus de carga para diferentes faixas de carga	108
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE A COMISSONAMENTO: CONVERSOR SINAMICS DCP</b>	<b>119</b>
A.1	COMISSONAMENTO E COMUNICAÇÃO	119
A.2	CONTROLE DE MALHA FECHADA DE TENSÃO	120
A.3	CONTROLE DE MALHA FECHADA DE CORRENTE	121
	<b>APÊNDICE B PARÂMETROS GERAIS DO CONVERSOR</b>	<b>123</b>

**APÊNDICE C      FILTRO PASSA BAIXA . . . . . 124**

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o sistema elétrico tem passado por grandes mudanças, tanto em nível estrutural quanto do ponto de vista comercial. Isso se deve à abertura do mercado livre de energia, mas principalmente à disseminação de sistemas de geração distribuídos (GDs), e, em particular, às fontes de energia renováveis.

As microrredes (MRs) fazem parte do sistema elétrico e representam um sistema único e controlável. Existem diversas classificações de MR, de acordo com seu tamanho, tipo de geração, potência gerada ou grandezas elétricas de operação.

No grupo de trabalho C6.22 do CIGRÉ, as MRs são definidas como sistemas de distribuição que envolvem GD, possuem sistemas de armazenamento de energia (SAE) e cargas controláveis. Esses sistemas podem ser controlados de forma coordenada e conectados à rede elétrica principal ou ilhados (MARNAY et al., 2015).

A disseminação das MRs tem sido um fenômeno globalmente observado. Dentre as regiões estudadas por Navigant Research (2019), a América Latina apresentou a maior projeção de expansão de capacidade instalada de MRs. De acordo com o relatório, em 2019, a capacidade inicial instalada na região foi de 194,9 MW. Estima-se que essa capacidade aumente significativamente para 2919,4 MW até o ano de 2028.

Uma das vantagens desses sistemas é a alta adaptabilidade, o que a torna uma alternativa viável e eficiente para a construção em áreas remotas ou de difícil acesso, como destacado por Ma, Fang e Liu (2017). A dimensão construtiva das MRs permite a expansão da capacidade instalada sem a necessidade de grandes investimentos na construção de novas linhas de transmissão.

Ademais, a implantação da GD tem sido respaldada pela maioria dos países, que estabelecem políticas nacionais com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes no meio ambiente. Além disso, há incentivos para a geração descentralizada.

No Brasil, a GD foi estabelecida pela primeira vez pelo Artigo 14 do Decreto Lei nº 5.163, de 2001. Em 2012, foi criada a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), a qual definiu as condições regulatórias para a inserção da GD na matriz energética brasileira. Posteriormente, essa resolução foi revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015).

A Lei nº 14.300, sancionada em 6 de janeiro de 2022, regulamentou a microgeração e minigeração distribuída, permitindo a compensação e venda do excedente de energia gerada pelas MRs (BRASIL, 2022). No entanto, a GD proveniente de fontes intermitentes, como a energia solar e eólica, pode gerar problemas de flutuação de ten-

são e afetar o sistema de proteção da rede elétrica, já que essa rede não foi projetada para lidar com uma produção de energia bidirecional.

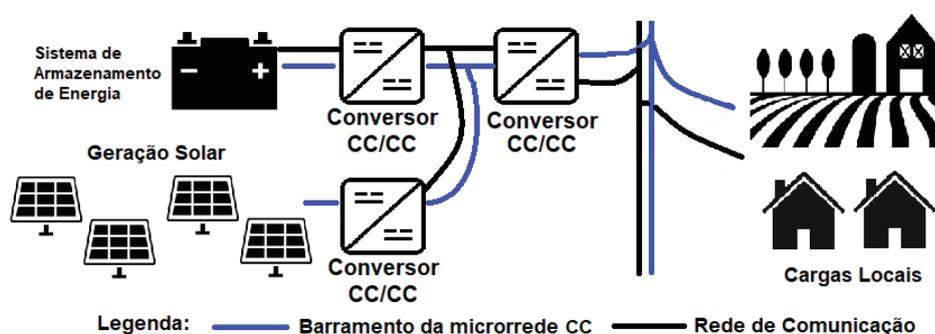
Para solucionar esses problemas, é necessário um melhor controle de potência e despacho de energia, além de uma rede inteligente centralizada que possa medir o fluxo de energia, conforme apontado por Olivares et al. (2014). No entanto, a dinâmica de resposta do controle das concessionárias de energia é lenta em comparação com a própria dinâmica da geração intermitente, caso a penetração dessas fontes seja muito grande. Nesse cenário, sistemas de controle em MRs podem atuar de maneira local e rápida antes que o problema se propague na rede de distribuição.

Com o avanço das técnicas de controle em sistemas de energia, a GD e as MRs são vistas como uma maneira promissora de gerenciar e controlar os recursos de energia em comparação com a tradicional geração centralizada. Por isso, há um crescente interesse na aplicação de MRs em todo o mundo, já que essa topologia é considerada modular, confiável, eficiente e rentável (AKINYELE; BELIKOV; LEVRON, 2018).

As MRs podem ser classificadas de acordo com sua grandeza elétrica, que pode ser em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Entre as principais vantagens da rede CC em relação à rede CA, destaca-se a facilidade de integração de fontes renováveis de energia, menor complexidade de conversão de potência, ausência de distorções harmônicas e de energia reativa (KAKIGANO; NISHINO; ISE, 2011 apud DIAZ et al., 2014).

Na Figura 1 é apresentado um diagrama simplificado de uma possível configuração de MR CC, apresentando os principais componentes e conexões no sistema elétrico.

FIGURA 1 – Diagrama simplificado de uma possível configuração de MR



Fonte: O autor (2021)

A interface entre a rede da concessionária, a GD para o barramento principal da MR CC é realizada por meio de conversores de potência. No caso de MRs, é comum que existam sistemas de comunicação que atuam de maneira centralizada com a finalidade de assegurar o controle dos parâmetros envolvidos.

Dentre os equipamentos convencionais encontrados em MRs CC, destacam-se os conversores bidirecionais CC-CC que são acoplados em sistemas de armazenamento de energia paralelos à geração distribuída, como ilustrado na Figura 1. Esses conversores possibilitam a manutenção de uma tensão estável nas cargas, pois são capazes de operar em regimes de carga e descarga das baterias, ajustando-se à produção intermitente de energia.

Os SAEs desempenham um papel vital na maioria das aplicações em redes isoladas ou ilhadas, pois fornecem energia ininterrupta para cargas críticas, veículos elétricos e demandas sazonais.

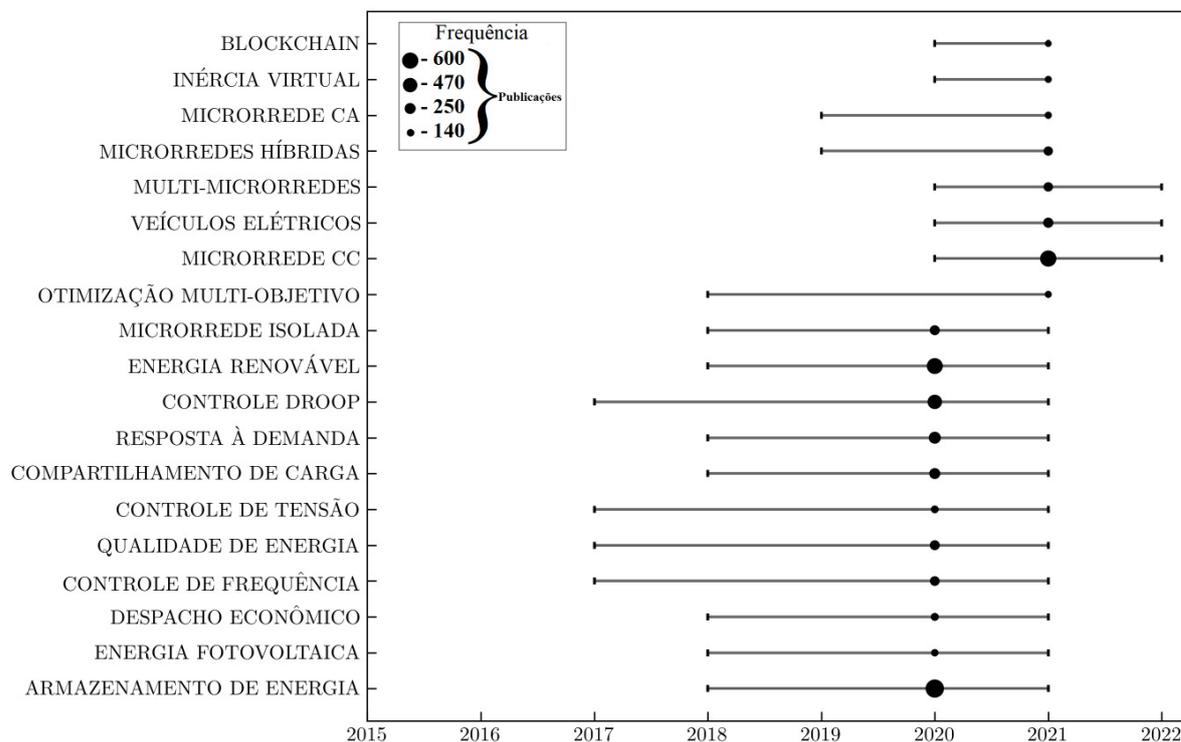
Com o objetivo de avaliar as tendências das publicações científicas na área de MRs nos últimos anos, realizou-se uma pesquisa utilizando a base de dados Scopus.

A Figura 2 apresenta a análise de frequência de palavras-chave relacionadas às MRs que apareceram em artigos publicados entre 2020 e 2022. Para garantir a inclusão apenas dos termos mais relevantes na análise, foi definida a frequência mínima de 70 vezes em um ano para cada palavras-chave. Observa-se que, nos últimos anos, alguns tópicos têm recebido maior atenção, como "Veículos Elétricos", "Múltiplas Microrredes", "Microrredes Híbridas", "Microrredes CA", "Inércia Virtual" e "*Blockchain*".

No gráfico, cada palavra-chave é representada por um círculo cujo tamanho corresponde à sua frequência de uso e sua posição representa o deslocamento do número médio de publicações durante o período avaliado. Quanto maior o círculo, maior é a frequência da palavra-chave.

Além disso, linhas são traçadas para marcar os limites dos anos, permitindo a visualização da evolução das palavras-chave ao longo do tempo. Essas linhas ajudam a identificar tendências, variações e padrões nas frequências das palavras-chave ao longo dos anos.

FIGURA 2 – Análise de frequência de palavras-chave em publicações sobre microrredes



Fonte: O autor (2023)

Durante o período analisado, os tópicos mais estudados foram sobre "Microrredes CC", "Armazenamento de Energia", "Energia Renovável" e "Controle *Droop*". Esses termos indicam que as MRs CC têm sido o principal objeto de estudo nos últimos anos dentre os temas apresentados no Figura 2, e esses estudos estão relacionados, em sua maioria, a sistemas de SAE e técnicas de paralelismo de conversores.

Dentre os estudos de MRs CC as técnicas de controle para paralelismo de conversores CC estão entre os temas mais abordados. O objetivo principal dessas técnicas de controle é a estabilização da tensão na rede em diferentes condições de trabalho. A gestão adequada dos recursos SAE é outra preocupação central nesses estudos. Algumas dessas técnicas incluem o método de corrente média, método de corrente/mestre-escravo, queda de tensão via *feedback* de corrente de saída, controle via ganho não-linear, entre outras (LUO et al., 1999). Essas técnicas são aplicadas em um grupo de conversores de potência e podem ser resumidas em duas abordagens, apresentadas a seguir.

A primeira abordagem é referente a um controle dependente de comunicação entre os conversores, sendo um controle centralizado, no qual um dos conversores desempenha o papel de controlar os demais. Geralmente, sistemas centralizados exigem uma rede de comunicação rápida, o que torna possível que os equipamentos operem como uma única unidade. Entretanto, como o método é dependente de um controle central, uma falha no conversor mestre pode comprometer todo o processo.

A segunda abordagem, que será aprofundada nesta dissertação, é o controle *droop*. Por ser uma técnica sem comunicação entre os componentes da rede, esse método é descentralizado e não requer uma rede de comunicação (OLIVEIRA, 2016).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, são escassos os estudos práticos sobre MRs CC, bem como a regulamentação acerca dos padrões a serem adotados para esse tipo de topologia. Dessa forma, há muito a ser desenvolvido a fim de se estabelecer normas amplamente difundidas no setor elétrico mundial.

A maior parte das padronizações e normas das MRs foi desenvolvida por organizações, tais como o *International Electrotechnical Commission* e o *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. No entanto, tais documentos estão principalmente relacionados às MRs CA ou às redes CC acima de 1,5 kV.

Efetivamente, constata-se que ainda não há um consenso quanto à tensão no barramento das MRs, nem mesmo sobre o que pode ser considerado como baixa, média ou alta tensão. Nesse contexto, os fabricantes enfrentam desafios na especificação de sistemas de proteção e equipamentos.

O uso da MR CC pode ampliar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica em áreas que apresentam uma infraestrutura de energia pouco robusta, como é o caso de áreas rurais. Além disso, a possibilidade de instalar esses sistemas para atender à demanda de energia em comunidades isoladas representa uma alternativa para redução dos custos de infraestrutura de distribuição e transmissão, tornando o investimento viável.

Países que possuem vastas extensões territoriais possuem vantagens significativas no uso de MRs isoladas. Isso ocorre porque investimentos em linhas de transmissão podem não ser justificados pelo baixo impacto em áreas com baixa densidade populacional ou que não possam ser atendidas a curto prazo.

Em relação à condição de MRs isoladas, são notórios os desafios de desenvolvimento de técnicas de controle em relação a problemas causados pela natureza intermitente da geração renovável e de oscilações das cargas, uma vez que o barramento nas MRs isoladas não possuem grande inércia elétrica.

Devido à dificuldade de instalações apropriadas, a natureza estocástica ou a modelos matemáticos muito complexos, o estudo de MRs na literatura atual é apresentado geralmente por simulações utilizando o software *MATLAB®* ou soluções de simulação em tempo real para sistemas de potência fornecidos por empresas como o *OPAL-RT Technologies*, *Typhoon Hil* e a *RTDS*.

O presente trabalho propõe a apresentação de resultados práticos de controle *droop* em conversores acoplados a baterias de lítio em uma MR CC de média tensão. Através desta dissertação, espera-se contribuir para pesquisas que analisam técnicas de controle em MRs CC, assim como métodos que focam no compartilhamento de carga entre conversores CC-CC conectados em paralelo.

## 1.2 OBJETIVOS

Controlar os conversores de potência para realizarem o compartilhamento de carga em uma microrrede CC, utilizando técnicas de controle *droop* implementado em um controlador externo ao conversor de potência.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação tem a finalidade de aplicar o controle *droop* em conversores de potência através de um controlador externo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir um sistema de supervisão e aquisição de dados para monitorar e controlar os parâmetros envolvidos nas estratégias de controle;
- Avaliar os desafios para implementação de um controle *droop* externo ao conversor de potência e comparar com a solução de controle *droop* que vem integrado com o conversor de potência;
- Implementar um controle *droop* que seja capaz de superar as limitações e a modificação em tempo real do coeficiente *droop* provenientes do *software* de fábrica do conversor;
- Investigar a estabilidade da tensão e o compartilhamento entre os conversores para variadas abordagens de controle *droop*, considerando variações de carga na rede;
- Avaliar o controle *droop* em conversores operando no modo fonte de tensão e/ou como fonte de corrente em condição de paralelismo.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo este capítulo 1 o capítulo introdutório, que tem como objetivo apresentar a contextualização e a delimitação do tema abordado desta pesquisa, bem como a descrição dos objetivos de todo o trabalho.

O capítulo 2 apresenta os principais componentes da MR CC da dissertação, as características pertinentes ao controle hierárquico e as diferentes malhas de controle *droop* para cada modo de operação dos conversores.

O capítulo 3 apresenta uma ampla revisão da literatura que engloba os assuntos que fazem parte deste trabalho. Neste capítulo também é apresentado um processo de seleção bibliográfica para seleção dos trabalhos da revisão da literatura, em conjunto com uma série de análises quantitativas de número de citações, revistas que publicam sobre o tema, principais autores, entre outras métricas.

No capítulo 4 são descritos os equipamentos, os protocolos de comunicação e a conexão elétrica dos equipamentos utilizados na MR CC do laboratório, assim como a parametrização e a operação das malhas de controle dos conversores de potência.

No capítulo 5 da dissertação, são apresentados e discutidos os resultados e metodologias utilizadas das estratégias de controle implementadas no CLP para funcionamento da MR através dos conversores CC. Nessa seção, é descrito o processo de comissionamento do controle *droop* interno e externo com conversor operando como FT (Fonte de Tensão), assim como do controle *droop* externo como FC (Fonte de Corrente). Posteriormente, é realizada a validação da condição de paralelismo.

Por fim, o capítulo 6 da dissertação apresenta as conclusões obtidas. Nesta seção, são discutidos os resultados obtidos e são apresentadas as considerações finais e perspectivas para o futuro.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma análise sobre as funcionalidades de MRs CC e uma revisão dos equipamentos utilizados neste tipo de sistema, tais como conversores bidirecionais CC-CC e SAE. São discutidos os principais parâmetros de operação destes equipamentos, bem como a sua estrutura e funcionamento geral.

Posteriormente, é abordada a hierarquia de controle em uma micro-rede CC, na qual são exploradas as funções de cada um dos níveis de controle. Ademais, são discutidas as diferenças de sinais elétricos utilizados como referência para o controle em redes CC e CA em relação ao controle *droop*.

Por fim, é apresentada a teoria sobre o controle *droop* convencional e adaptativo, destacando-se o seu mecanismo de controle e a sua principal função em MRs.

### 2.1 MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA

A MR CC pode ser considerada uma rede descentralizada que visa integrar várias fontes de GD com um controle flexível e confiável, conectada a um grupo de cargas que operam em níveis de média e baixa tensão (PARKER et al., 2010). Inicialmente, a rede CA foi amplamente utilizada na operação da MR. No entanto, com o aumento da adoção de fontes renováveis, como a energia fotovoltaica, a MR CC começou a ganhar relevância.

A MR pode operar tanto ilhada, no caso de MRs interconectadas ao sistema elétrico de potência, quanto isolada geograficamente do sistema elétrico. A presença de uma MR conectada a um sistema de distribuição melhora sua estabilidade, confiabilidade, eficiência e resiliência (ISHIGAKI; SHIN; DEDE, 2017). Em caso de desbalanceamento de cargas ou de geração de energia, a conexão à rede elétrica de distribuição permite o suprimento da potência e, conseqüentemente, da estabilidade da tensão. No entanto, o controle de uma MR isolada é um desafio devido à ausência de um barramento infinito e, conseqüentemente, de uma tensão estável, o que pode levar a possíveis desequilíbrios de tensão (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006).

Independentemente dos modelos predominantemente envolvendo a rede CA, os modelos CC têm crescido em sistemas de transmissão que possuem grandes extensões e em sistemas acoplados na rede de distribuição de energia. Além disso, podem ser encontrados em diferentes aplicações particulares.

Os principais componentes possíveis de uma MR CC, seja ela isolada ou ilhada da rede, incluem conversores unidirecionais acoplados à GD, cargas da rede CC

e conversores bidirecionais para SAE. O funcionamento geral desses componentes utilizados na MR estudada é apresentado a seguir.

### 2.1.1 Conversores CC-CC e Sistemas de armazenamento de energia

A principal função dos conversores CC-CC é atuar como abaixador ou elevador de tensão para o barramento comum CC, o que é geralmente necessário para conectar conversores CC-CA ou outros conversores CC-CC na rede. Os conversores podem ser inseridos entre a GD, o SAE ou as cargas na rede, interligando-os ao barramento principal da MR CC, conforme apresentado na Figura 1.

Os conversores bidirecionais são acoplados em fontes de tensão CC para controle de potência de saída da fonte em qualquer sentido do fluxo de potência. Esses conversores são considerados fundamentais para o funcionamento do SAE, permitindo o controle de energia para os estágios de carga e descarga de bancos de baterias, conforme apresentado em Yang et al. (2019).

O armazenamento de energia é um elemento fundamental na concepção de sistemas de MRs, especialmente porque muitas fontes de energia utilizadas em sistemas isolados são intermitentes. As baterias são uma das tecnologias de armazenamento mais comuns em sistemas de MR e possuem vários parâmetros que os caracterizam, como tensão nominal, capacidade de energia, estado de carga, profundidade de descarga, curva de descarga e carga da bateria.

A capacidade da bateria é um dos parâmetros mais importantes, e é expressa em Ampère-hora (Ah). Ela representa a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar e, portanto, quanto maior a capacidade, maior será a autonomia da bateria.

*State of Charge* (SoC), expresso em porcentagem da capacidade nominal da bateria, é outro parâmetro crucial e pode variar entre 0% e 100%. O SoC é utilizado para medir o estado de carga atual de uma bateria, indicando a porcentagem da sua capacidade total que está atualmente carregada. A fórmula para calcular o SoC, de acordo com a Equação 2.1:

$$\text{SoC} = \left( \frac{\text{Capacidade Carregada}}{\text{Capacidade Nominal}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

SoC : Estado de Carga

Capacidade Carregada : Quantidade de energia atualmente armazenada na bateria

Capacidade Nominal : Capacidade total da bateria

*Depth of Discharge* (DoD) é o inverso do SoC e representa a quantidade de carga utilizada desde o estado de carga pleno. O DoD é um indicador utilizado para medir a quantidade de capacidade que foi utilizada em uma bateria em relação à sua capacidade total, de acordo com a Equação 2.2:

$$\text{DoD} = \left( \frac{\text{Capacidade Nominal} - \text{Capacidade Carregada}}{\text{Capacidade Nominal}} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

DoD : Profundidade de Descarga

Capacidade Nominal : Capacidade total da bateria

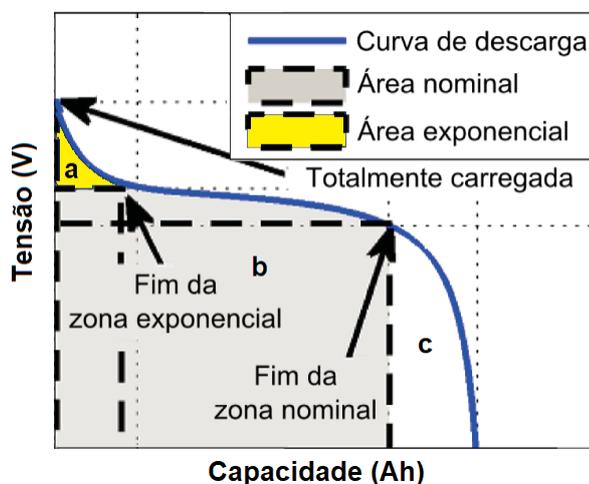
Capacidade Carregada : Quantidade de energia atualmente armazenada na bateria

O parâmetro de tensão de circuito aberto (OCV) é usado para estudar o comportamento de carga e descarga com base no SoC inicial de uma bateria. A tensão é medida entre os dois polos de uma bateria sem carga e na condição relaxada. A tensão de bateria relaxada é um termo utilizado para descrever a tensão de uma bateria após um período de repouso ou descarga.

As baterias compostas por íons de lítio são as mais comuns em MRs. No entanto, elas possuem uma curva de descarga mais plana, o que dificulta a estimativa do SoC com base na medição de tensão de circuito aberto. De fato, a diferença de tensão entre dois valores de SoC nas baterias de lítio pode ser tão pequena que não é possível estimar o estado de carga com boa precisão.

A curva genérica de uma bateria pode ser verificada na Figura 3, onde a área (a) representa a zona exponencial e é onde ocorre a queda de tensão de uma bateria totalmente carregada. O tamanho dessa área é dependente do tipo de tecnologia utilizado na bateria. A área (b), chamada de zona nominal, representa a carga total disponível para fornecimento de potência pela bateria. Seus limites estão entre o fim da zona exponencial até o fim da zona nominal. A área (c) apresenta a curva exponencial de descarga e o processo de decaimento de tensão.

FIGURA 3 – Curva de descarga genérica de uma bateria



Fonte: Adaptado de Tremblay e Dessaint (2009)

## 2.2 CONTROLE CENTRALIZADO, DESCENTRALIZADO E DISTRIBUÍDO

O controle em MRs CC pode ser categorizado em três estratégias: centralizado, descentralizado e distribuído. No controle centralizado, é necessário um canal de comunicação confiável e rápido, sendo altamente dependente do monitoramento global dos sinais elétricos dos equipamentos. Uma falha em uma unidade pode levar à sobrecarga de outras unidades e causar instabilidade ou falhas em cascata.

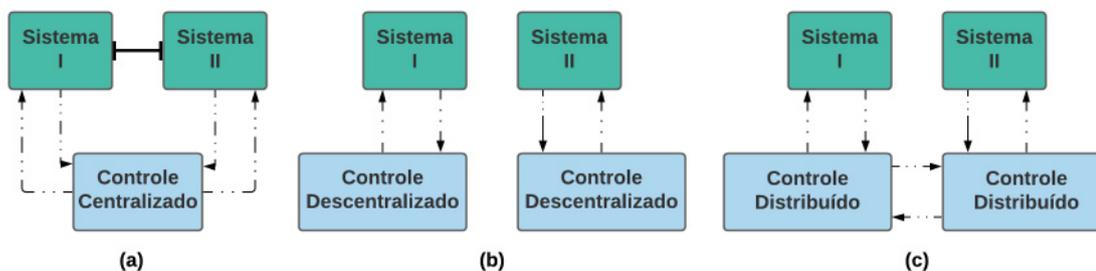
O controle descentralizado em uma MR CC é modular e escalável, e não exige comunicação centralizada. Esse tipo de controle monitora e responde localmente a distúrbios na rede, o que aumenta a confiabilidade e a eficiência do sistema de controle.

Por sua vez, o controle distribuído é uma fusão das vantagens do controle centralizado e descentralizado. Ele depende do monitoramento exclusivo de sinais elétricos entre unidades adjacentes e é apropriado para o controle secundário com a função de compartilhar dados entre controladores vizinhos. Esse tipo de controle apresenta boa precisão na regulação de tensão, compartilhamento de carga e melhor modularidade quando comparado ao controle centralizado (ANAND; FERNANDES; GUERRERO, 2013).

A Figura 4 exemplifica graficamente os três tipos de controle mencionados anteriormente. Na imagem (a) é apresentado o controle centralizado, onde um único controlador gerencia todos os elementos da MR, tendo acesso a todas as informações e recursos da rede. Na imagem (b) é apresentado o controle descentralizado, onde cada unidade da MR possui seu próprio controlador e não é necessário um canal de comunicação entre as unidades para o funcionamento da rede. Na imagem (c) é apresentado o controle distribuído, onde cada unidade possui um controlador que

compartilha informações com unidades adjacentes, formando uma rede de controle distribuído.

FIGURA 4 – Controle centralizado, descentralizado e distribuído



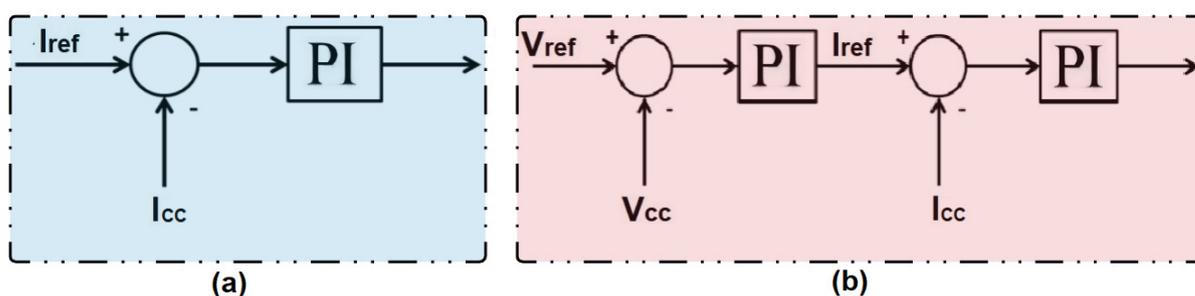
Fonte: O autor (2022)

## 2.3 CONTROLE DE CORRENTE E DE TENSÃO

Na operação de MRs, é necessário o uso de técnicas de controle e coordenação adequadas dos equipamentos para garantir a estabilidade da tensão da rede elétrica próxima de seu valor nominal e assegurar o fornecimento de potência do SAE.

O controle primário em conversores de potência é realizada por meio de malhas fechadas de controle de corrente ou tensão. Para o conversor operando no modo fonte de corrente é utilizado a malha (a) da Figura 5. Para o modo fonte de tensão geralmente os conversores apresentam uma malha de corrente em cascata com uma malha de tensão como apresentado na malha (b).

FIGURA 5 – Topologias de controle primário em um conversor CC-CC



Fonte: Adaptado de Li, Vasquez e Guerrero (2015)

$V_{cc}$  e  $I_{cc}$  representam, respectivamente, a tensão e a corrente de saída do conversor, enquanto  $I_{ref}$  representa a corrente de referência de saída do conversor na malha (a). Na malha (b) a corrente de referência é resultado da comparação da tensão de referência  $V_{ref}$  em relação a tensão de saída do conversor.

A topologia de malha de corrente da Figura 5, apresentada na malha (a), é utilizada quando o objetivo do conversor é controlar a corrente de saída com base em

uma corrente de referência. Nesse caso, a corrente de saída do conversor varia de acordo com a corrente de referência, e o conversor de potência atua como uma fonte de corrente.

Já a topologia de malha de corrente e tensão em cascata da Figura 5, apresentada na malha (b), é utilizada quando é necessário o controle da tensão de saída do conversor. Assim, o controle de tensão pode modificar a corrente injetada ou absorvida, de modo a manter a tensão de referência na rede. Nesse caso, o conversor de potência atua como uma fonte de tensão.

As malhas de controle apresentadas na Figura 5 não respondem a mudanças na carga da rede, o que pode resultar em sobrecarga e problemas de paralelismo nos conversores. Na próxima seção, serão apresentadas malhas de controle externas que permitem a resposta instantânea às variações de carga.

### 2.3.1 Controle *Droop*: Fonte de Tensão

O controle *droop* é uma estratégia de controle amplamente utilizada no nível primário de conversores de potência operando como fonte de tensão (FT) para garantir o compartilhamento igual da carga entre os conversores na rede. Esta técnica de controle também é conhecida como controle por inclinação ou controle por estatismo.

Devido à sua facilidade de implementação, flexibilidade, escalabilidade e ausência de necessidade de um controle supervisor entre conversores ou meio de comunicação complexo, o controle *droop* é amplamente utilizado como controle descentralizado (KARLSSON, 2002).

Para alcançar uma regulação adequada da tensão de saída em conversores CC e um compartilhamento de carga efetivo, esse método é amplamente utilizado para controlar a tensão na MR (SHEHATA et al., 2019).

Através do controle *droop*, um novo valor de tensão de referência da malha de controle de tensão é obtida pela subtração da tensão de referência selecionada pela corrente de saída do conversor multiplicada pelo coeficiente de *droop*. Essa técnica possui características semelhantes às de um controle proporcional. O controle *droop* é apresentado de acordo com a equação 2.3:

$$V_{ref^*} = V_{ref_i} - R_{d_i} \cdot I_{cc_i} \quad (2.3)$$

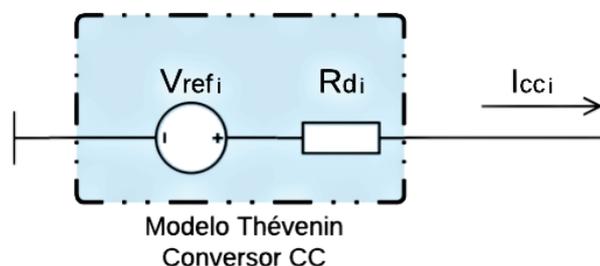
$V_{ref^*}$  representa a nova tensão de referência do controle *droop*,  $V_{ref_i}$  é a tensão de referência inicial do i-ésimo conversor,  $R_{d_i}$  é o coeficiente *droop* do i-ésimo conversor e  $I_{cc_i}$  é a corrente de saída do i-ésimo conversor. Se, por exemplo, houver um aumento de carga instantânea na MR, haverá um aumento de corrente na saída do conversor e,

consequentemente, uma diminuição na nova tensão de referência em relação à tensão anterior ao aumento de carga.

Vale destacar que inserir uma resistência em série na saída do conversor causa uma perda de potência. Dessa forma, é comum utilizar uma resistência virtual. Essa resistência também pode ser chamada de coeficiente *droop*, constante de *droop* ou ganho de *droop*.

Como pode ser visto, o controle *droop* simula no conversor uma FT em série com uma resistência. Desse modo, é possível utilizar o modelo equivalente *Thévenin* para representar o conversor com o controle *droop*, como apresentado na Figura 6.

FIGURA 6 – Modelo equivalente *Thévenin* do conversor com o controle *droop*

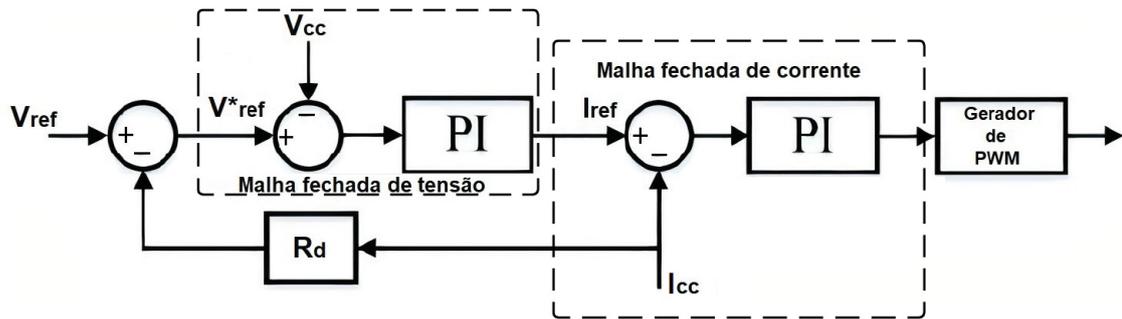


Fonte: O autor (2022)

O coeficiente *droop* do *i*-ésimo conversor é representado por  $R_{di}$ , a tensão de referência inicial do *i*-ésimo conversor por  $V_{ref_i}$ , e a corrente de saída do *i*-ésimo conversor por  $I_{cci}$ .

A Figura 7 ilustra o diagrama de blocos equivalente ao modelo equivalente *Thévenin* apresentado anteriormente para a técnica de controle *droop* aplicada a um conversor de potência operando como uma FT.

Essa malha permite o compartilhamento equilibrado de carga entre as fontes de tensão em paralelo na rede, sem a necessidade de um sistema de controle centralizado ou de comunicação entre os conversores.

FIGURA 7 – Diagrama de blocos do controle *droop* - Fonte de Tensão

Fonte: Adaptado de Li, Vasquez e Guerrero (2015)

No diagrama de blocos de controle, pode-se observar que os parâmetros  $V_{cc}$  e  $I_{cc}$  representam, respectivamente, a tensão e a corrente de saída do conversor. Além disso, a corrente de referência  $I_{ref}$  é determinada pela malha de tensão, enquanto a tensão de referência  $V_{ref}$  é a tensão de saída inicial quando não há carga conectada.

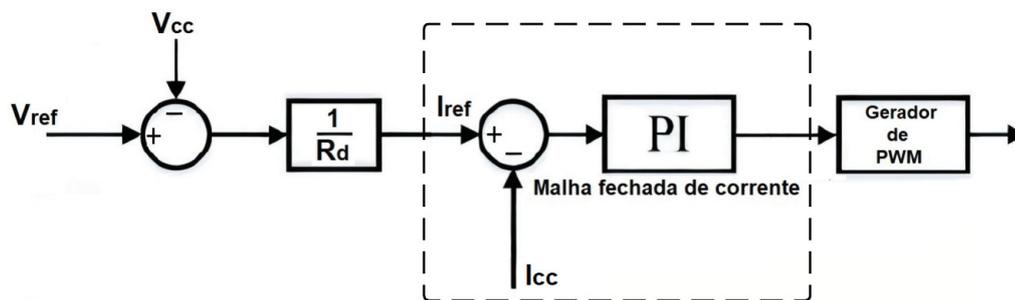
No controle *droop* para o modo de operação de FT, é atualizado a cada ciclo o parâmetro de tensão de referência de entrada, que é função da corrente de saída do conversor e do coeficiente *droop* adotado. O controle é diretamente afetado pela variação da carga na MR, ou seja, pelo aumento ou diminuição da demanda de potência.

### 2.3.2 Controle *Droop*: Fonte de Corrente

No caso de conversores de potência atuando como fonte de corrente (FC), a corrente de referência na malha de controle de corrente pode ser determinada usando a equação 2.4. A equação relaciona a corrente de referência com a tensão de referência, a tensão de saída do conversor e o coeficiente *droop*.

$$I_{ref} = \frac{V_{ref} - V_{cci}}{R_{di}} \quad (2.4)$$

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos do controle *droop* para o modo FC, no qual o conversor reduz proporcionalmente a energia fornecida às cargas quando a tensão de referência se aproxima da tensão de saída do conversor. Quando ocorre um aumento de carga na MR e a tensão nominal diminui, o conversor aumenta a potência fornecida às cargas para restaurar a proporção.

FIGURA 8 – Diagrama de blocos do controle *droop* - Fonte de Corrente

Fonte: O autor (2022)

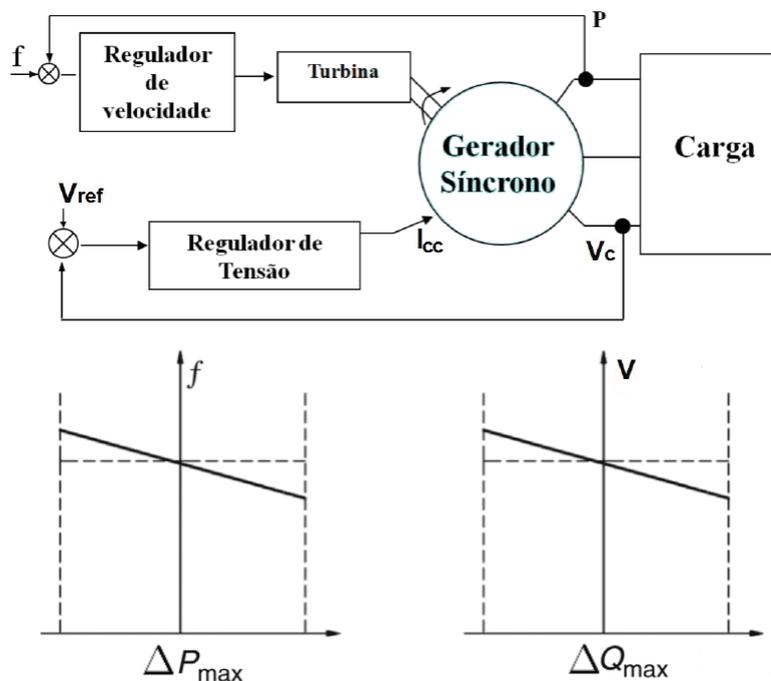
A regulação da corrente é proporcional ao erro estacionário entre a tensão de referência e a tensão de saída do conversor. A próxima seção abordará a análise gráfica da curva do controle *droop* e as limitações inerentes da malha de controle *droop*.

### 2.3.3 Coeficiente *Droop*

O controle *droop* é uma técnica amplamente utilizada em sistemas CA para regular a tensão e frequência em geradores síncronos. Essa técnica também é utilizada em conversores ou inversores para simular a autorregulação do gerador síncrono para o mesmo objetivo. Com o crescente uso de sistemas com GD, o controle *droop* tem sido amplamente aplicado em conversores de potência para a rede CC.

A Figura 9 apresenta a autorregulação do gerador síncrono, bem como seus dois mecanismos de controle por *droop*.

FIGURA 9 – Autorregulação no gerador síncrono



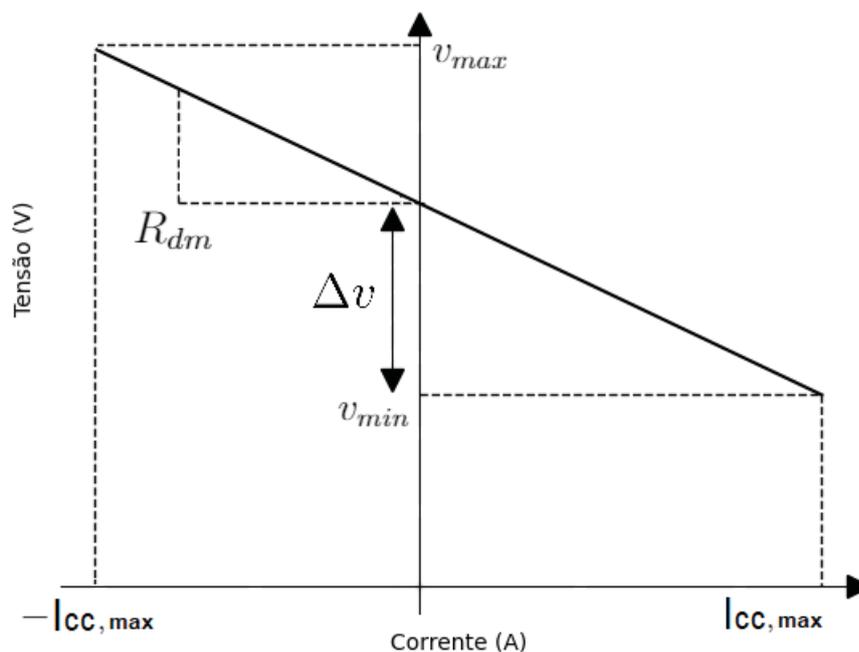
Fonte: Adaptado de Karlsson (2002)

A primeira curva representa o controle *droop* em função dos parâmetros de frequência em relação à potência ativa, que são controlados na turbina do gerador síncrono. A segunda curva apresenta o controle *droop* em relação à tensão em função da potência reativa no sistema de excitação do gerador.

No gerador síncrono, à medida que a carga demanda mais potência ativa, o gerador tende a diminuir sua velocidade e, conseqüentemente, a frequência angular. Se há um aumento da demanda por potência reativa, a consequência é uma diminuição na tensão nominal. Conseqüentemente, os coeficientes de *droop* são calculados a partir da variação máxima permitida na tensão e frequência da rede.

Da mesma forma, no controle *droop* em redes CC, a tensão é proporcional à corrente de saída do conversor CC. O valor do coeficiente *droop* corresponde à variação máxima permitida na tensão nominal da MR, desde a condição sem carga até a condição de carga máxima.

Na Figura 10, o eixo das abscissas representa o intervalo de corrente de saída do conversor, desde a corrente mínima até a corrente máxima  $i_{cc,max}$ , enquanto o eixo das ordenadas apresenta a regulação de tensão permitida na rede.

FIGURA 10 – Cálculo do coeficiente *droop* em um conversor bidirecional

Fonte: O autor (2022)

De acordo com Lu, Guerrero et al. (2014), é possível calcular a máxima resistência virtual  $R_{dm}$  a partir da variação de tensão na rede CC do projeto e da corrente máxima de saída do conversor. Essa resistência virtual é obtida por meio da curva *droop* V-I, apresentada na Figura 10, que resulta na Equação 2.5.

$$R_{dm} \leq \frac{\Delta v}{i_{cc,max}} \quad (2.5)$$

onde,  $\Delta v$  é a variação de tensão do barramento C.C. admitida,  $i_{cc,max}$  é a corrente máxima de saída do conversor e  $R_{dm}$  o coeficiente *droop* máximo.

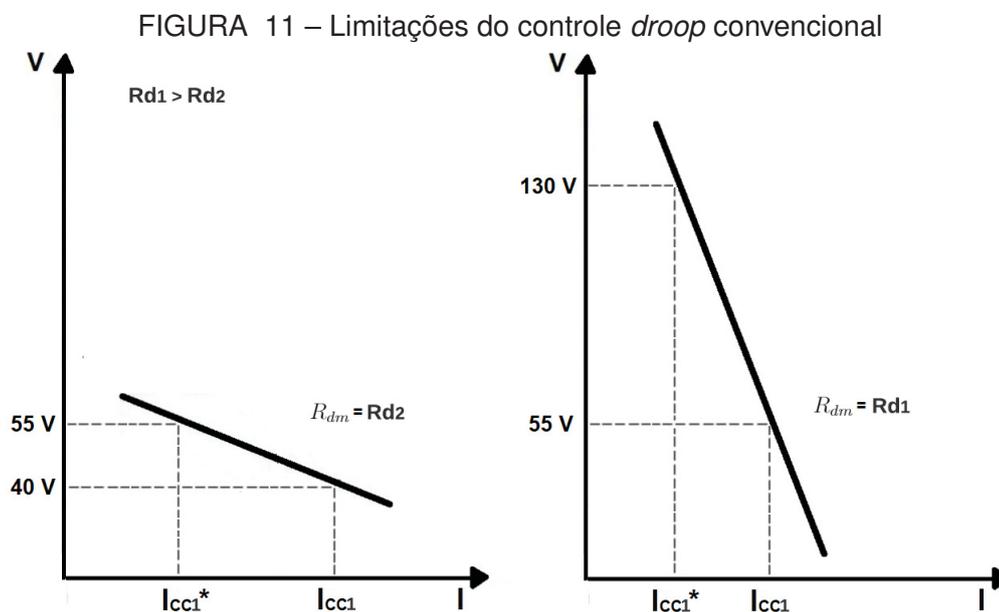
A Figura 10 permite analisar as características de funcionamento do controle *droop* em um conversor bidirecional. O quadrante direito representa o fornecimento de potência para a rede, enquanto o quadrante esquerdo representa a absorção de potência da rede.

Observa-se que um aumento na corrente de saída do conversor resulta em uma redução proporcional na tensão. No caso de diminuição de carga na rede, o conversor está habilitado a injetar mais potência no sistema, de modo a reestabelecer a relação entre a tensão e a corrente.

Conforme discutido anteriormente, o coeficiente *droop* pode variar de acordo com a corrente máxima do conversor e o intervalo de tensão admissível na rede, também conhecido como regulação de tensão.

A Figura 11 apresenta a curva *droop* V-I para dois conversores operando com

coeficientes *droop* distintos. Na primeira curva, verifica-se uma pequena regulação de tensão e uma maior diferença entre as correntes inicial e final fornecidas pelo conversor durante uma variação de carga quando comparada com um coeficiente *droop* maior.



Fonte: O autor (2022)

Para garantir a estabilidade da tensão em uma MR CC diante de variações de carga, é essencial manter uma pequena regulação de tensão. Nesse sentido, quanto menor for o coeficiente de *droop*, melhor será a operação em relação à tensão na rede.

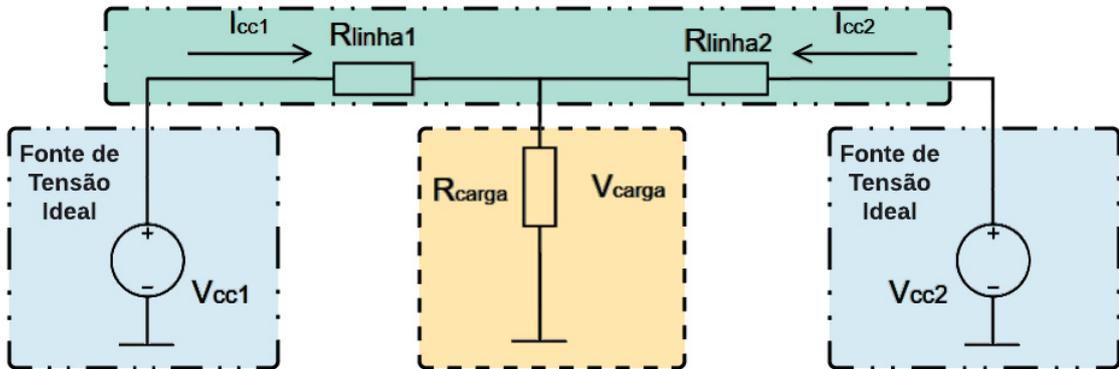
A próxima seção apresenta uma breve análise do paralelismo de conversores operando como FT, bem como as possíveis dificuldades e soluções relacionadas ao controle *droop*. Além disso, serão apresentadas as equações do controle *droop* e, posteriormente, serão discutidas as consequências da resistência dos cabos na curva V-I.

## 2.4 CONTROLE *DROOP* LINEAR PARA CONVERSORES PARALELOS

O paralelismo de conversores operando no modo FT só é viável quando possuem tensões de saída idênticas. Se houver uma diferença de tensão, pode ocorrer uma circulação de corrente indesejada no circuito, limitada apenas pelas resistências internas das fontes não ideais. Mesmo que sejam utilizados conversores idênticos com tensões de saída iguais, na prática ainda pode haver diferenças de tensão, devido às resistências dos cabos, aos sensores de tensão que alimentam a malha de controle ou à diferença de resistência interna entre os equipamentos.

Para ilustrar esse problema, a Figura 12 apresenta um modelo simplificado de uma MR CC com duas fontes ideais em paralelo no modo FT, acopladas a uma carga resistiva, considerando a não desprezibilidade das resistências dos cabos.

FIGURA 12 – Modelo simplificado de MR com dois conversores em paralelo



Fonte: O autor (2022)

As variáveis  $V_{cc1}$  e  $V_{cc2}$  representam as tensões nominais de saída de cada conversor;  $R_{linha1}$  e  $R_{linha2}$  representam a resistência do cabo até as cargas;  $R_{carga}$  e  $V_{carga}$  representam a resistência da carga e a tensão da carga e, por fim, as correntes de saída dos respectivos conversores  $I_{cc1}$  e  $I_{cc2}$ .

Utilizando da lei de Kirchhoff no circuito da Figura 12, as correntes de saída de cada conversor podem ser calculadas como:

$$I_{cc1} = \frac{R_{carga} \cdot (V_{cc1} - V_{cc2}) + V_{cc1} \cdot R_{linha2}}{R_{carga} \cdot R_{linha1} + R_{carga} \cdot R_{linha2} + R_{linha1} \cdot R_{linha2}} \quad (2.6)$$

$$I_{cc2} = \frac{R_{carga} \cdot (V_{cc2} - V_{cc1}) + V_{cc2} \cdot R_{linha1}}{R_{carga} \cdot R_{linha1} + R_{carga} \cdot R_{linha2} + R_{linha1} \cdot R_{linha2}} \quad (2.7)$$

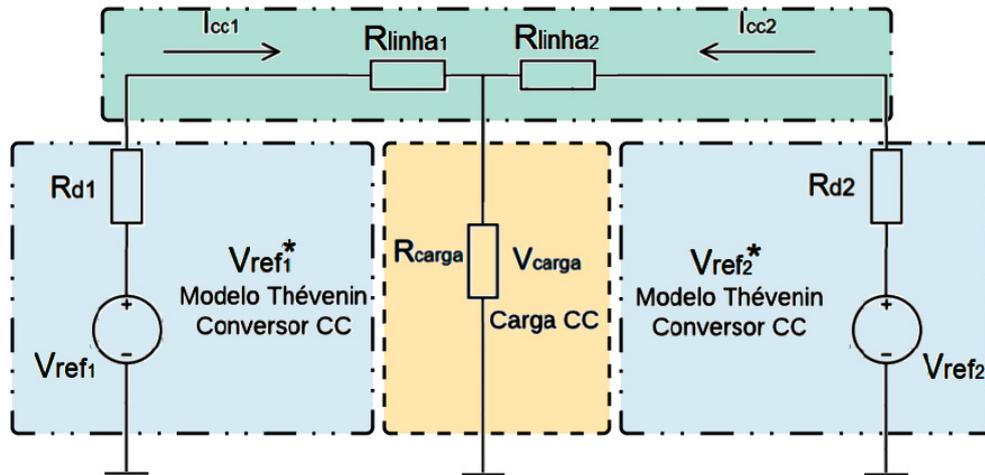
Observa-se das equações 2.6 e 2.7 que, se as tensões de saída dos conversores são iguais e a resistência do cabo entre cada conversor e a carga é a mesma, não haverá diferença no compartilhamento de corrente entre eles. No entanto, devido aos conversores serem projetados para terem uma baixa resistência de saída, há uma tendência de desequilíbrio de corrente entre os conversores quando conectados em paralelo.

Podendo levar a um conversor a absorver potência ativa e se tornar uma carga em relação a outro conversor com tensão de saída maior, resultando em instabilidade no sistema, ativação de proteções e possível dano do equipamento. Fica evidente que o paralelismo de conversores não opera naturalmente como geradores síncronos, sendo necessárias técnicas de controle para a associação paralela de múltiplos conversores na mesma rede.

A Figura 13 apresenta um modelo simplificado de dois conversores CC em paralelo com o controle *droop*. Os conversores foram simplificados no modelo equivalente

*Thévenin*, onde  $V_{ref1}$  e  $V_{ref2}$  representam as tensões de referência iniciais de cada conversor.

FIGURA 13 – Modelo simplificado de dois conversores em paralelo com controle *droop*



Fonte: O autor (2022)

As variáveis  $R_{d1}$  e  $R_{d2}$  representam os coeficientes *droop* de cada conversor,  $V_{ref1*}$  e  $V_{ref2*}$  representam as novas tensões de saída de cada conversor do equivalente de Thévenin par ao controle *droop*,  $R_{linha1}$  e  $R_{linha2}$  representam as resistências dos cabos até as cargas,  $R_{carga}$  e  $V_{carga}$  representam a resistência e a tensão da carga, respectivamente, e as correntes de saída  $I_{cc1}$  e  $I_{cc2}$  representam as correntes dos respectivos conversores.

Ao analisar a relação das correntes de saída em cada conversor apresentada na equação 2.8, é possível identificar duas técnicas para evitar que a resistência dos cabos interfira no compartilhamento de corrente.

$$\frac{I_{cc1}}{I_{cc2}} = \frac{-R_{carga} \cdot V_{ref2} + V_{ref1} \cdot (R_{linha2} + R_{d2} + R_{carga})}{-R_{carga} \cdot V_{ref1} + V_{ref2} \cdot (R_{linha1} + R_{d1} + R_{carga})} \quad (2.8)$$

A primeira técnica consiste em escolher um coeficiente *droop* muito maior do que a resistência dos cabos, de modo que a resistência se torne desprezível na queda de tensão. No entanto, essa técnica pode resultar em uma regulação de tensão maior do que a desejada, como demonstrado na Figura 11, o que pode não ser viável devido à distribuição não homogênea de cargas na MR ou de conversores com potências nominais diferentes.

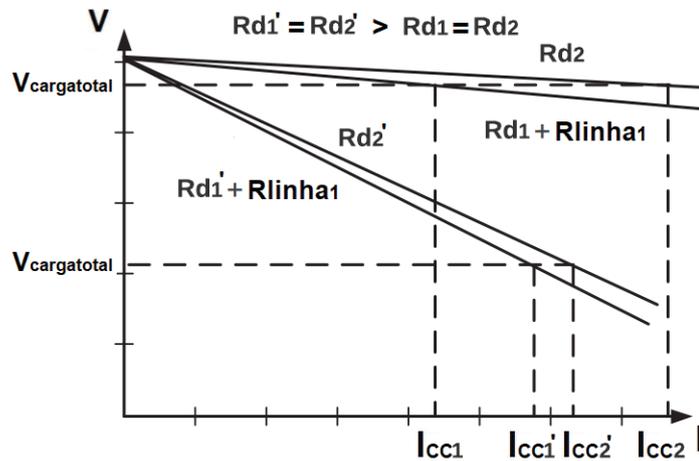
A segunda técnica está relacionada à resistência dos cabos, que deve ser selecionada de forma a garantir a proporção adequada entre as resistências:

$$\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{R_{linha1}}{R_{linha2}}$$

Na prática, no entanto, essa técnica é difícil de ser implementada, pois a resistência dos cabos é escolhida com base na ampacidade e na distância entre as cargas e os equipamentos.

A Figura 14 ilustra um cenário em que um conversor está próximo das cargas que ele fornece energia, o que permite considerar a resistência dos cabos desprezível. Já outro conversor, que também fornece energia para essas cargas, está mais distante e, portanto, deve ser considerado a presença de resistência nos cabos.

FIGURA 14 – Corrente desigual entre conversores paralelos com resistência de cabos variável



Fonte: Adaptado de Anand, Fernandes e Guerrero (2013)

Um coeficiente *droop* de valor próximo da resistência do cabo provoca um compartilhamento de carga bastante desigual com o conversor com resistência de cabo desprezível, esse conversor assume a maior parte do fornecimento de potência, enquanto um coeficiente *droop* maior consegue manter o compartilhamento de corrente em níveis aceitáveis.

O controle *droop* representa, nessas condições, uma melhora bastante significativa no compartilhamento de corrente, principalmente para MRs em que:

$$R_{d_i} \gg R_{linha_i}$$

Assumindo que a resistência dos cabos é tão baixa que não tem praticamente nenhuma influência, assim o produto  $R_{d1}R_{d2}$  pode ser negligenciado devido a  $R_{carga}$  ser muito maior que  $R_{d1}$  e  $R_{d2}$ . São calculados a diferença do compartilhamento de corrente na equação 2.9 e o equivalente *Thévenin* na equação 2.10:

$$\Delta I_{cc12} = \frac{2(V_{ref1} - V_{ref2})}{R_{d1} + R_{d2}} + \frac{R_{d2} - R_{d1}}{R_{d1} + R_{d2}} \cdot (I_{cc1} + I_{cc2}) \quad (2.9)$$

Observa-se, na equação 2.9 que a diferença de corrente da saída dos conversores é inversamente proporcional ao termo  $(R_{d1} + R_{d2})$  e que o aumento do coeficiente *droop* melhora o compartilhamento de carga entre os conversores. Em contrapartida, o aumento do coeficiente *droop* tem como consequência direta o aumento da regulação de tensão, como apresentado a seguir:

$$\Delta V_{carga} = \frac{\overbrace{V_{ref1} \cdot R_{d2} + V_{ref2} \cdot R_{d1}}^{V_{refi}}}{R_{d1} + R_{d2}} - \frac{\overbrace{R_{d1} \cdot R_{d2}}^{R_{di}}}{R_{d1} + R_{d2}} \cdot (I_{cc1} + I_{cc2}) \quad (2.10)$$

As equações 2.9 e 2.10 apresentam as limitações construtivas do coeficiente *droop* convencional. Em síntese, adotar um coeficiente *droop* maior permite melhor compartilhamento de carga e menor regulação de tensão, e para um coeficiente *droop* menor, existe pior compartilhamento de carga e melhor regulação de tensão.

De maneira geral, o controle *droop* convencional possui alta confiabilidade e facilidade na implementação porque não requer qualquer comunicação entre os conversores. Por outro lado, existe um custo de oportunidade entre ter um compartilhamento de carga ou uma regulação da tensão apropriada.

Para validar as estratégias de controle apresentadas, são utilizados dois indicadores: a regulação de tensão, que é calculada conforme a equação 2.11 e expressa a variação percentual da tensão em relação a uma referência, e o compartilhamento de corrente, medido pela equação 2.12, que indica a porcentagem de corrente que cada conversor está fornecendo em relação à carga total.

$$V_{ri}(\%) = \frac{V_{refi} - V_{carga}}{V_{refi}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

$$I_{ei}(\%) = \frac{|I_{cci} - I_{carga}|}{I_{carga}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Na equação 2.11,  $V_{ri}(\%)$  e  $V_{refi}$  representam, respectivamente, a regulação de tensão e a tensão de referência do  $i$ -ésimo conversor, enquanto  $V_{carga}$  é a tensão na carga. Já na equação 2.12,  $I_{ei}(\%)$  é a precisão do compartilhamento de corrente do  $i$ -ésimo conversor, considerando como referência a corrente de carga  $I_{carga}$  e a corrente de saída do conversor  $I_{cci}$ .

## 2.5 CONTROLE *DROOP* ADAPTATIVO

O controle *droop* adaptativo é um método descentralizado de controle primário que pode ser utilizado para obter um controle linear da potência de saída de um conversor, modificando o coeficiente *droop* em tempo real.

Na operação de MRs CC, o controle *droop* adaptativo é amplamente utilizado para equalizar o estado de carga de baterias, prolongando a vida útil das mesmas. As técnicas adotadas utilizam o estado de carga dos sistemas de armazenamento de energia como parâmetro do coeficiente *droop*, possibilitando a priorização de baterias mais carregadas no fornecimento de potência.

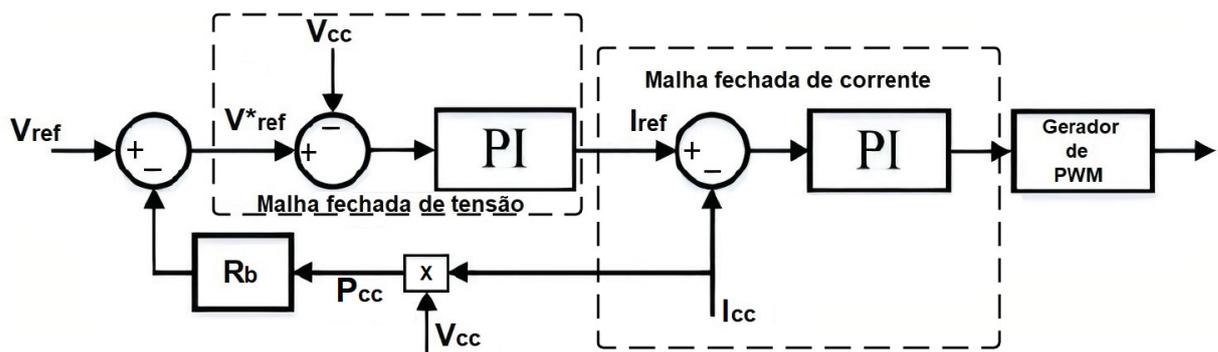
Com base na Equação 2.3 do controle *droop* convencional, o controle *droop* adaptativo em função da potência de saída pode ser definido como:

$$V_{ref_p}^* = V_{ref_i} - R_{b_i} \cdot P_{cc_i} \quad (2.13)$$

onde,  $V_{ref_p}^*$  é a nova tensão de referência do controle *droop* adaptativo,  $V_{ref_i}$  é a tensão de referência do  $i$ -ésimo conversor e  $R_{b_i}$  é o coeficiente *droop* adaptativo do  $i$ -ésimo conversor e  $P_{cc_i}$  é a potência de saída do  $i$ -ésimo conversor.

A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos de um controle *droop* adaptativo, que é semelhante ao diagrama de blocos do controle *droop* convencional. Nesse controle, a tensão na MR é proporcional à potência de saída do conversor.

FIGURA 15 – Diagrama de blocos do controle *droop* adaptativo



Fonte: O autor (2022)

Sendo  $V_{cc}$  e  $I_{cc}$  respectivamente a tensão e corrente de saída do conversor e  $P_{cc}$  a potência resultante de saída do conversor, e a corrente de referência  $I_{ref}$  dada uma tensão de referência  $V_{ref}$ .

Para adaptar a resistência *droop* em função do estado de carga (*SoC*), podem ser utilizadas funções de compensação que modifiquem o coeficiente *droop* em tempo

real (MARCELINO, 2017). Entre essas funções, a mais utilizada é a função exponencial. A equação do *droop* adaptativo em função do *SoC* é definida da seguinte forma:

$$R_{b_i} = R_{b_0} \cdot f(\text{SoC}_i, n) \quad (2.14)$$

em que  $R_{b_i}$  é o coeficiente de *droop* modificada da *i*-ésima SAE,  $R_{b_0}$  é o coeficiente de *droop* inicial do SAE e  $f(\text{SoC}_i, n)$  é o fator de compensação baseado no *SoC* da *i*-ésima SAE e do fator de convergência  $n$  que representa a velocidade de resposta do sistema de armazenamento.

Quanto maior o valor de  $n$ , mais rapidamente a *SoC* atinge o equilíbrio, já que a potência fornecida ou absorvida varia em função do estado de carga da bateria.

Porém, é importante levar em consideração os limites de potência de fornecimento dos conversores, evitando que o valor de  $n$  seja excessivamente elevado e ultrapasse esses limites, comprometendo a estabilidade do sistema.

O cálculo do coeficiente de *droop* adaptativo para a operação de carregamento da bateria  $R_{bc_i}$  é definido da seguinte maneira: "

$$R_{bc_i} = R_{b_0} \cdot \text{SoC}_i^n \quad (2.15)$$

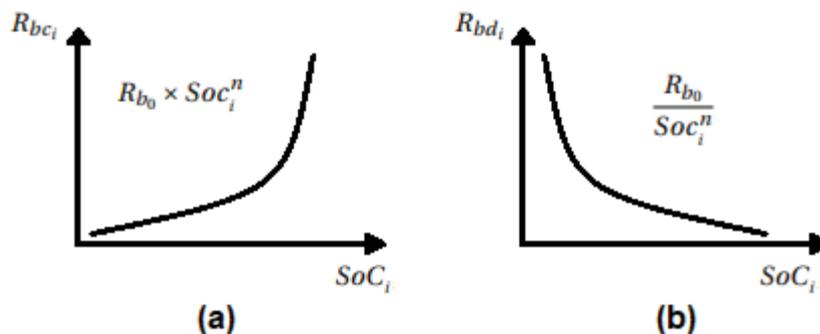
em que  $\text{SoC}_i^n$  é o fator de compensação baseado no *SoC* da *i*-ésima SAE do tipo potência para o estado de carga da bateria no modo de carregamento.

No modo de operação de descarga da bateria, o cálculo do coeficiente de *droop*  $R_{bd_i}$  é definido como:

$$R_{bd_i} = \frac{R_{b_0}}{\text{SoC}_i^n} \quad (2.16)$$

em que  $\text{SoC}_i^{-n}$  é o fator de compensação baseado no *SoC* da *i*-ésima SAE do tipo potência do estado de carga da bateria no modo de descarregamento. A Figura 16 apresenta os dois modos de operação comentados anteriormente.

FIGURA 16 – Coeficiente *droop* adaptativo em função estado de carga de uma bateria



Fonte: O autor (2022)

No controle *droop* adaptativo, é possível modificar o coeficiente *droop* durante o regime de carregamento ou descarregamento da bateria, com base no seu estado de carga.

Uma forma de calcular o estado de carga de uma bateria é utilizando o método de contagem de Coulomb, o qual permite uma aproximação da tensão de saída do sistema de armazenamento de energia para uma tensão ideal constante durante a maior parte de sua operação.

Considerando a perda de tensão interna do conversor como negligenciável e conhecendo o estado de carga inicial da bateria, a SoC pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$SOC = SOC_{t=0} - \frac{1}{Q_n V_{en}} \int P_{bat} dt \quad (2.17)$$

em que a  $SOC_{t=0}$  é o estado de carga inicial,  $P_{bat}$  é potência de saída da bateria,  $V_{en}$  é a tensão de entrada do conversor e  $Q_n$  é a capacidade da bateria.

Desprezando a perda de potência no conversor e supondo que as tensões de saída das baterias são as mesmas da entrada do conversor, pode-se aproximar a potência do conversor  $P_{cc_i}$  como a mesma da potência da bateria  $P_{bat}$ .

$$P_{bat} = P_{cc_i} \quad (2.18)$$

Para dois SAEs operando em uma microrrede acoplados em conversores paralelos distintos, as equações de controle *droop* adaptativo para cada conversor são dadas pelas Equações 2.19 e 2.20. Supondo que ambos os conversores estejam muito próximos e que a resistência do cabo seja desprezível, as tensões de saída dos conversores são iguais,  $V_{ref^*1} = V_{ref^*2}$  como demonstrado na Equação 2.21, que relaciona a potência de saída dos conversores com suas respectivas resistências de bateria.

$$V_{ref^*1} = V_{ref1} - R_{b1} \cdot P_{cc1} \quad (2.19)$$

$$V_{ref^*2} = V_{ref2} - R_{b2} \cdot P_{cc2} \quad (2.20)$$

$$\frac{P_{cc1}}{P_{cc2}} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1}} \quad (2.21)$$

Utilizando a Equação 2.15 na Equação 2.21, é possível verificar que o estado de carga da bateria é inversamente proporcional à potência fornecida pelo conversor quando a bateria está sendo carregada, como mostrado na Equação 2.22. Isso significa que quando  $Soc_1^n > Soc_2^n$ , tem-se que  $P_{cc1} < P_{cc2}$ , equalizando o estado de carga de ambas as baterias para a operação de carga.

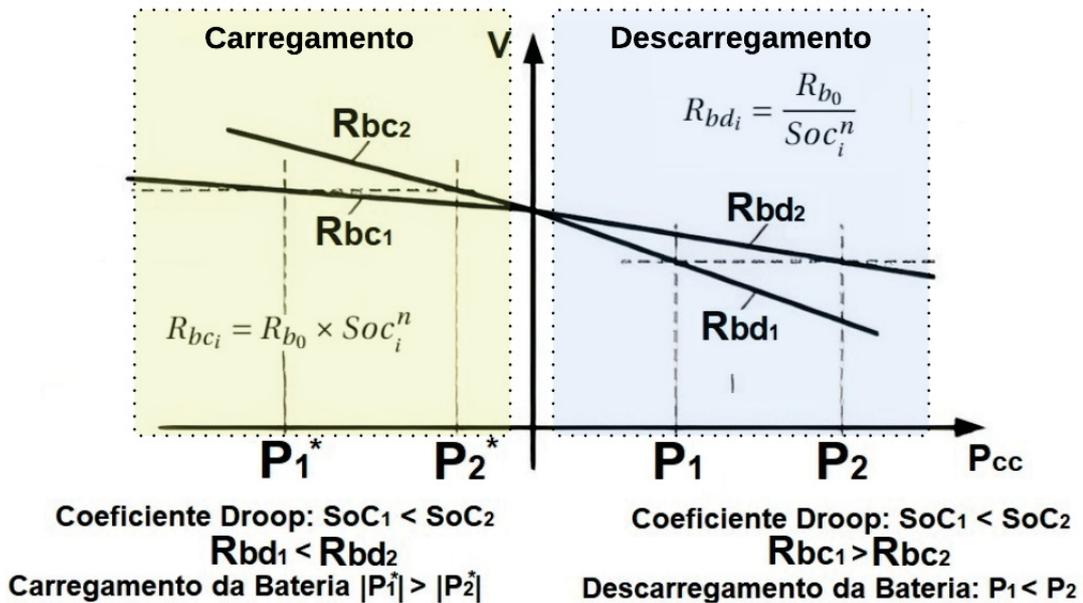
$$\frac{P_{cc1}}{P_{cc2}} = \frac{R_{bc2}}{R_{bc1}} = \frac{Soc_2^n}{Soc_1^n} \quad (2.22)$$

Da mesma forma, utilizando a Equação 2.16 na Equação 2.21, é possível verificar que o estado de carga da bateria é diretamente proporcional à potência fornecida pelo conversor quando a bateria está sendo descarregada, como mostrado na Equação 2.23. Isso significa que quando  $Soc_1^n > Soc_2^n$ , tem-se que  $P_{cc1} > P_{cc2}$ , equalizando o estado de carga de ambas as baterias para a operação de descarga.

$$\frac{P_{cc1}}{P_{cc2}} = \frac{R_{bd2}}{R_{bd1}} = \frac{Soc_1^n}{Soc_2^n} \quad (2.23)$$

A Figura 17 apresenta a operação de dois conversores em paralelo, funcionando com o controle droop adaptativo com a função de compensação baseada no estado de carga de baterias, operando no regime de carregamento e descarregamento com coeficientes droop iniciais diferentes.

FIGURA 17 – Controle *droop* baseado em quadrante duplo da SoC



Fonte: Adaptado de Lu, Sun et al. (2015)

Verifica-se em verde, no primeiro quadrante, que a potência absorvida da bateria é proporcional ao estado de carga da bateria, e em azul, no segundo quadrante, que a potência fornecida é inversamente proporcional ao estado de carga (LU; SUN et al., 2015).

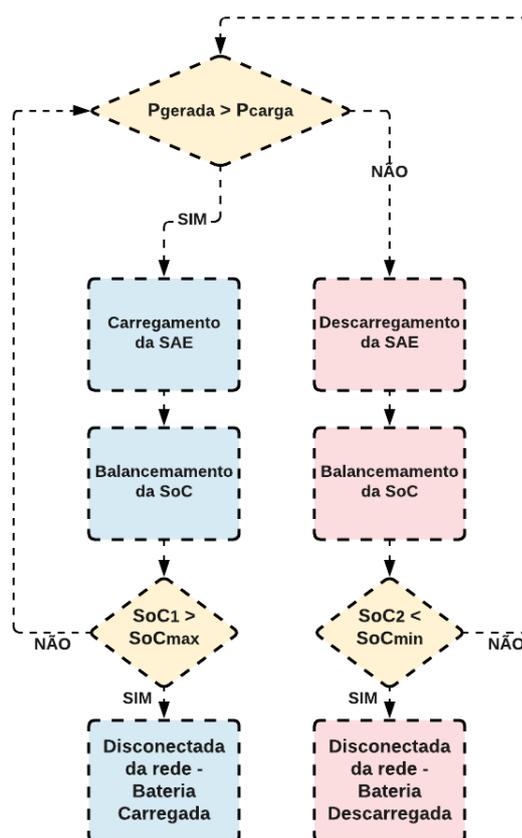
Como o coeficiente *droop* é inversamente proporcional à potência de saída do conversor em dois SAE em paralelo, o SAE que contiver o maior estado de carga terá

uma maior entrega de potência à rede, e a bateria com o menor estado de carga terá uma menor entrega de potência até a equalização do estado de carga.

Para que seja possível alternar entre os coeficientes *droop* de carga e descarga da bateria, é necessário tomar decisões com base nos limites de estado de carga máxima ( $SoC_{max}$ ) e mínima ( $SoC_{min}$ ). A Figura 18 apresenta um possível fluxograma do algoritmo de controle *droop* adaptativo.

Durante a operação ilhada de uma MR, o SAE deve fornecer e absorver energia de acordo com a operação do sistema. Quando a demanda da rede é menor do que a geração, a bateria opera no modo de carregamento. De maneira oposta, quando a demanda é maior, a bateria opera no modo de descarregamento. Quando a MR está com uma geração maior do que a demanda das cargas e o SAE está totalmente carregado, o SAE é desconectado do sistema até que a geração da rede seja menor do que a potência demandada pelas cargas.

FIGURA 18 – Fluxograma do controle *droop* baseado em quadrante duplo da *SoC*



Fonte: Adaptado de Lu, Sun et al. (2015)

Como pode ser visto no fluxograma, caso a potência gerada no barramento seja menor do que a potência demandada pelas cargas, o SAE entra na operação de carregamento até o  $SoC_{max}$  proposto. Quando o inverso ocorre, o SAE entra na

operação de descarregamento até o  $SoC_{min}$  definido.

Conforme o  $SoC$  do SAE diminui durante a descarga, o fator de compensação  $r_{d_i}$  diminui o coeficiente *droop* proporcionalmente. Na operação de carregamento, o fator de compensação  $r_{c_i}$  aumenta. O sistema sempre será equalizado para que todas as baterias apresentem o mesmo nível de carga, independentemente do  $SoC$  inicial.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 METODOLOGIA PARA REVISÃO DE LITERATURA

Foi realizado o estudo e análise das publicações envolvendo o tema do presente trabalho e, posteriormente, foram demonstradas as estratégias de seleção das publicações da revisão literária.

Os artigos selecionados durante a revisão narrativa da literatura, por não utilizarem critérios explícitos, foram selecionados de maneira qualitativa. Para ambas as revisões foram utilizadas as bases de dados de artigos científicos nominalmente chamadas de *Web of Science* e *Scopus*, devido à disponibilidade de metadados para pesquisas sistemáticas, o que tornou possível a realização de um estudo amplo do tema. Quanto aos critérios de seleção para a coleta da produção científica, foram levadas em consideração palavras-chave relacionadas aos temas de MR na operação em corrente contínua, assim como métodos de controle *droop* e operação de SAE.

A relação das palavras chaves e os temas propostos podem ser observados na tabela 1.

TABELA 1 – Temas e Palavra-Chave

Temas	Palavra-Chave
Microrrede na operação em corrente contínua	"Microrrede" e "CC"
Métodos de controle droop	"Droop" e "Controle"
Operação de sistemas de armazenamento de energia	"Droop" e "Armazenamento"

Fonte: O autor (2021)

Para o levantamento de periódicos nas bases de dados da CAPES é necessária a escolha de palavras-chave. Nesse ponto, não houve retorno nas duas bases consultadas para pesquisas em língua portuguesa. A pesquisa foi realizada na língua inglesa em conjunto com as expressões booleanas necessárias para denotar exclusividade entre as palavras-chave selecionadas.

No dia 13/07/2021 foi executada a busca nas bases científicas Web of Science (WoS) e Scopus. Ambas as bases são compatíveis com ferramentas de análise e de gerenciamento bibliométrico como Zotero e Mendeley, utilizadas no presente trabalho (ZHANG et al., 2021).

Na Tabela 2 são verificadas as palavras-chave e a respectiva quantidade de artigos encontrados em cada base de dados.

TABELA 2 – Número de publicações encontradas em cada base em relação a palavra-chave

Palavra-Chave	Palavra-Chave Traduzida	Web of Science	Scopus
"Droop" and "Storage"	"Droop" e "Armazenamento"	1209	1403
"Droop" and "DC" and "Microgrid"	"Droop" e "CC" e "Microrrede"	1016	1285
"Control" and "DC" and "Microgrid" and "Storage"	"Controle" e "CC" e "Microrrede" e "Armazenamento"	506	711

Fonte: O autor (2021)

Do resultado da relação das publicações envolvendo a pesquisa com as palavras-chave envolvendo os termos "Droop", "CC" e "Microrrede" e uma pesquisa envolvendo os termos "Droop", "CC" "Microrrede" e "Armazenamento" verificou-se que aproximadamente um terço das publicações com os termos "Droop", "CC" e "Microrrede" remete a sistemas de armazenamento de energia.

Após a finalização da pesquisa em cada base, as referências duplicadas dentro da base e entre as bases foram excluídas, comparando-se o endereço DOI (*Digital Object Identifier*) Após a finalização da pesquisa em cada base, as referências duplicadas dentro da base e entre as bases foram excluídas, comparando-se o endereço DOI.

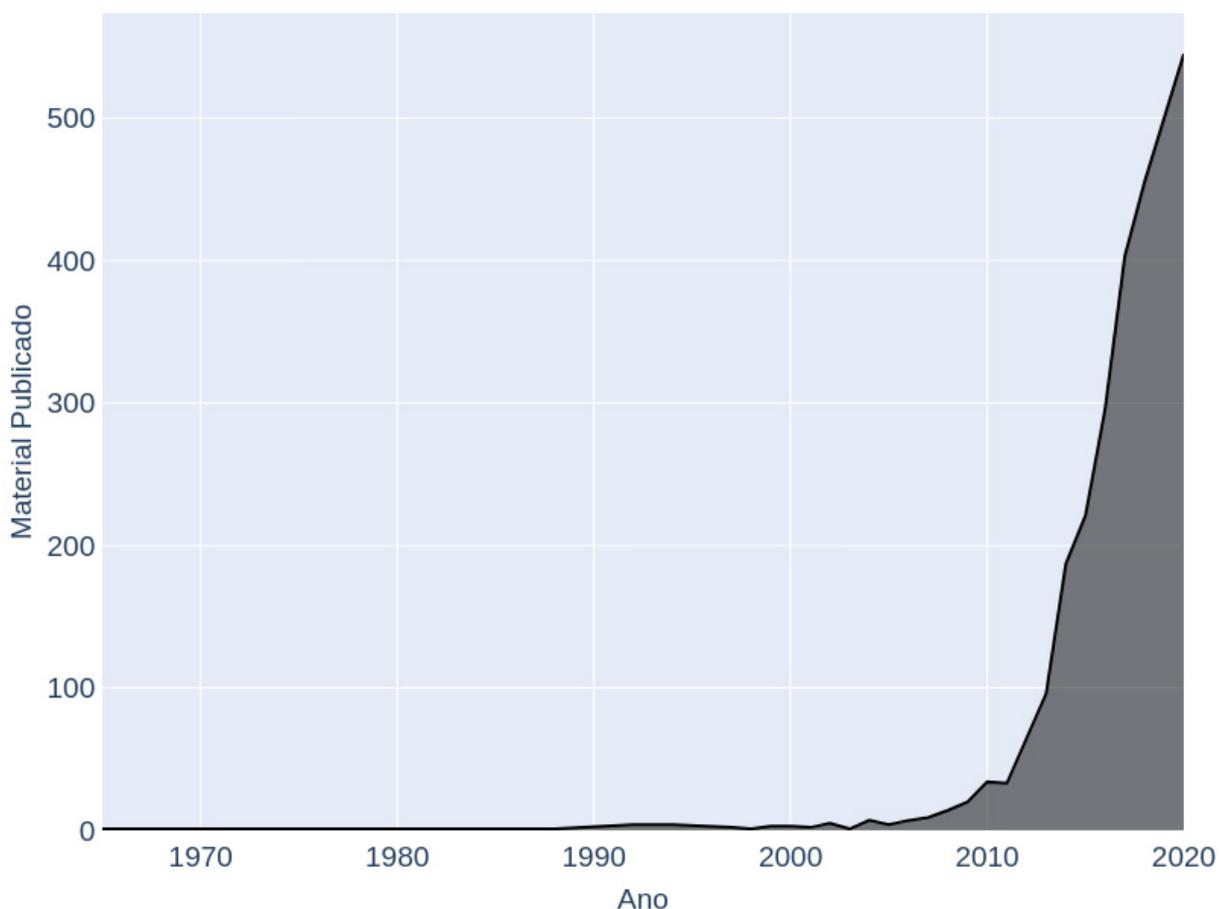
### 3.1.1 Análise estatística da base de dados

A análise praticada nessa seção foi utilizada como forma de revisar os periódicos e estudar a evolução dos temas relacionados à pesquisa, apresentados na 1, amparando-se apenas na coleta bruta da base de dados. Da base total de 3172 publicações selecionadas, 1605 eram artigos científicos, 1554 estavam classificados como anais de eventos (também conhecidos como *proceedings*) e 13 eram capítulos de livros.

Na primeira análise foi quantificada a somatória do número de publicações totais da base de dados referenciada na Tabela 2 em seu respectivo ano. De maneira geral, é bastante incipiente a literatura envolvendo SAE, método de controle *droop* para conversores na rede CC e a operação de MRs CC.

O número de publicações encontradas durante o período entre o ano de 1965 e 2008 na base de dados totalizou a quantidade de 620 publicações, o que enfatiza que o tema tomou maior relevância a partir desse período. Na figura 19 é possível verificar toda série histórica de publicações do tema entre 1965 até 2020:

FIGURA 19 – Série histórica de publicações entre 1965 até 2020



Fonte: O autor (2021)

Na segunda análise, buscou-se selecionar as revistas baseadas no número de publicações encontradas na base de dados. Os dez periódicos com mais publicações do tema (Tabela 2) podem ser vistos na Tabela 3.

TABELA 3 – Quantidade de artigos citados na literatura baseadas no número de publicações

Periódicos Científicos	Número de Publicações
IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID	124
ENERGIES	103
IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS	99
INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS	69
IEEE ACCESS	67
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS	61
IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION	43
IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS	41
DIANWANG JISHU/POWER SYSTEM TECHNOLOGY	40
DIANLI XITONG ZIDONGHUA/AUTOMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS	39

Fonte: O autor (2021)

Os periódicos envolvendo a revista do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) possuem uma quantidade expressiva de publicações no tema, seguida de editoras como *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI), a *Power System Technology Press* (PSTP) e a *Nanjing Automation Research Institute* (NARI).

Com base na Tabela 3, verificou-se na Tabela 4 os dez periódicos mais recorrentes e as suas respectivas métricas utilizadas na base de dados do Scopus, denominadas de CiteScore<sup>1</sup>, SNIP<sup>2</sup> (Source Normalized Impact per Paper) e o SJR<sup>3</sup> (SCImago Journal Rank).

TABELA 4 – Principais periódicos da base da dados

Periódicos Científicos	CiteScore (2020)	SNIP	SJR	Editora
IEEE Transactions on Smart Grid	19,6	3,336	3,571	IEEE
Energies	4,7	1,161	0,598	MDPI
IEEE Transactions on Power Electronics	14,5	2,989	2,159	IEEE
IEEE Access	4,8	1,421	0,587	IEEE
IEEE Transactions on Industrial Electronics	17,8	3,351	2,393	IEEE
IEEE Transactions on Energy Conversion	10,0	2,169	1,544	IEEE
IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	10,1	2,33	1,57	IEEE
Dianwang Jishu/Power System Technology	4,9	1,408	0,87	PSTP
Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems	5,6	1,578	0,895	NARI

Fonte: O autor (2021)

Na terceira análise, buscou-se encontrar os principais autores e seus respectivos impactos na comunidade científica referente aos temas da 1.

Os índices são métricas com metodologias diferentes que quantificam a produção e qualidade bibliométrica de um pesquisador. Foi analisado o índice G de todos os autores na base de dados coletada.

O cálculo do índice G pode variar dependendo da coleção bibliográfica. Neste trabalho, o índice G é baseado apenas em publicações referentes à base de dados encontrada na 2.

O índice G distancia os autores com base em suas citações em maior extensão em comparação com outras métricas, embora o indicador sature sempre que o número médio de citações para todos os artigos publicados do autor exceda o número total de artigos publicados. O respectivo índice foi escolhido pela sua performance em manter uma menor disparidade entre autores com menos citações e autores mais citados. A métrica também gerou maior diferença aparente entre autores, possibilitando uma melhora gráfica de análise.

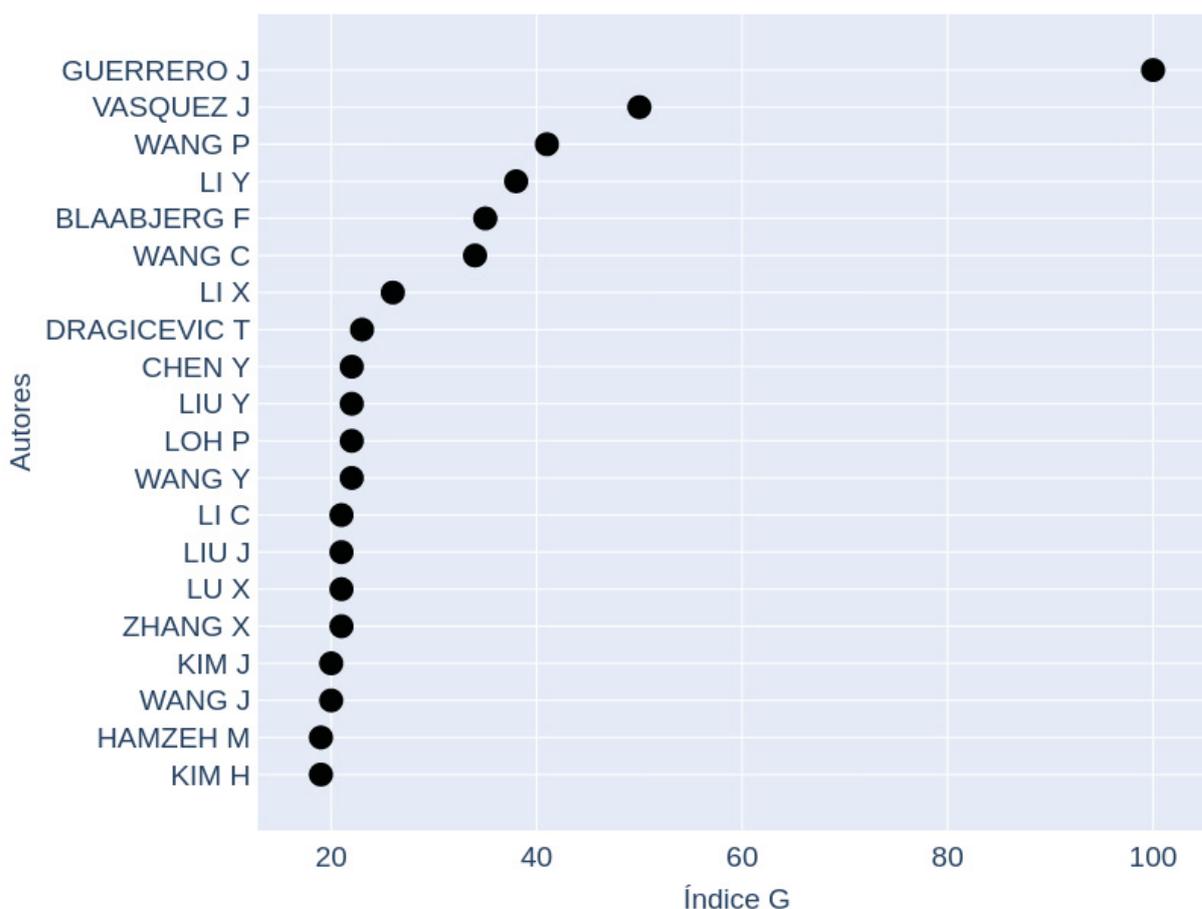
O autor mais citado de acordo com a métrica utilizada foi J. Guerrero. A lista de todos os principais autores citados e seus respectivos índices G pode ser encontrada na 20.

<sup>1</sup> CiteScore – Mensura o impacto da citação, o cálculo é baseado no número médio de citações recebidas em um ano por todos os itens publicados nesse periódico nos três anos anteriores.

<sup>2</sup> SNIP – Source Normalized Impact per Paper: Mede o impacto de citações contextualizadas por revistas ponderando citações com base no número total de citações em um campo de assunto.

<sup>3</sup> SJR – SCImago Journal Rank: Métrica baseada na reputação do periódico, o que resulta em maior valor da citação.

FIGURA 20 – Índice G dos principais autores



Fonte: O autor (2022)

Na quarta análise foram selecionados os principais artigos na literatura, apresentados na 2. Nesta etapa, a métrica utilizada foi o impacto da citação normalizada de publicações relacionadas com a base de dados.

O Impacto de citação normalizada de um documento é calculado dividindo o número total de citações do respectivo artigo pela taxa de citação esperada para artigos com o mesmo ano de publicação e área abordada.

A métrica pode ser utilizada para comparar o impacto entre publicações. A Tabela 5 apresenta os artigos com maior impacto normalizado na literatura conforme a base de dados (Tabela 2).

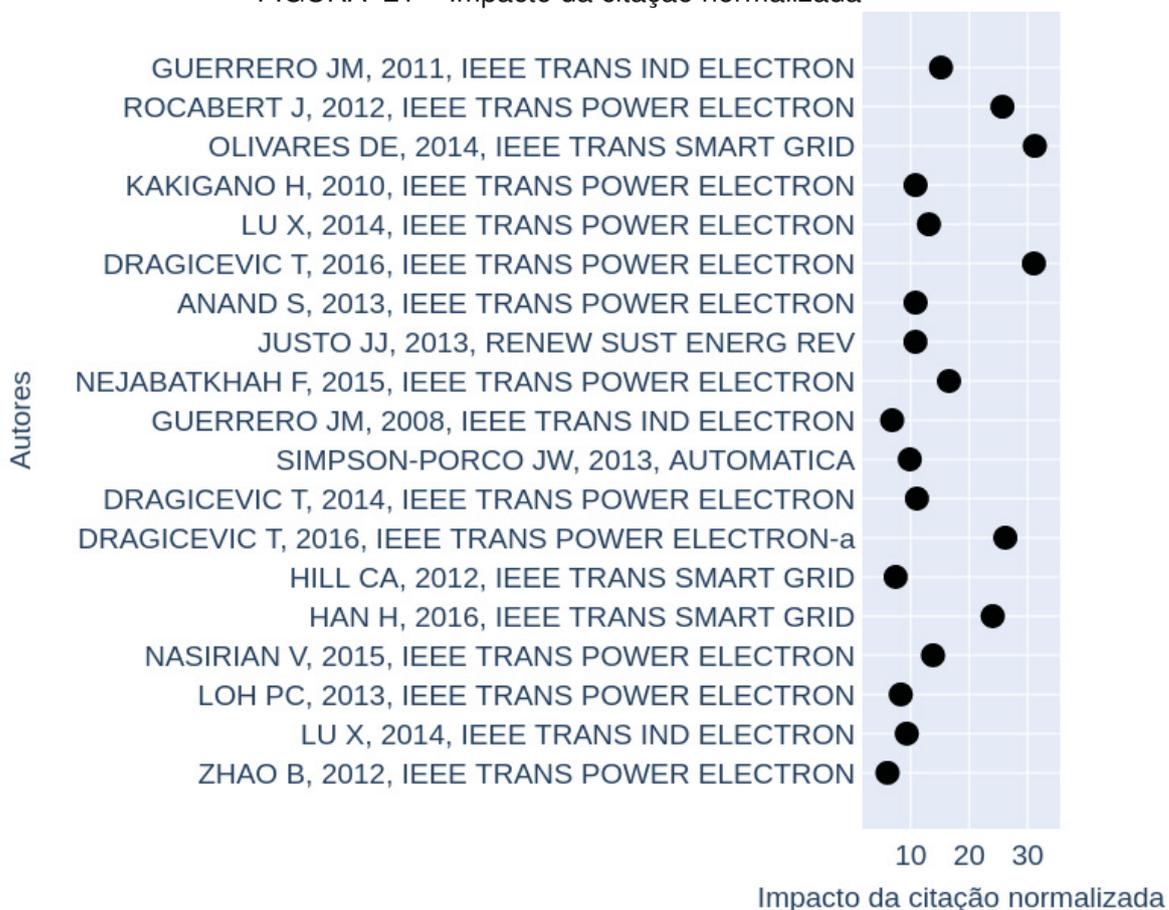
TABELA 5 – Dez principais artigos citados na literatura

Artigos Científicos	Autor
Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids	GUERRERO JM, 2011
Control of Power Converters in AC Microgrids	ROCABERT J, 2012
Trends in Microgrid Control	OLIVARES DE, 2014
Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution	KAKIGANO H, 2010
An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy	LU X, 2014
DC Microgrids Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques	DRAGICEVIC T, 2016
Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids	ANAND S, 2013

Fonte: O autor (2021)

A lista inteira de todas as publicações, autores e seus respectivos impactos de citação podem ser encontradas na figura 21.

FIGURA 21 – Impacto da citação normalizada



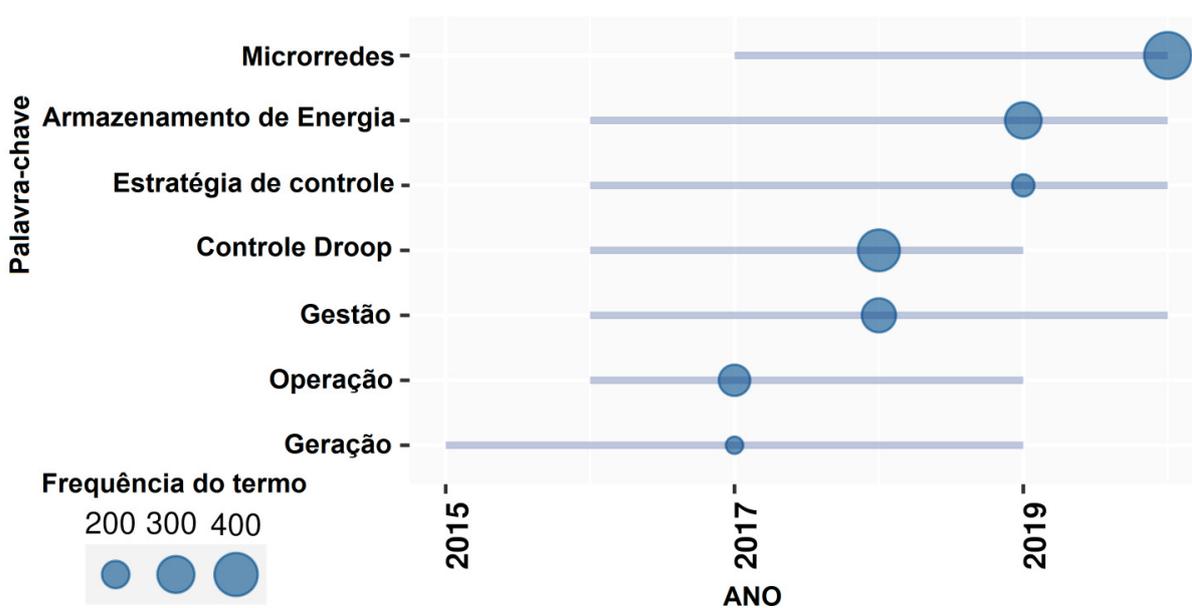
Fonte: O autor (2021)

Para a última análise, foi verificada a variação de palavras-chave de publicações durante o tempo. Nesta etapa, procurou-se entender a evolução e mudança do foco dos temas de acordo com a frequência dos termos utilizados. A técnica de depuração dos resultados deu-se contabilizando a quantidade de palavras-chave coincidentes

entre os autores. Essas expressões devem ter sido utilizadas ao menos mais de 100 vezes e no mínimo durante dois anos.

A Figura 22 apresenta as palavras-chave e o seu respectivo uso inicial e final, em conjunto com sua frequência durante o tempo.

FIGURA 22 – Evolução cronológica de palavras-chaves na literatura



Fonte: O autor (2021)

Foi verificado que o tema de MRs é um assunto recente e relevante, e tem sido nos últimos anos foco das recentes publicações do gênero. As estratégias de controle de potência como o controle *droop* e os estudos de SAE vinculado a MRs também foram temas recorrentes em publicações atuais.

### 3.1.2 Seleção de publicações da revisão da literatura

Após a coleta do material verificada na seção 3.1, a base de dados resultou em inicialmente 3172 publicações. Dessas, foram excluídas publicações que apresentaram no resumo ou na seção de palavras-chave termos que não possuíam foco no tema do trabalho, conforme verificado na Tabela 1.

As publicações excluídas possuíam exclusivamente termos como "*frequency*", "P-Q", "*wind*", "AC", "AC-DC", "DC-AC", "*reactive*", "*power factor*" e "*AC power*".

A seleção procedeu com 2571 publicações, com o foco em delimitar a literatura de maneira mais profunda para a seleção de materiais pertinentes ao tema. Foram adotadas as três abordagens definidas a seguir:

1. Principais periódicos da base de dados definidos na Tabela 3
2. Artigos com impacto significativo na literatura (artigos com mais de 25 citações)

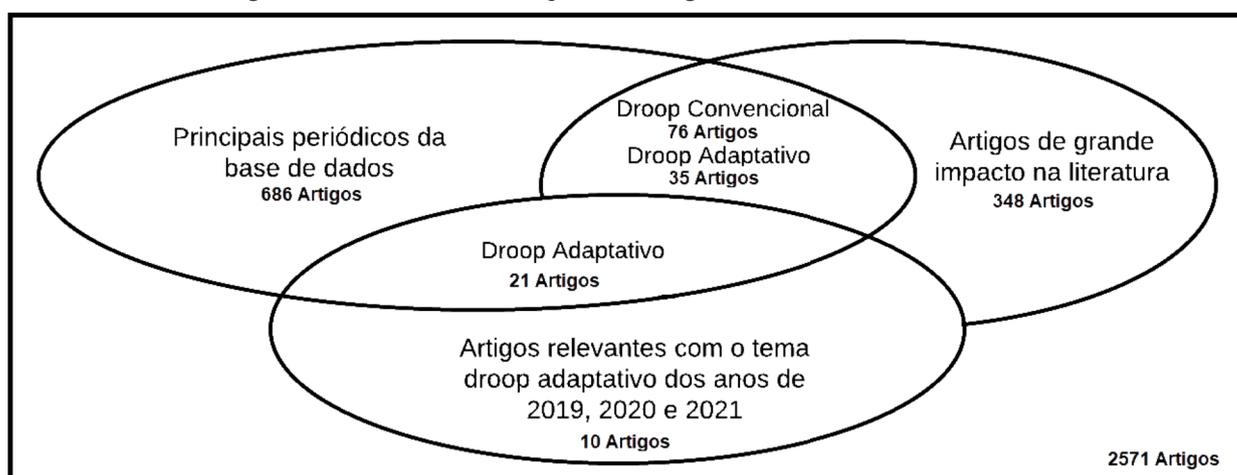
3. Artigos que utilizaram técnicas de *droop* adaptativo publicados nos anos de 2019, 2020 e 2021.

Foram selecionados apenas artigos relacionados a técnicas de *droop* convencional ou adaptativo através das abordagens previamente definidas.

Para a busca de artigos com o tema de "*Droop* Adaptativo" foram utilizadas em conjunto a abordagem 1 e 2. Devido a técnica ser recente foram somados também artigos de principais periódicos dos anos de de 2019, 2020 e 2021. Para a busca do tema "*Droop* Convencional", foram usadas apenas a abordagem 1 e 2, uma vez que o tema está bem consolidado na literatura.

A Figura 23 apresenta a metodologia de delimitação dos artigos utilizando o diagrama de Venn:

FIGURA 23 – Diagrama de Venn da seleção de artigos na revisão sistemática da literatura



Fonte: O autor (2022)

Entre os 31 artigos selecionados como artigos relevantes com o tema *droop* adaptativo entre os anos de 2019 e 2021, mais da metade pertenciam aos principais periódicos da base de dados.

Os resultados da análise revelaram a existência de 21 artigos que abordam o tema do *droop* adaptativo na intersecção entre os principais periódicos da base de dados e os artigos publicados entre 2019, 2020 e 2021. Adicionalmente, ao considerar a intersecção entre os principais periódicos e os artigos de grande impacto na literatura, foram encontrados 76 artigos relacionados ao *droop* convencional e 35 artigos relacionados ao *droop* adaptativo.

Após definida a delimitação do material, obteve-se cerca de 132 publicações. Efetuou-se, então, a leitura do resumo e a conclusão dos artigos. Por fim, foram selecionadas 26 publicações.

A intersecção entre os principais periódicos da base de dados e os artigos publicados entre 2019, 2020, e 2021 sobre *droop* adaptativo foram encontrados 21

artigos, enquanto a interseção entre os principais periódicos e os artigos de grande impacto na literatura apresentaram 76 artigos sobre *droop* convencional e 35 artigos sobre *droop* adaptativo.

Posteriormente, foi realizada a leitura integral de cada artigo e selecionadas 11 publicações para servirem como referência no presente trabalho. Os artigos são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 – Artigos selecionados na revisão sistemática da literatura

Título dos Artigos Científicos	Autor
Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization	GUERRERO JM et al., 2011
Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids	ANAND S et al., 2013
An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy	LU X et al., 2014
Optimal, Nonlinear, and Distributed Designs of Droop Controls for DC Microgrids	MAKNOUNINEJAD et al., 2014
Enhanced Load Power Sharing Accuracy in Droop-Controlled DC Microgrids with Both Mesh and Radial Configurations	LIU et al., 2015
An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids With Enhanced Dynamic Current Sharing Performance	WANG et al., 2016
Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability	DRAGICEVIC et al., 2014
Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters	SHAFIEE et al., 2014
DC Microgrids: Economic Operation and Enhancement of Resilience by Hierarchical Control	CHE; SHAHIDEHPOUR, 2014
State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications	LU et al., 2014
A comparative study of Droop Compensation Functions for State-of-Charge based adaptive droop control for Distributed Energy Storage Systems	MARCELINO et al., 2017

Fonte: O autor (2021)

Os trabalhos que não foram incluídos na revisão sistemática da literatura são incluídos nesta seção. Foram selecionados 6 artigos a partir da revisão narrativa da literatura com o intuito de aumentar a abrangência do estudo do tema.

TABELA 7 – Artigos selecionados na revisão narrativa da literatura

Título dos Artigos Científicos	Autor
Decentralized Inverse-Droop Control for Input-Series-Output-Parallel DC-DC Converters	XU et al, 2015
Coordinated control of a DC electrical power system in the more electric aircraft integrated with energy storage.	GAO et al, 2015
A nonlinear droop method to improve voltage regulation and load sharing in DC systems.	CHEN et al, 2015
SOC Dynamic Balance Strategy Based on Adaptive Droop Control with Variable Regulating Factor	ZHANG et al., 2021
Novel Nonlinear Droop Control Techniques to Overcome the Load Sharing and Voltage Regulation Issues in DC Microgrid	PRABHAKARAN; GOYAL; AGARWAL, 2018
An Improved Droop Control for a Low Voltage DC Microgrid Operation	SHEHATA et al., 2019

Fonte: O autor (2021)

## 3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

Esta seção apresenta a análise dos artigos selecionados. O principal objeto de estudo dos trabalhos são as técnicas de controle hierárquico em MRs CC utilizando o controle *droop* para compartilhamento de carga entre conversores.

### 3.2.1 Controle *droop* linear

Conforme Guerrero et al. (2011) são utilizados conversores operando em paralelo com dois níveis hierárquico de controle. Neste trabalho, o método de *droop* linear (controle *droop* V-I) é aplicado. Para melhorar a regulação de tensão no barramento comum de dois conversores em paralelo, o controle proposto neste trabalho soma um desvio na malha do controle *droop* para cada conversor. O desvio calculado depende da diferença de tensão entre a tensão de referência esperada no barramento comum e a tensão instantânea real. O controle proposto atua de forma mais lenta que os controles internos do conversor e corrige em tempo real as quedas de tensão inerentes do controle *droop* linear resultando em uma tensão constante em regime permanente e, por consequência, uma melhor regulação de tensão no barramento para o mesmo compartilhamento de carga em relação ao controle *droop* ausente do controle secundário proposto.

O controle *droop* linear com auxílio de um controle secundário distribuído utilizando uma comunicação de baixa largura de banda para medição de tensão e corrente entre conversores operando em paralelo é analisado em Lu, Guerrero et al. (2014) e Maknouninejad et al. (2014). A comunicação de baixa largura de banda foi utilizada nos trabalhos para o envio de dados de tensão e corrente entre os conversores recorrendo a sensores locais em cada conversor.

Em Lu, Guerrero et al. (2014) o controle é composto por duas malhas externas. A primeira malha de controle compara a média das correntes dos conversores com a corrente instantânea do conversor controlado e através de um controlador proporcional integrador envia o desvio para a malha de controle *droop*. A segunda malha de controle compara a tensão de referência do controle *droop* com a tensão de saída do conversor e através de um controlador proporcional integral envia o desvio para a malha do controle *droop*, com a finalidade de melhorar o compartilhamento de carga entre os conversores. Foi verificado que o controle operou estável com atrasos de comunicação próximos de vinte milissegundos e a malha de controle *droop* proposta é garantida mesmo com diferentes valores de resistências nos cabos entre os conversores e as cargas. Para valores de atraso de comunicação próximos de um segundo, o sistema se tornou oscilatório.

Em Anand, Fernandes e Guerrero (2013), o controle primário é baseado no

método de controle de *droop* linear juntamente com um controle secundário distribuído para correção de compartilhamento de carga desigual entre conversores em paralelo. No método proposto, cada conversor recebe o valor da corrente de saída dos outros conversores em paralelo, e cada controlador interno ao respectivo conversor calcula a corrente média e, através de um compensador, envia para a malha de controle *droop*. A comunicação entre controladores é realizada utilizando o protocolo CAN. O controle proposto diminuiu o erro percentual do compartilhamento de carga entre conversores de 35,8% do controle *droop* convencional para 6,6% do controle proposto.

Um controle secundário distribuído com o objetivo de atenuar as desvantagens do controle *droop* linear é proposto em Wang et al. (2016). São propostos três controladores para corrigir os problemas de regulação de tensão, compartilhamento de carga e as resistências de cabos não desprezíveis entre os conversores e as cargas. A corrente e tensão de saída e o coeficiente *droop* de cada conversor são compartilhados por comunicação de baixa largura de banda. Os três controladores recebem as três medições e cada controlador no respectivo conversor calcula localmente a média aritmética de cada medição. É, então, realizada a comparação da média das medições em relação ao valor definido como referência de cada termo no respectivo conversor. Por fim, os desvios dos sinais atravessam um controlador proporcional integrador e são somados à malha de controle *droop*. A aplicação experimental do método demonstrou uma melhor resposta ao compartilhamento de carga entre os conversores em comparação com o método convencional de controle *droop*.

Em Xu, Sha e Liao (2015) o controle *droop* no modo de corrente é verificado para conversores com entrada de tensão em comum e saída operando em paralelo. Conversores com esse tipo de conexão são estáveis, mas não possuem bom compartilhamento de carga quando não são idênticos. O trabalho propõe o controle *droop* inverso para alcançar o compartilhamento de carga entre os conversores, uma vez que no controle *droop* convencional o aumento de carga na saída do conversor causa uma diminuição na tensão e da razão cíclica. Isso provoca um aumento de corrente contínuo, tornando o sistema instável. No controle *droop* inverso, ao invés de subtrair a diferença da queda de tensão causada pelo coeficiente *droop* em relação ao sinal de tensão de referência do conversor, neste controle soma-se a queda de tensão do controle *droop* na malha de controle de tensão. O controle *droop* inverso tem como resposta o aumento da tensão quando ocorre um acréscimo de demanda de carga, e, por consequência, o aumento da razão cíclica, o que causa uma diminuição da corrente. O controle estudado propõe a possibilidade de que após uma perturbação no barramento comum dos conversores seja possível que a tensão de saída de cada conversor retorne ao estado de tensão anterior à da perturbação.

No trabalho de Liu et al. (2015) é proposto um controle *droop* modificado consi-

derando a não desprezibilidade de resistências no cabo entre conversores conectados em paralelo em uma MR. Através de comunicação de baixa largura de banda são enviadas medições de tensão e corrente entre conversores adjacentes para a diminuição do tráfego de dados. Nesse método são utilizados três controladores: o primeiro controlador monitora a tensão de saída do conversor controlado e a tensão de saída do conversor adjacente; o segundo controlador monitora a potência de saída do conversor controlado e a potência de saída do conversor adjacente; o terceiro controlador funciona como um filtro passa-baixa e atua na velocidade da comunicação. Cada controlador calcula a média entre os parâmetros monitorados e envia para a malha de controle *droop* através de compensadores. Os resultados desse trabalho demonstraram que a estabilidade do sistema de controle proposto é bastante dependente da velocidade de comunicação e do coeficiente *droop*. Observa-se que maiores atrasos na comunicação e maior diferença entre coeficientes *droop* adotados em cada conversor tornam a malha de controle mais estável.

### 3.2.2 Controle linear com coeficiente *droop* variável

Conforme Shehata et al. (2019), para minimizar problemas de circulação de potência entre conversores em paralelo, deve-se fazer a mudança em tempo real do coeficiente *droop*, com a implementação de um algoritmo para a tomada de decisão do coeficiente *droop* baseada na diferença de compartilhamento de carga. Essa implementação deve considerar os parâmetros de tensão e corrente de saída dos conversores e também a resistência do cabo entre as cargas e cada conversor. A máxima diferença de corrente entre os conversores para o controle *droop* linear em baixa, média e alta carga foram respectivamente de 14%, 15,4%, 16,7%, utilizando do controle *droop* não linear proposto foram respectivamente de 1,76%, 2,6% e 6%. Os resultados demonstraram que a diferença do compartilhamento de carga e de tensão de saída entre os conversores em diferentes condições de cargas apresentaram respostas melhores no método proposto em relação à técnica de controle *droop* linear.

Em Chen et al. (2015), um controle *droop* não linear é proposto em função da corrente de saída do conversor. No referido estudo, buscou-se melhorar a relação da regulação de tensão e o compartilhamento de carga do controle *droop* linear avaliando o controle com resistência dos cabos não desprezíveis entre cargas e conversores. Os autores compararam a resposta da tensão da equação do controle *droop* convencional com a equação da parábola, parábola inversa e elipse em função da corrente. A função da parábola inversa é escolhida por apresentar um pequeno coeficiente *droop* em baixa demanda de carga e um coeficiente *droop* maior para uma alta demanda de carga. O controle proposto demonstrou capacidade de aumentar o valor do coeficiente *droop* com o aumento de carga, melhorando a regulação de tensão da técnica de controle *droop* linear.

No trabalho de Dragicevic et al. (2014) é proposto um controle *droop* não linear para controle em baterias em uma MR com geração eólica e fotovoltaica, um sistema *Flywheel* e baterias. A técnica de controle de *droop* não linear proposta atua na gestão dos SAE. O controle propõe que o coeficiente *droop* seja modificado de acordo com o estado de carga e a capacidade da bateria. Os autores utilizam uma equação exponencial em função do estado da carga do SAE. Uma comunicação de baixa largura de banda é utilizada para aquisição dos dados de estado de carga da bateria e tensão de saída dos equipamentos da MR. A tomada de decisão de carregamento ou descarregamento das baterias é realizada por um nível hierárquico maior e depende da demanda de potência na rede e da potência fornecida pela geração distribuída.

Em Prabhakaran, Goyal e Agarwal (2018)) são propostos algoritmos não lineares de coeficiente *droop* para reduzir os problemas de compartilhamento de carga e regulação de tensão entre conversores em uma MR com painéis fotovoltaicos, energia eólica e SAE. São propostos três cálculos de coeficiente *droop* não linear utilizando de equações do tipo polinomial em função da corrente e potência de saída dos conversores. O primeiro método é chamado de alto ganho de *droop* e tem a função de melhorar o compartilhamento de corrente para baixa demanda de cargas. Nesse método, o coeficiente *droop* é composto de funções lineares e não lineares. O segundo método é chamado de curva *droop* polinomial; nesse caso, o coeficiente *droop* está em função de coeficientes polinomiais, sendo essa técnica a mais balanceada entre regulação de tensão e compartilhamento de corrente. O último método proposto é chamado de curva *droop* polinomial com compensação de tensão, e tem a finalidade de melhorar o compartilhamento de corrente para uma alta demanda de cargas. Neste método, soma-se um desvio de tensão referente à comparação da tensão de referência e na malha de controle *droop*. Os métodos propostos pelo autor melhoraram significativamente os problemas inerentes do controle *droop* linear.

Em Lu, Sun et al. (2014) e Shafiee et al. (2014) foi proposto o cálculo do coeficiente *droop* não linear em função do estado de carga da bateria com a finalidade de equalizar SAE operando em paralelo. O controle *droop* não linear nesse trabalho utilizado é um controle *droop* adaptativo. O controle proposto possui duas equações que variam exponencialmente em função de um termo 'n' de acordo com a operação de carga e descarga da bateria, o SAE com maior estado de carga tende a fornecer mais potência, enquanto o SAE com menor estado de carga fornece menos potência, equalizando ambas as baterias. As equações do estado da carga da bateria são dependentes da capacidade máxima, eficiência e corrente de saída da bateria, e a velocidade da equalização das baterias pode ser controlada através do termo exponencial que depende da SoC. Foi verificado nos trabalhos que para um maior coeficiente n na equação de carga e descarga há um menor tempo de convergência da equalização entre os estados de carga das baterias e, conseqüentemente, maior fornecimento de

potência para as cargas. A eficiência do controlador é verificada com diferentes atrasos na comunicação do controle proposto, sendo que a partir de 200 ms a tensão de saída dos conversores começa a oscilar e em 500 ms o sistema se torna instável.

Segundo Marcelino et al. (2017), funções de compensação para o ajuste do coeficiente *droop* não linear em SAE são comparadas e analisadas em termos de velocidade da equalização das cargas e compartilhamento de carga em conversores operando em paralelo. As funções analisadas foram baseadas no modelo linear, potência, exponencial, seno hiperbólico e logarítmica, todas em função de um termo  $n$ . As funções de compensação da equação de potência e exponencial apresentaram os melhores resultados nas simulações, e o aumento do termo  $n$  (chamado no trabalho de fator de convergência) foi diretamente proporcional à velocidade de carga e descarga das baterias nas funções estudadas.

A equalização das cargas das baterias utilizadas em SAE também é encontrada em Zhang et al. (2021), utilizando da função do tipo arco tangente em função do estado de carga baterias para ajuste do coeficiente *droop* não linear. A função arco tangente pode variar entre 0 até 1, o que pode limitar a potência do equipamento. A tomada de decisão de balanceamento das baterias é com base no sentido da corrente. Se a saída de corrente é positiva, as baterias estão descarregando (coeficiente *droop* menor), e no caso de corrente positiva ocorre o carregamento (coeficiente *droop* maior). São propostos fatores de regulação chamados de  $p$  e  $n$ , que são adicionados na função arco tangente caso a dinâmica do estado de carga da bateria seja muito lenta. Utilizando a função arco tangente, o autor demonstra a possibilidade de utilizar a mesma equação para carregamento e descarregamento do SAE, e ainda atuar como limitador do coeficiente *droop* para controle na corrente de saída do conversor.

Com a finalidade de aumentar a vida útil de SAE, Gao et al. (2015) propõem um controle *droop* não linear para reduzir a atuação da bateria em uma faixa de tensão definida. A tensão nominal de saída do conversor nesse trabalho foi definida em 270 V, sendo a faixa inferior da zona ociosa da bateria em até 250 V e a faixa superior ociosa da bateria em até 280 V. Nesse trabalho o conversor atua como uma fonte de corrente, a tensão é o parâmetro de entrada e a corrente é o parâmetro de saída da malha do controle *droop* (controle *droop* I-V). O controle proposto tem comportamento resultante semelhante do controle *droop* linear, com o conversor atuando como fonte de tensão. Nesse método, a corrente controlada pelo conversor depende do coeficiente *droop* e da diferença de tensão entre a tensão definida no barramento comum e a tensão real. Com auxílio de um controle secundário, as tensões de saída das baterias são medidas, e o controle *droop* é acionado para a operação de descarregamento para tensão acima de 280 V e para a operação de carregamento para tensão abaixo de 250 V. Com o controle proposto, é possível impedir repetições desnecessárias de

carregamento e descarregamento do SAE para variações pequenas de tensão de saída do conversor e aumentar a vida útil de baterias e garantir o compartilhamento de carga entre conversores.

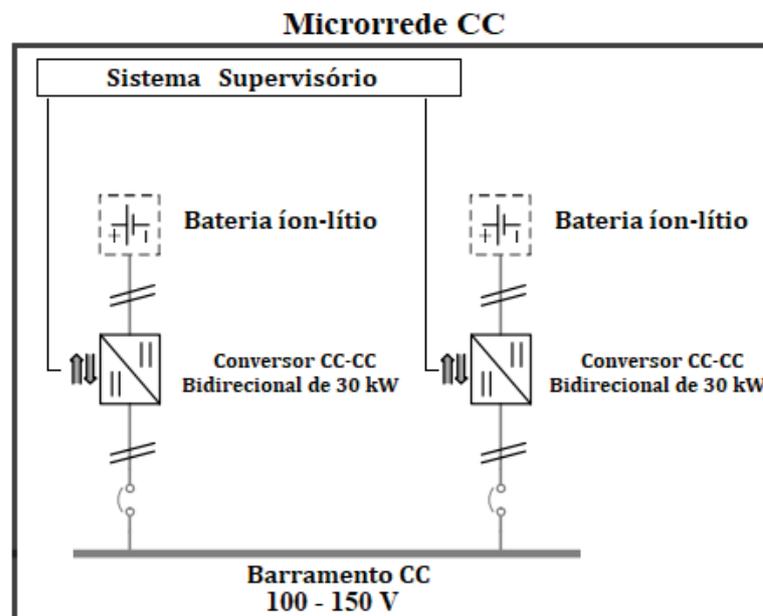
## 4 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO DE MICRORREDES

Neste capítulo, foi realizada a análise dos equipamentos presentes no laboratório, com base na leitura dos manuais técnicos e na experiência prévia dos integrantes do grupo de pesquisa. Foram descritos os equipamentos instalados na MR, com ênfase no funcionamento das malhas internas de controle dos conversores, sistemas de armazenamento de energia, conversores de potência, controlador lógico programável e seus periféricos. Por fim, foi apresentado o sistema de comunicação desenvolvido durante a dissertação, que conecta os equipamentos presentes na MR.

### 4.1 MICRORREDE CC

A MR que está sendo analisada está instalada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ela é composta por uma rede CC, formada por conversores de potência e dois SAE. A Figura 24 ilustra essa configuração.

FIGURA 24 – Barramento da microrrede CC - DELT



Fonte: O autor (2022)

A rede CC tem um barramento comum com tensão nominal máxima entre 100 e 150 V e é conectada a dois conversores CC-CC estáticos bidirecionais de potência de 30 kW, que estão ligados a diferentes SAEs. O SAE é composto por baterias de íon-lítio.

Além disso, o sistema supervisorio é responsável pela supervisão e aquisição de dados de todos os equipamentos presentes na MR CC.

#### 4.2 CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL 30KW

O conversor SINAMICS DCP é um equipamento bidirecional CC-CC de 30 kW fabricado pela Siemens. Ele pode ser operado como elevador ou abaixador de tensão e sua principal função na microrrede proposta é controlar a potência do SAE e regular a tensão da rede CC.

O conversor é capaz de controlar o fluxo de potência em ambos os sentidos, permitindo que a energia flua da bateria para a rede ou vice-versa. Como o conversor opera em quatro quadrantes, é possível que a tensão de saída seja menor ou maior que a tensão de entrada.

Ambos os conversores CC-CC apresentam parâmetros de funcionamento e operação idênticos, a Figura 25 apresenta os equipamentos.

FIGURA 25 – Conversor SINAMICS DCP 30 kW

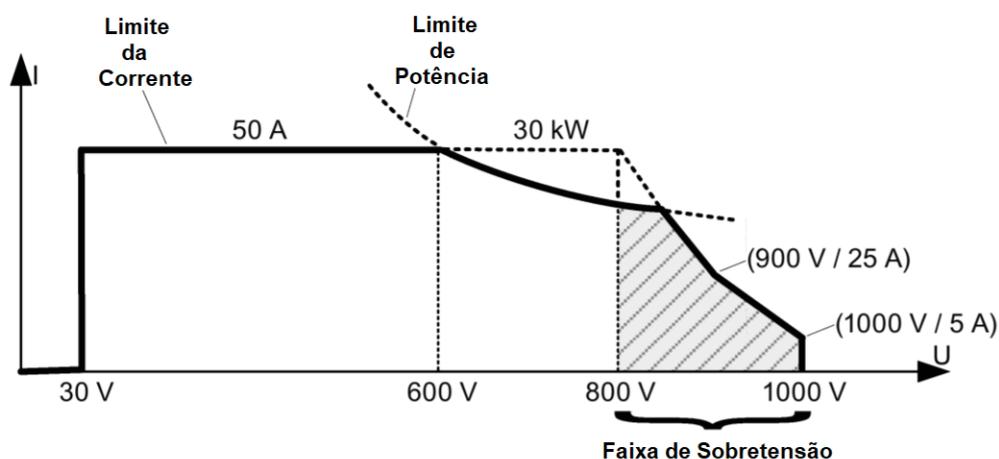


Fonte: O autor (2022)

A tensão mínima de operação do conversor é de 30 V e a máxima é de 600 V para uma corrente de fornecimento de 50 A. O conversor pode operar em uma faixa de sobretensão, permitindo que a tensão seja mantida entre 600 V e 800 V, com uma capacidade de corrente reduzida.

Por até 30 segundos, é possível manter as tensões na faixa de 800 V até 1000 V para demandas de cargas pequenas. A partir de 30 kW de potência, a corrente é reduzida em uma taxa maior que o aumento de tensão. Os respectivos limites de potência mencionados anteriormente são apresentados graficamente na Figura 26.

FIGURA 26 – Curva característica corrente-tensão do SINAMICS DCP 30kW



Fonte: Adaptado de Siemens (2016)

Na Tabela 8 são apresentados os principais parâmetros do conversor CC-CC bidirecional 30kW:

TABELA 8 – Parâmetros do Conversor CC-CC Bidirecional 30kW

Características do conversor CC	
Potência	30.000 W
Tensão de entrada	MÁX: 800 V MÍN: 30 V
Tensão de saída	MÁX: 800 V
Corrente	MÁX: 50 A
Ondulação de Corrente	< 3 %

Fonte: Adaptado de Siemens (2016)

Em relação ao sistema de controle, o equipamento possui dois tipos: controle de malha fechada de tensão e controle de malha fechada de corrente.

#### 4.2.1 Comissionamento e Operação das Malhas de controle do Conversor SINAMICS DCP

No Apêndice A, são apresentados os detalhes da comunicação e dos parâmetros de funcionamento do conversor, bem como o funcionamento detalhado das malhas de controle de tensão e corrente.

Os principais parâmetros de operação utilizados no presente trabalho podem ser encontrados no Apêndice B.

Em geral, ambas as malhas de controle utilizam um controlador PI, com parâmetros de ganho proporcional e tempo integral. Para todos os experimentos, foram mantidas as condições iniciais de fábrica, com os seguintes parâmetros:

TABELA 9 – Parâmetros fixos das malhas de controle interna de tensão e corrente

Parâmetro	Valor
Kp - ganho proporcional	2000
Tn - tempo integral	0,3 ms

Fonte: O autor (2022)

### 4.3 BATERIA DE ÍON-LÍTIO

As baterias utilizadas no SAE são compostas de óxido de lítio-níquel-cobalto alumínio ( $LiNiCoAlO_2$ ). Cada célula possui diâmetro de 21,1 mm e comprimento de 70,6 mm, sendo chamadas comercialmente de baterias de modelo 21700.

O modelo de bateria 21700 foi projetado para substituir as baterias do modelo 18650 na aplicação de SAE em veículos elétricos pela sua maior capacidade. Os parâmetros da célula de íon de lítio podem ser verificados na Tabela 10.

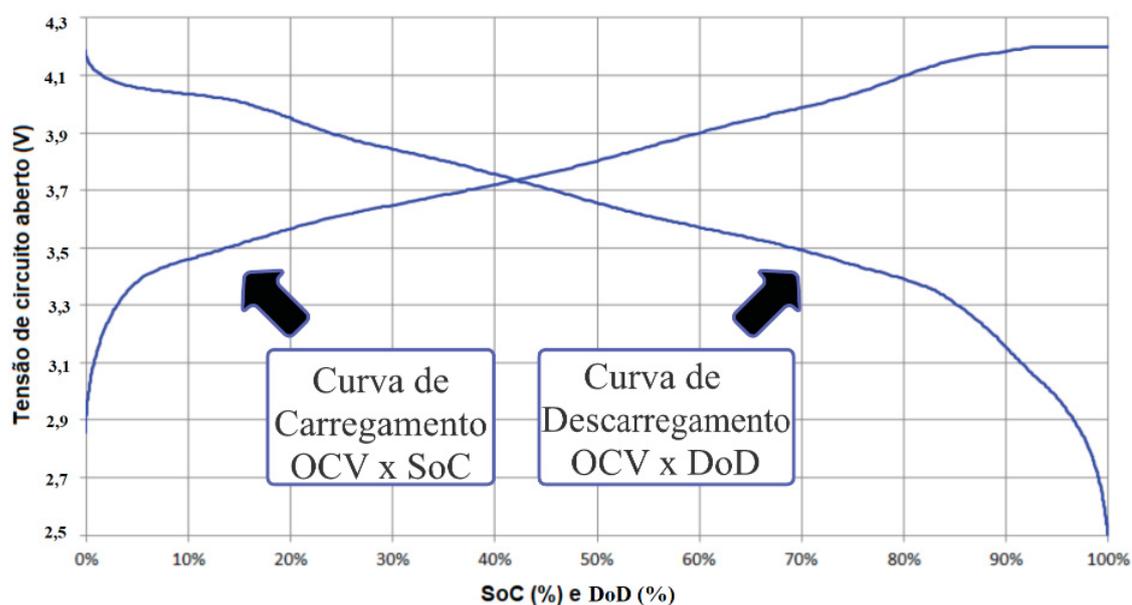
TABELA 10 – Parâmetros das células de íon-lítio utilizados no SAE

Parâmetros da Simulação do SAE	
Tensão nominal	3,63 V
Tensão de carga	4,2 V
Tensão de mínima	2,5 V
Capacidade de descarga	4.900 mAh
Capacidade de carga	4.753 mAh

Fonte: Adaptado de Samsung (2018)

A curva  $OCV \times SoC$  é bastante plana para baterias compostas de lítio, quando comparadas com baterias de composição diferente, o que significa que um pequeno erro na medição do  $OCV$  causará um maior erro de estimativa da  $SoC$  da bateria. A tensão em circuito aberto da bateria utilizada no SAE em função da curva de descarga e de carga é apresentada na Figura 27.

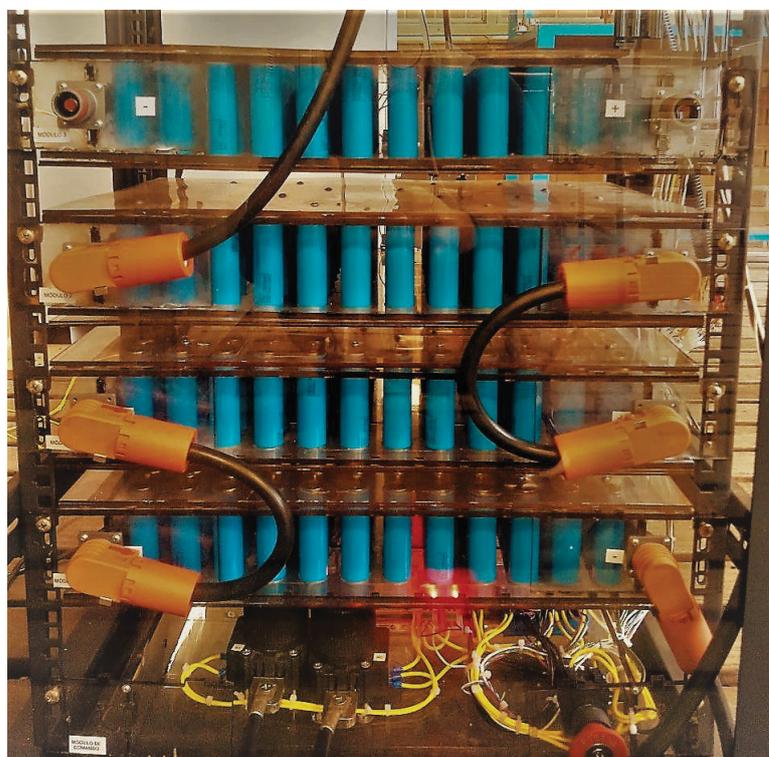
FIGURA 27 – Curvas da bateria de modelo 21700



Fonte: Adaptado de Samsung (2018)

Foram utilizados dois SAE constituídos de doze células do modelo 21700 em série e oito conjuntos de células em paralelo, totalizando a capacidade de cerca de 40 Ah e tensão nominal de 50,4 V. Na Figura 28 é apresentado o SAE de íon-lítio.

FIGURA 28 – SAE de íon-lítio



Fonte: O autor (2022)

#### 4.4 CONTROLADOR SIMATIC S7-1515-2 PN

O controlador lógico programável (CLP) é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais. Nesta dissertação foi utilizado o controlador da série SIMATIC S7-1500, do fabricante SIEMENS.

O controlador programável tem como principais componentes uma fonte de alimentação, a unidade central de processamento, um módulo de entrada digital e um módulo de saída digital, como pode ser visto na Figura 29.

FIGURA 29 – Controlador lógico programável: SIMATIC S7-1515-2 PN



Fonte: O autor (2022)

A operação dos equipamentos foi configurada no software de integração TIA Portal via programação em ladder no controlador S7-1515, o software auxilia para programação do CLP e o software WinCC para programação da IHM. A Tabela 11 apresenta as especificações técnicas do controlador e seus periféricos utilizados.

TABELA 11 – Especificações técnicas do controlador e seus periféricos

MÓDULO	MODELO	CARACTERÍSTICAS GERAIS
CPU	6ES7 515-2AM01-0AB0	CPU com display; memória de trabalho de dados de 5 MB;
FONTE	6ES7 507-0RA00-0AB0	Potência 60 W, 120/230 V CA;
ENTRADA DIGITAL	6ES7 521-1BH00-0AB0	Modulo de entrada digital DI 16x24V CC/1A HF 16 entradas digitais 2 entradas com operação de contadores Atraso de entrada 0,05 ms até 20 ms
SAÍDA DIGITAL	6ES7 522-1BF00-0AB0	Modulo de saída digital DQ 8x24V CC/2A HF 8 saídas digitais 2 canais para modulação de largura de pulso (PWM)

Fonte: O autor (2022)

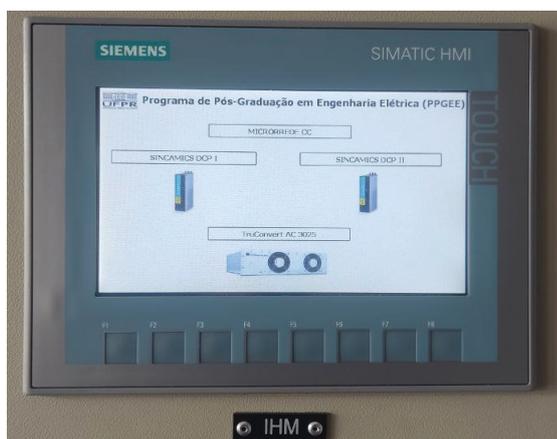
#### 4.5 IHM — INTERFACE HOMEM MÁQUINA

A Interface Homem Máquina (IHM) é a tradução do termo *Human Machine Interface*. Como o próprio nome diz, é uma interface gráfica que permite ao operador

interagir com a máquina. Ele possibilita a supervisão, o controle e a aquisição de dados de todo o sistema.

A Figura 30 apresenta a tela principal da IHM para seleção do equipamento e, posteriormente, qual estratégia de controle será implementada.

FIGURA 30 – IHM com o supervisório desenvolvido



Fonte: O autor (2022)

O IHM permite que o operador da MR possa modificar em tempo real os parâmetros dos equipamentos na microrrede, e visualmente verificar os dados monitorados através do controlador. Ela foi utilizada para testar as estratégias de controle durante a operação da microrrede, o que permitiu programar a entrada e saída de cargas para gerar degraus de carga na rede.

São exemplos de funcionalidade apresentadas na IHM a modificação do coeficiente *droop* para cada cenário proposto, bem como os parâmetros de comissionamento dos conversores e a verificação visual das formas de onda de corrente e tensão durante a operação.

#### 4.6 REDE DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE DA MICRORREDE C.C.

Os componentes da MR foram divididos em três grupos. O primeiro grupo representado pelo SAE está as duas baterias de íons de lítio. O segundo grupo apresenta o sistema supervisório implementado no controlador, a IHM e seus periféricos. O terceiro grupo apresenta o controle de tensão, que corresponde aos próprios conversores CC-CC.

Para estabelecimento de comunicação entre o conversor CC-CC e o controlador SIMATIC S7-1515, é utilizado o protocolo PROFINET I/O (*Input/Output*) na camada de aplicação e o protocolo TCP/IP na camada de rede. A rede PROFINET I/O utiliza a transferência cíclica de dados para a comunicação. A norma que regulamenta o PROFINET é a IEC61158-5 e IEC61158-6.

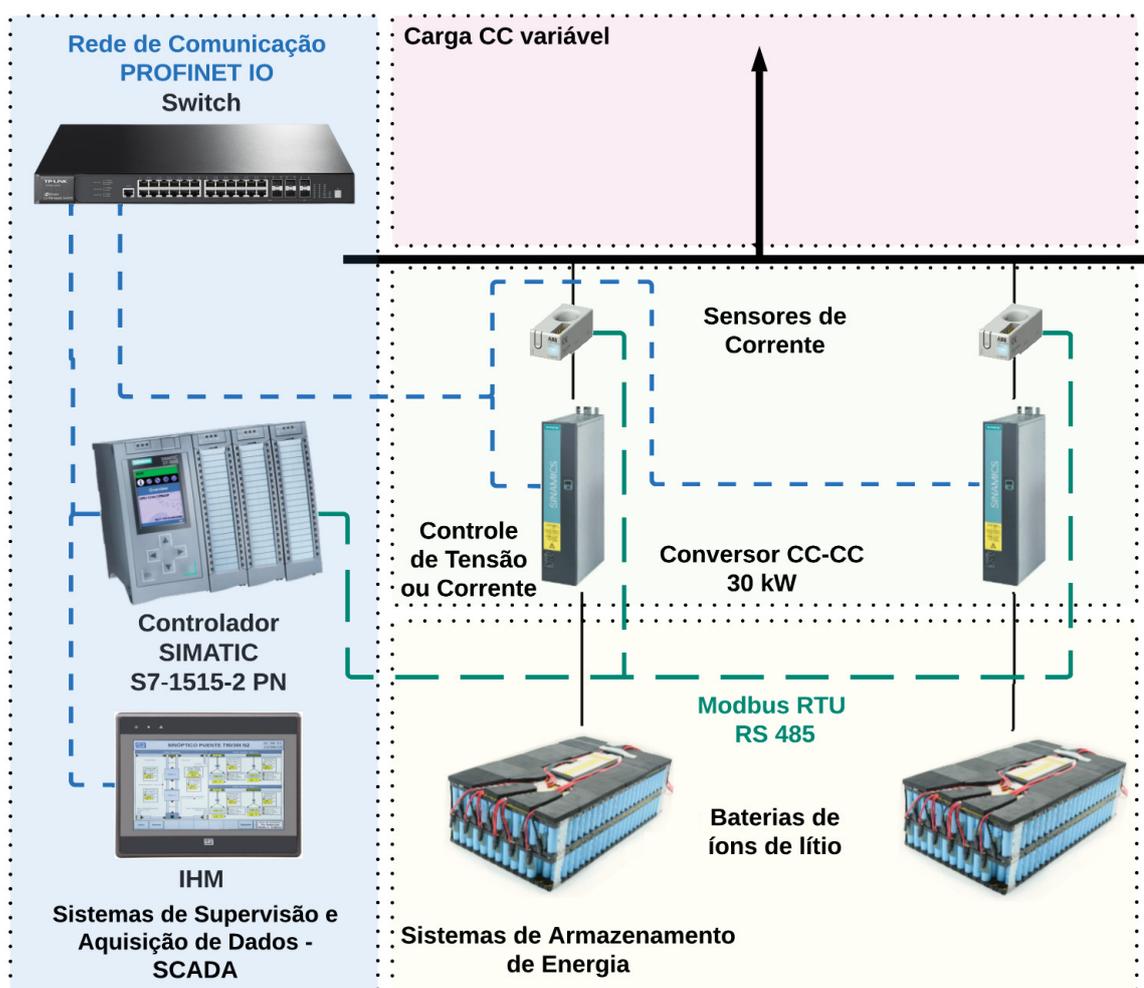
Os módulos do sistema I/O têm a função de organizar e controlar o fluxo de dados produzidos por sistemas em tempo real, faz parte dele o controlador I/O que representa o equipamento SIMATIC S7-1515 e o dispositivo I/O que são os elementos controlados na planta, representados pelos conversores SINAMICS DCP.

O controlador I/O e o dispositivo I/O devem ter uma estrutura de dados pre-concebida que será compartilhada. Em ambos os sistemas são organizados e contêm módulos com um número limitado de conexões, que para o conversor utilizado foi denominado de telegrama.

O controlador SIMATIC S7-1515 atua como intermediário entre a comunicação do IHM e dos conversores CC-CC, suas principais funções estão no monitoramento, como base de dados e os comandos de controle dos equipamentos na MR.

A Figura 31 apresenta o diagrama esquemático da comunicação e conexão elétrica dos componentes da MR CC de cada grupo, conforme explicado anteriormente.

FIGURA 31 – Diagrama esquemático da comunicação e conexão elétrica



Fonte: O autor (2022)

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E COMISSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e metodologias utilizadas das estratégias de controle implementadas no CLP para funcionamento da MR através dos conversores CC. No primeiro cenário (seção 5.1) foi avaliado o controle *droop* interno do conversor operando como FT, e, de maneira análoga, no segundo cenário (seção 5.2) o controle *droop* externo implementado no CLP. Em seguida, no terceiro cenário (seção 5.3) foram verificados os controles *droop* interno e externo funcionando concomitantemente.

No quarto cenário (seção 5.4) foi desenvolvido o controle *droop* externo no controlador para o conversor operando como FC. No quinto cenário (seção 5.5) propõe-se que os conversores operem em paralelo no modo FT com o controle *droop* externo e o último cenário (seção 5.6) se refere aos conversores atuando um como FT e o outro como FC, com ambos utilizando a malha de controle *droop* de seu respectivo modo de operação.

Nos cenários, foram utilizadas tensões de 150 V ou de 100 V devido à limitação de potência das cargas no barramento CC. Essa restrição exigiu a adaptação da tensão fornecida às demandas específicas dos dispositivos conectados.

### 5.1 CENÁRIO I - CONTROLE *DROOP* INTERNO: FONTE DE TENSÃO

No primeiro cenário foi realizada a validação do comissionamento do conversor e o funcionamento do controle de malha fechada de tensão em conjunto com o controle *droop* do conversor CC-CC. O controle *droop* interno à malha de controle de tensão do conversor será chamado adiante de *droop* interno.

O controle proporcional integral do conversor CC-CC possui o sinal p54127, denominado de ganho estático. O sinal é equivalente ao coeficiente *droop*, sendo possível aplicar a técnica sem a necessidade de um controle externo.

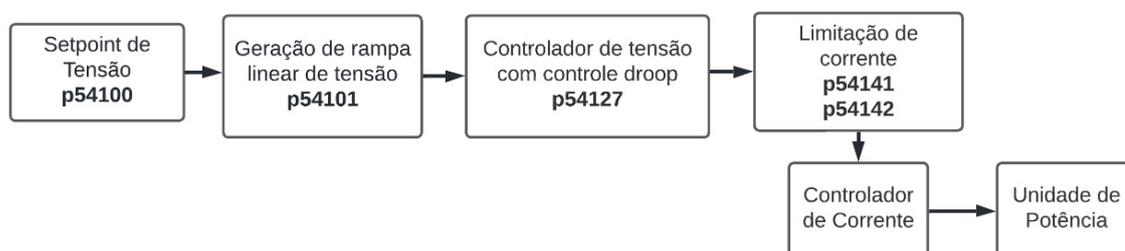
O coeficiente *droop* máximo do equipamento é baseado na corrente e tensão nominal de operação do equipamento e pode ser calculada como:

$$R_{d_m} = \frac{600 \text{ V}}{50 \text{ A}} = 12 \Omega \quad (5.1)$$

O coeficiente *droop* máximo do equipamento é de 12  $\Omega$ . Existe a possibilidade de definir diretamente o *droop* de tensão com o sinal p54127. Nesse caso, pode-se ajustar a máxima variação de tensão na saída do conversor diretamente. Esse sinal pode variar entre 0% até 20% em relação ao coeficiente *droop* máximo.

A Figura 32 apresenta a malha fechada de tensão simplificada e os sinais envolvidos no primeiro cenário.

FIGURA 32 – Malha fechada de controle de tensão simplificada do conversor SINAMICS DCP 30kW



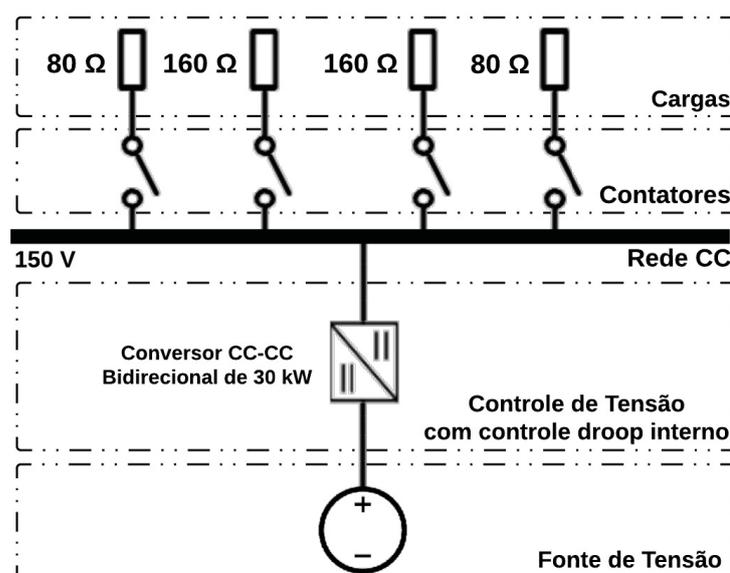
Fonte: O autor (2022)

Através do software proprietário da SIEMENS chamado de STARTER é possível modificar manualmente o sinal p54127, que se refere, como dito anteriormente, ao coeficiente *droop* do controle interno. Maiores detalhes do comissionamento dos conversores para o modo FT podem ser encontrados na seção A.2 do Apêndice A.

Para aferir o coeficiente *droop* do equipamento em diferentes condições de carga, foi utilizada a associação de resistores de potência em paralelo, simulando a entrada e saída de cargas no barramento CC da MR.

No primeiro cenário é validado o controle *droop* interno, a Figura 33 apresenta o diagrama de conexão dos equipamentos para o primeiro cenário proposto.

FIGURA 33 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário I



Fonte: O autor (2022)

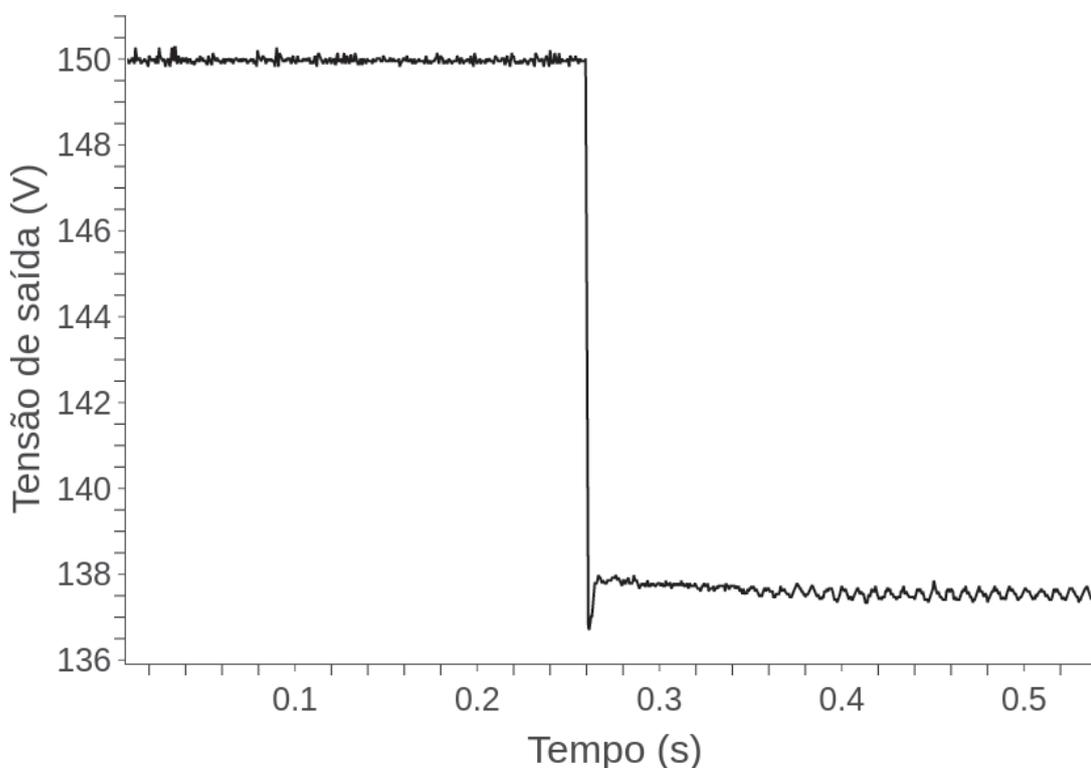
O conversor é comissionado no modo FT com tensão de saída de 150 V para a condição sem carga, e coeficiente *droop* de 20% que representa o coeficiente *droop* de 2,4 Ω na saída do conversor.

### 5.1.1 Degrau de carga - Cenário I

Devido ao tempo de transporte dos dados entre o CLP e o conversor, a atuação do controle não é instantânea e existe um intervalo de tempo que representa a ociosidade do controlador após a mudança de tensão na saída do conversor durante a entrada das cargas na rede.

Para a verificação da resposta do controle para um degraude carga, os contadores que estão conectados em série com as cargas apresentadas na Figura 33 são fechados no mesmo instante. A Figura 34 apresenta o resultado da queda de tensão na saída do conversor para o controle *droop* interno.

FIGURA 34 – Degrau de carga para o *droop* interno (2,4  $\Omega$ ) - Cenário I



Fonte: O autor (2022)

Durante o degraude carga foi verificado um tempo de transporte de 2 milissegundos, e um tempo de estabilização de 3 milissegundos para uma tensão média de 137,80 V.

Em um segundo experimento, para a mesma condição de tensão de saída, as cargas são acopladas na rede em sequência, com intervalos de 5 segundos. A primeira carga acoplada à rede é de 80  $\Omega$ , e consecutivamente são acopladas as cargas de 160  $\Omega$ , 160  $\Omega$  e 80  $\Omega$ , conforme a ordem apresentada na Figura 33. O mesmo ensaio é realizado para diferentes coeficientes *droop* (2,4  $\Omega$ , 1,8  $\Omega$ , 1,2  $\Omega$ , 0,6  $\Omega$  e 0  $\Omega$ ).

A comparação dos resultados é realizada medindo a regulação de tensão na

saída do conversor ( $\Delta v$ ), a corrente média ( $I_m$ ) e o coeficiente *droop* interno ( $R_{d_{int}}$ ) calculado com base na queda de tensão e da corrente de saída do conversor, ( $R_{dp}$ ) representa o coeficiente *droop* parametrizado no equipamento.

A queda de tensão na rede é calculada baseada na diferença da tensão média de entrada à vazio e a carga admitida na rede, a corrente média é calculada em relação a média aritmética dos valores de corrente em um determinado período. Os parâmetros utilizados no conversor referentes ao primeiro cenário são indicados na Tabela 12.

TABELA 12 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário I

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída	150 V
Coeficiente <i>droop</i> Interno ( $R_{d_{int}}$ )	20% (2,4 $\Omega$ ) - 15% ( 1,8 $\Omega$ ) - 10% (1,2 $\Omega$ ) - 5% (0,6 $\Omega$ ) - 0% (0 $\Omega$ )

Fonte: O autor (2022)

### 5.1.2 Resultados do Cenário I

Está seção apresenta os resultados quantitativos e gráficos da curva de tensão, da curva de corrente e do coeficiente *droop* durante os degraus de carga utilizando o controle *droop* interno.

São medidos e calculados os parâmetros para o conversor com o coeficiente *droop* igual a 0  $\Omega$ , 0,6  $\Omega$ , 1,2  $\Omega$ , 1,8  $\Omega$  e 2,4  $\Omega$  apresentados respectivamente na Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16.

A corrente média ( $I_m$ ) é convencionalmente medida no sentido negativo quando flui das baterias para as cargas. Com o aumento das cargas ( $R_{carga}$ ) durante os degraus de carga é observado o aumento da queda de tensão ( $\Delta v$ ).

TABELA 13 – Resultados para o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}} = 0 \Omega$ ) - Cenário I

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{int}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 5 s	0 V	0 A	-	-	-
5 s  — 10 s	0 V	-1,8022 A	0 $\Omega$	0 $\Omega$	80 $\Omega$
10 s  — 15 s	0 V	-2,9084 A	0 $\Omega$	0 $\Omega$	53,33 $\Omega$
15 s  — 20 s	0 V	-3,8621 A	0 $\Omega$	0 $\Omega$	40 $\Omega$
20 s  — 25 s	0 V	-5,6069 A	0 $\Omega$	0 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 14 – Resultados para o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário I

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{int}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 5 s	0 V	0 A	-	-	-
5 s  — 10 s	1,0771 V	-1,7664 A	0,6097 $\Omega$	0,6 $\Omega$	80 $\Omega$
10 s  — 15 s	1,7473 V	-2,8813 A	0,6064 $\Omega$	0,6 $\Omega$	53,33 $\Omega$
15 s  — 20 s	2,3026 V	-3,8065 A	0,6049 $\Omega$	0,6 $\Omega$	40 $\Omega$
20 s  — 25 s	3,2920 V	-5,4551 A	0,6034 $\Omega$	0,6 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 15 – Resultados para o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário I

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{int}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 5 s	0 V	0 A	-	-	-
5 s  — 10 s	2.10777 V	-1,73066 A	1,2179 $\Omega$	1,2 $\Omega$	80 $\Omega$
10 s  — 15 s	3,44362 V	-2,84595 A	1,2100 $\Omega$	1,2 $\Omega$	53,33 $\Omega$
15 s  — 20 s	4,53589 V	-3,74952 A	1,2097 $\Omega$	1,2 $\Omega$	40 $\Omega$
20 s  — 25 s	6,37044 V	-5,2838 A	1,2056 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 16 – Resultados para o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário I

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{int}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 5 s	0 V	0 A	-	-	-
5 s  — 10 s	3,2495 V	- 1,7892 A	1,8161 $\Omega$	1,8 $\Omega$	80 $\Omega$
10 s  — 15 s	5,0928 V	-2,8131 A	1,8103 $\Omega$	1,8 $\Omega$	53,33 $\Omega$
15 s  — 20 s	6,6857 V	-3,7000 A	1,8069 $\Omega$	1,8 $\Omega$	40 $\Omega$
20 s  — 25 s	9,3569 V	-5,1817 A	1,8057 $\Omega$	1,8 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 17 – Resultados para o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário I

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{int}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 5 s	0 V	0 A	-	-	-
5 s  — 10 s	4,1341 V	-1,7023 A	2,4284 $\Omega$	2,4 $\Omega$	80 $\Omega$
10 s  — 15 s	6,7269 V	-2,7834 A	2,4167 $\Omega$	2,4 $\Omega$	53,33 $\Omega$
15 s  — 20 s	8,80298 V	-3,6469 A	2,4137 $\Omega$	2,4 $\Omega$	40 $\Omega$
20 s  — 25 s	12,3241 V	-5,1160 A	2,4089 $\Omega$	2,4 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

Como pode ser verificado nas tabelas de resultados do controle *droop* interno, o coeficiente *droop* parametrizado apresentado na coluna ( $R_{dp}$ ) é próximo do coeficiente *droop* interno medido apresentado na coluna ( $R_{d_{int}}$ ), afere-se assim a precisão do coeficiente *droop* já estabelecido no equipamento de fábrica.

O perfil de onda de tensão e corrente de saída do conversor e a curva do coeficiente *droop* medido em cada degrau de carga podem ser visualizados na Figura 35, Figura 36 e Figura 37, respectivamente.

FIGURA 35 – Corrente x Tempo - Cenário I

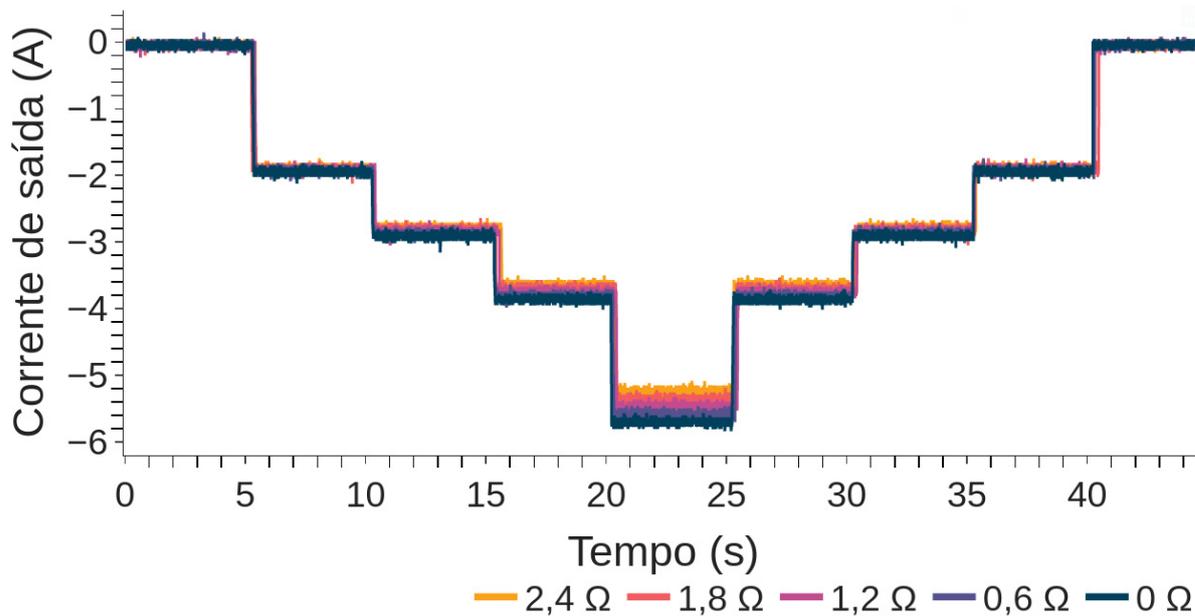


FIGURA 36 – Tensão x Tempo - Cenário I

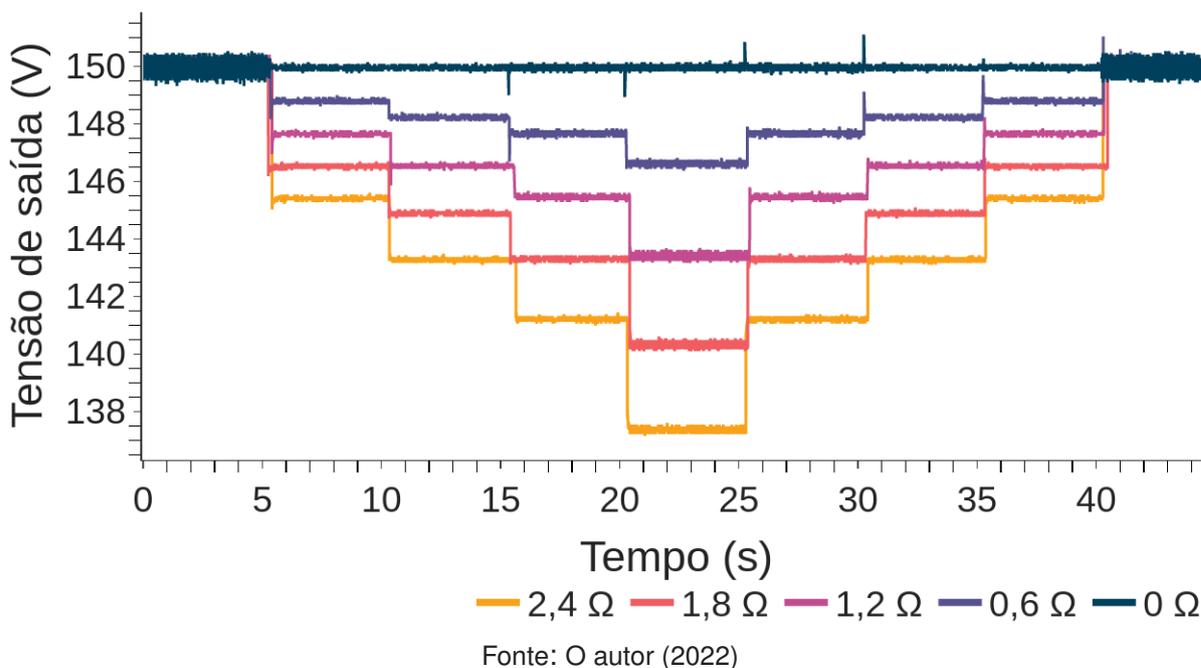
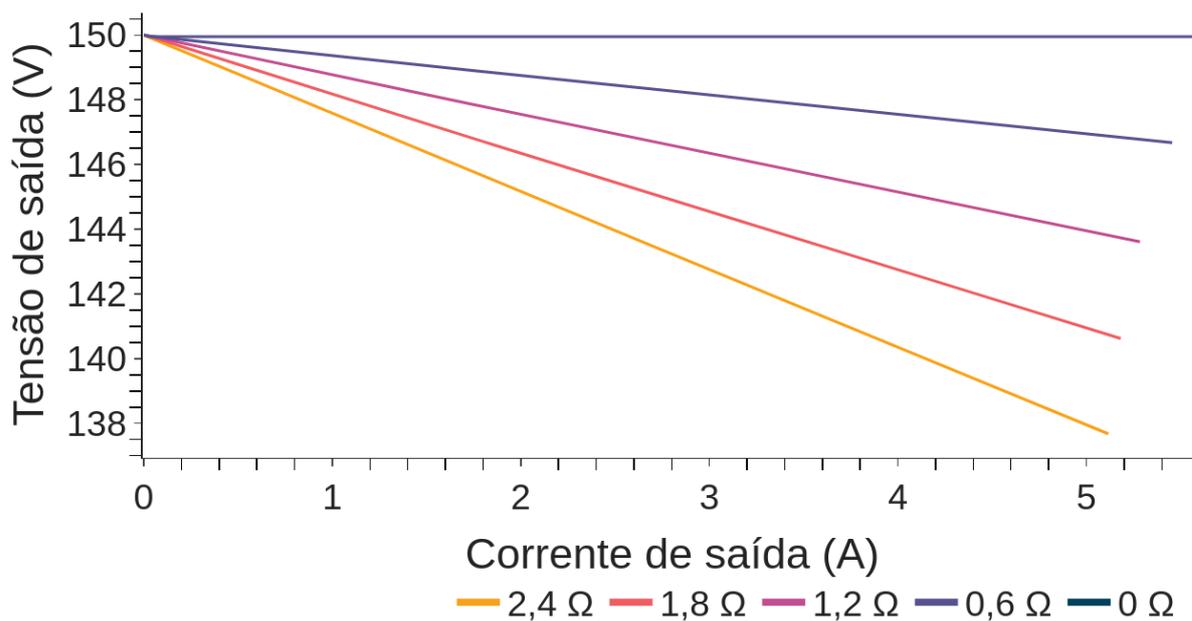


FIGURA 37 – Tensão x Corrente - Cenário I



Fonte: O autor (2022)

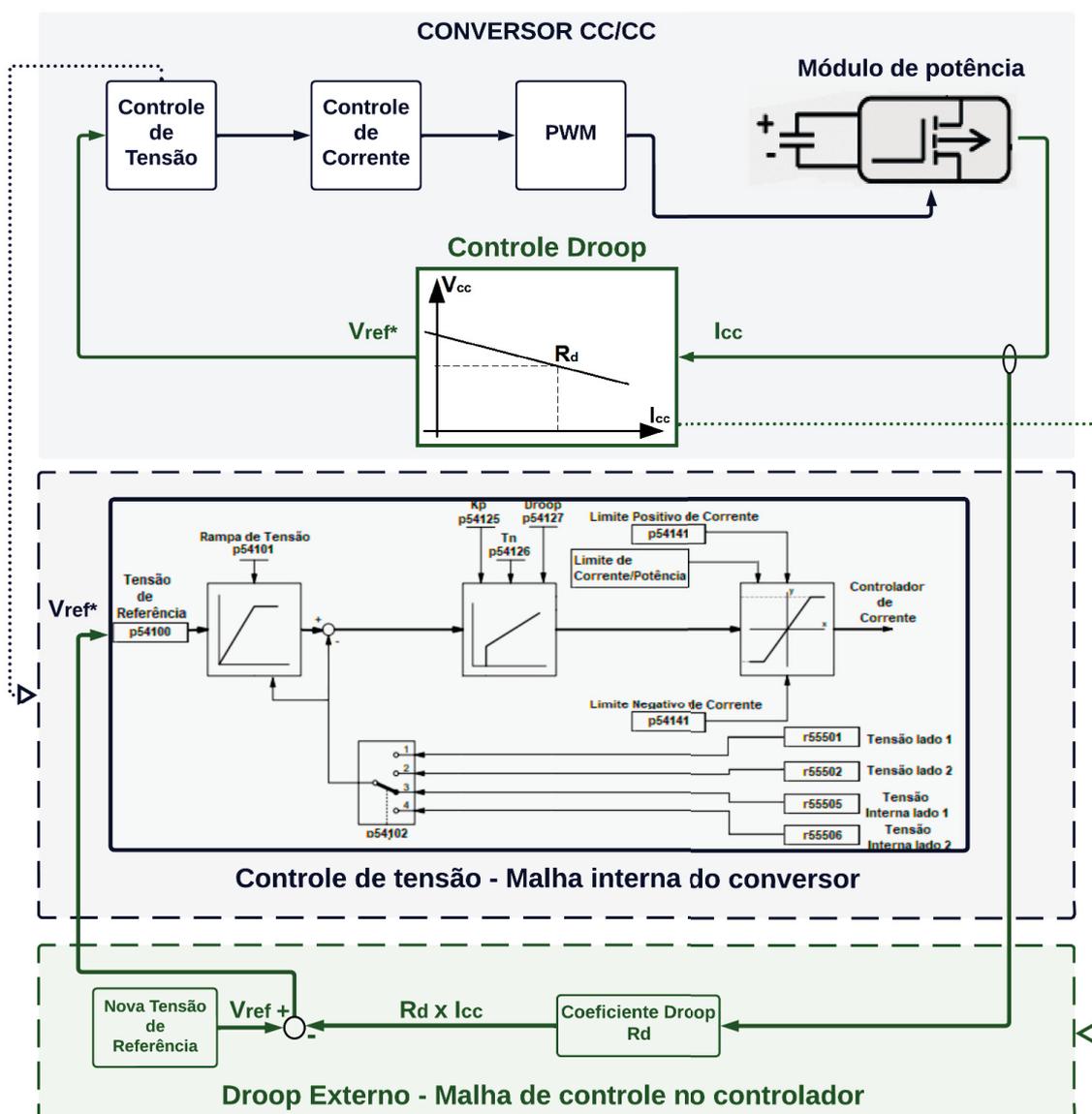
## 5.2 CENÁRIO II - CONTROLE DROOP EXTERNO: FONTE DE TENSÃO

O software STARTER utilizado para o comissionamento do conversor e do controle *droop* interno no cenário I, não permite a modificação do coeficiente *droop* em tempo real e também limita o parâmetro entre a faixa de 0% até 20%.

Diante disso, foi implementado um controle *droop* externo ao equipamento por meio de um CLP, permitindo modificações durante a operação por meio do sistema supervisor. É importante ressaltar que o conversor, operando como FT, possui um controle de tensão em cascata com o controle de corrente. Além disso, o sinal de saída da equação 2.3 do controle *droop* de tensão é utilizado como a nova referência de tensão.

O controle *droop* externo é implementado de modo que o sinal de tensão de saída da malha de controle *droop* seja enviado para a malha de controle de tensão do equipamento. O controle proposto pode ser verificado na Figura 38.

FIGURA 38 – Diagrama de controle: droop externo para fonte de tensão



Fonte: O autor (2022)

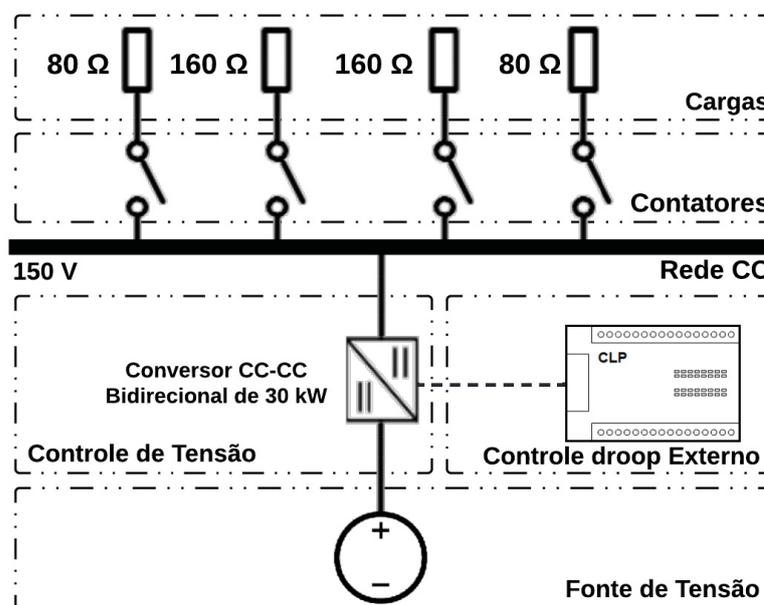
A corrente de saída do conversor  $I_{cc}$  é medida e enviada para o CLP, em seguida é multiplicada pelo coeficiente *droop*  $R_d$ , a tensão de referência  $V_{ref}$  definida no supervisor é comparada com a queda de tensão originada do coeficiente *droop*.

O CLP envia o sinal resultante da comparação como uma nova tensão de referência  $V_{ref}^*$  para a malha de controle de tensão, o sinal de saída da malha de tensão é enviado para o controle de corrente e em seguida para a unidade de potência em sinal de PWM.

Para verificar a resposta do conversor e a precisão do controle do coeficiente *droop* implementado no CLP para diferentes condições de carga foi utilizada a associação de resistores de potência em paralelo, simulando a entrada e saída de cargas no barramento CC da MR.

Para o segundo cenário é validado o controle *droop* externo. Nesse cenário também foi utilizado apenas um conversor de potência. A Figura 39 apresenta o diagrama de conexão dos equipamentos para o segundo cenário proposto.

FIGURA 39 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário II

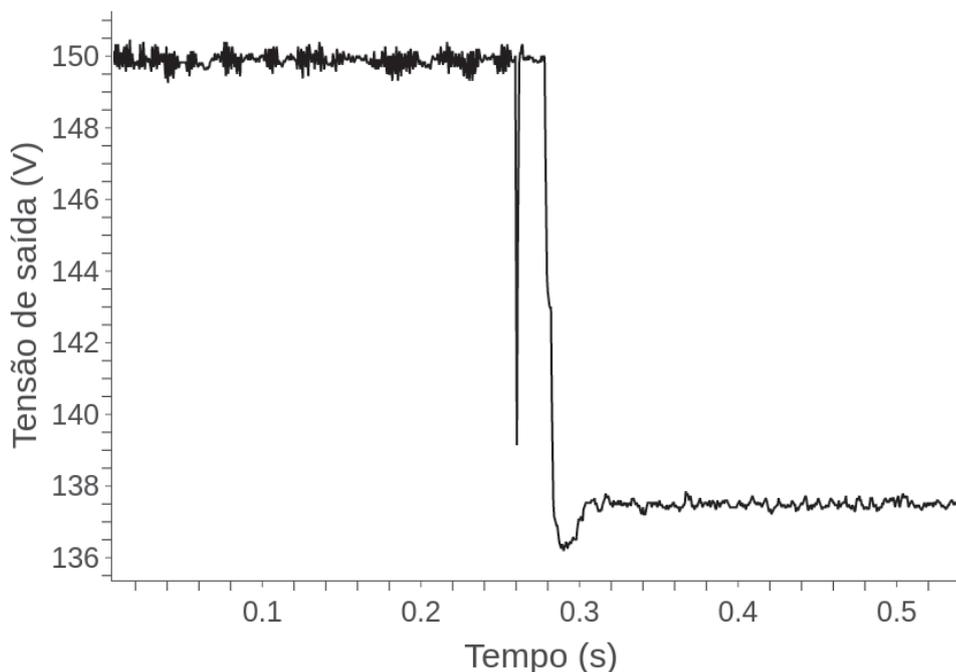


Fonte: O autor (2022)

Nesse cenário, o conversor é comissionado no modo FT com o controle *droop* interno ( $R_{d_{int}}$ ) nulo. Assim, são validados os valores de coeficiente *droop* anteriores no controle externo. Inicialmente, é selecionada a tensão de saída de 150 V a vazio; o coeficiente *droop* escolhido foi de 2,4 Ω.

### 5.2.1 Degrau de carga - Cenário II

Para verificação da resposta do controle para um degraú de carga os contatores conectados em série nas cargas da Figura 39 são fechados no mesmo instante. A Figura 40 apresenta o resultado da queda de tensão na saída do conversor para o conversor operando com o controle *droop* externo.

FIGURA 40 – Degrau de carga para o *droop* externo (2,4  $\Omega$ ) - Cenário II

Fonte: O autor (2022)

Durante o decaimento de carga foi verificado um atraso no transporte de 30,5 milissegundos, e um tempo de estabilização de 14 milissegundos para uma tensão média de 137,47 V.

Em um segundo experimento, para a mesma condição de tensão de saída, as cargas são acopladas na rede em sequência, com intervalos de 10 segundos. A primeira carga acoplada à rede é de 80  $\Omega$ , e consecutivamente são acopladas as cargas de 160  $\Omega$ , 160  $\Omega$  e 80  $\Omega$ , conforme a ordem apresentada na Figura 33. O mesmo ensaio é realizado para diferentes coeficientes *droop* (2,4  $\Omega$ , 1,8  $\Omega$ , 1,2  $\Omega$ , 0,6  $\Omega$ ).

Os parâmetros utilizados no conversor referentes ao segundo cenário são indicados na Tabela 18 abaixo:

TABELA 18 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário II

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída	150 V
Coefficiente <i>droop</i> externo ( $R_{d_{ext}}$ )	(2,4 $\Omega$ ) - ( 1,8 $\Omega$ ) - (1,2 $\Omega$ ) - (0,6 $\Omega$ )

Fonte: O autor (2022)

### 5.2.2 Resultados do Cenário II

Esta seção apresenta os resultados quantitativos e gráficos da curva de tensão, da curva de corrente e do coeficiente *droop* durante os degraus de carga utilizando o controle *droop* externo.

Os parâmetros são medidos e calculados para o conversor com os coeficientes *droop* de  $0,6 \Omega$ ,  $1,2 \Omega$ ,  $1,8 \Omega$  e  $2,4 \Omega$ , os quais são apresentados respectivamente na Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22.

A corrente média ( $I_m$ ) também foi convencionalmente medida no sentido negativo quando flui das baterias para as cargas. Durante os primeiros 10 segundos as cargas da rede estão desacopladas, após esse período as cargas entram no sistema, o controle *droop* externo é ativado apenas após os 20 primeiros segundos de medição. As cargas ( $R_{carga}$ ) equivalentes em cada instante na rede podem ser verificadas nas tabelas de resultados.

Nesse cenário o coeficiente *droop* parametrizado ( $R_{dp}$ ) também apresentou resultado muito próximo do coeficiente *droop* externo medido ( $R_{d_{ext}}$ ), provando a possibilidade de utilizar o CLP na implementação do controle *droop* com a mesma precisão do controle *droop* interno do equipamento.

TABELA 19 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário II

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{ext}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 10 s	0 V	0 A	-	-	-
10 s  — 20 s	0 V	-1,9294 A	-	-	80 $\Omega$
20 s  — 30 s	1,1506 V	-1,9294 A	0,5963 $\Omega$	0,6 $\Omega$	80 $\Omega$
30 s  — 40 s	1,7306 V	-2,8686 A	0,6032 $\Omega$	0,6 $\Omega$	53,33 $\Omega$
40 s  — 50 s	2,2648 V	-3,7781 A	0,5994 $\Omega$	0,6 $\Omega$	40 $\Omega$
50 s  — 60 s	3,3304 V	-5,5571 A	0,5993 $\Omega$	0,6 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 20 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário II

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{ext}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 10 s	0 V	0 A	-	-	-
10 s  — 20 s	0 V	-1,9112 A	-	-	80 $\Omega$
20 s  — 30 s	2,2976 V	-1,9112 A	1,2022 $\Omega$	1,2 $\Omega$	80 $\Omega$
30 s  — 40 s	3,3891 V	-2,8344 A	1,1957 $\Omega$	1,2 $\Omega$	53,33 $\Omega$
40 s  — 50 s	4,4785 V	-3,7213 A	1,2034 $\Omega$	1,2 $\Omega$	40 $\Omega$
50 s  — 60 s	6,5316 V	-5,4310 A	1,2026 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 21 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário II

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{ext}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 10 s	0 V	0 A	-	-	-
10 s  — 20 s	0 V	-1,8897 A	-	-	80 $\Omega$
20 s  — 30 s	3,4059 V	-1,8897 A	1,8023 $\Omega$	1,8 $\Omega$	80 $\Omega$
30 s  — 40 s	5,0212 V	-2,7944 A	1,7968 $\Omega$	1,8 $\Omega$	53,33 $\Omega$
40 s  — 50 s	6,5894 V	-3,6601 A	1,8003 $\Omega$	1,8 $\Omega$	40 $\Omega$
50 s  — 60 s	9,5653 V	-5,3119 A	1,8007 $\Omega$	1,8 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

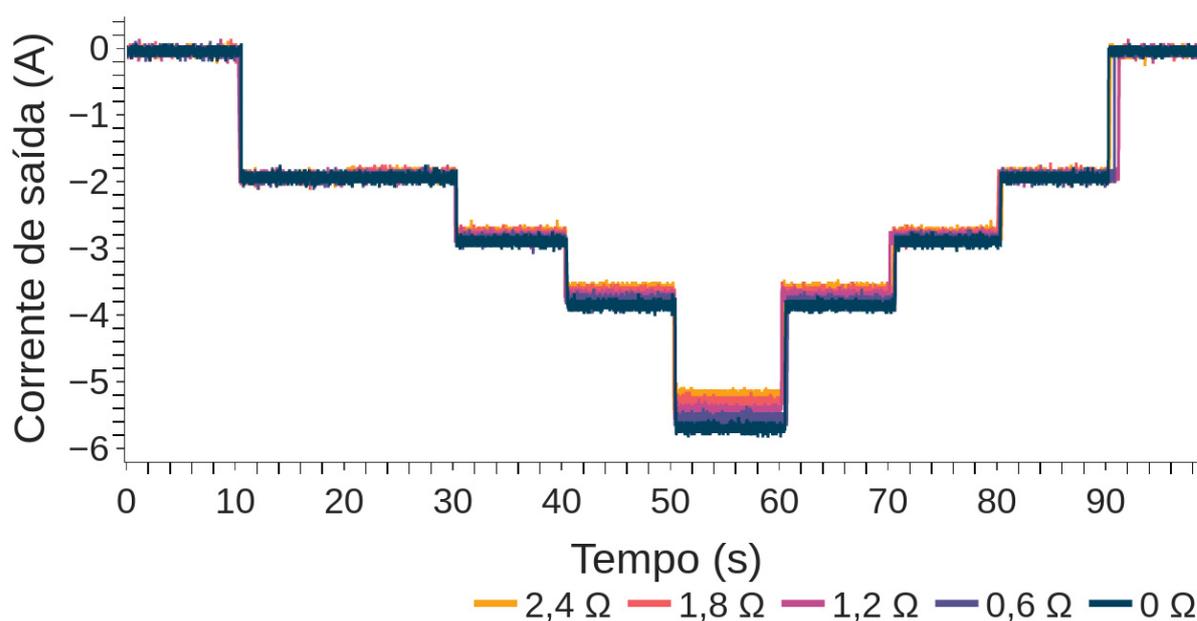
TABELA 22 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário II

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_{d_{ext}}$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 10 s	0 V	0 A	-	-	-
10 s  — 20 s	0 V	-1,8833 A	-	-	80 $\Omega$
20 s  — 30 s	4,5136 V	-1,8833 A	2,3966 $\Omega$	2,4 $\Omega$	80 $\Omega$
30 s  — 40 s	6,6469 V	-2,7681 A	2,4012 $\Omega$	2,4 $\Omega$	53,33 $\Omega$
40 s  — 50 s	8,6606 V	-3,6119 A	2,3977 $\Omega$	2,4 $\Omega$	40 $\Omega$
50 s  — 60 s	12,489 V	-5,2054 A	2,3992 $\Omega$	2,4 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

As Figuras 41, 42 e 43 apresentam, respectivamente, o perfil da corrente de saída do conversor, o perfil de onda de tensão e a curva do coeficiente *droop* medido em cada degrau de carga. A comparação dos resultados do cenário I com o cenário II verificam as equivalências dos dois controles quando operam individualmente na rede.

FIGURA 41 – Corrente x Tempo - Cenário II



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 42 – Tensão x Tempo - Cenário II

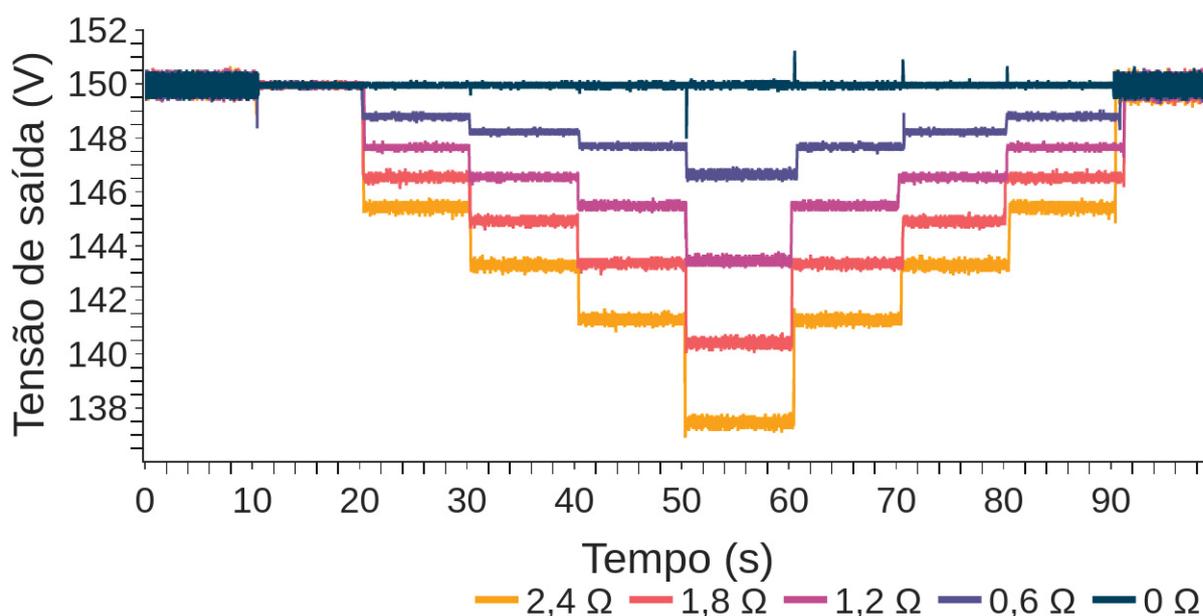
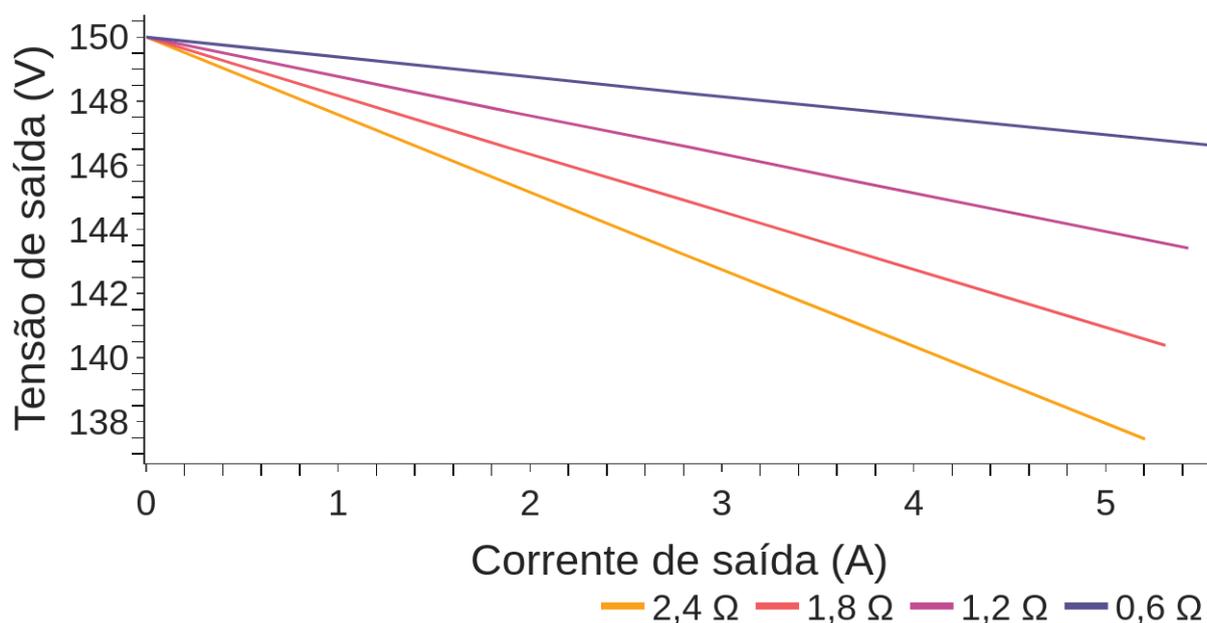


FIGURA 43 – Tensão x Corrente - Cenário II

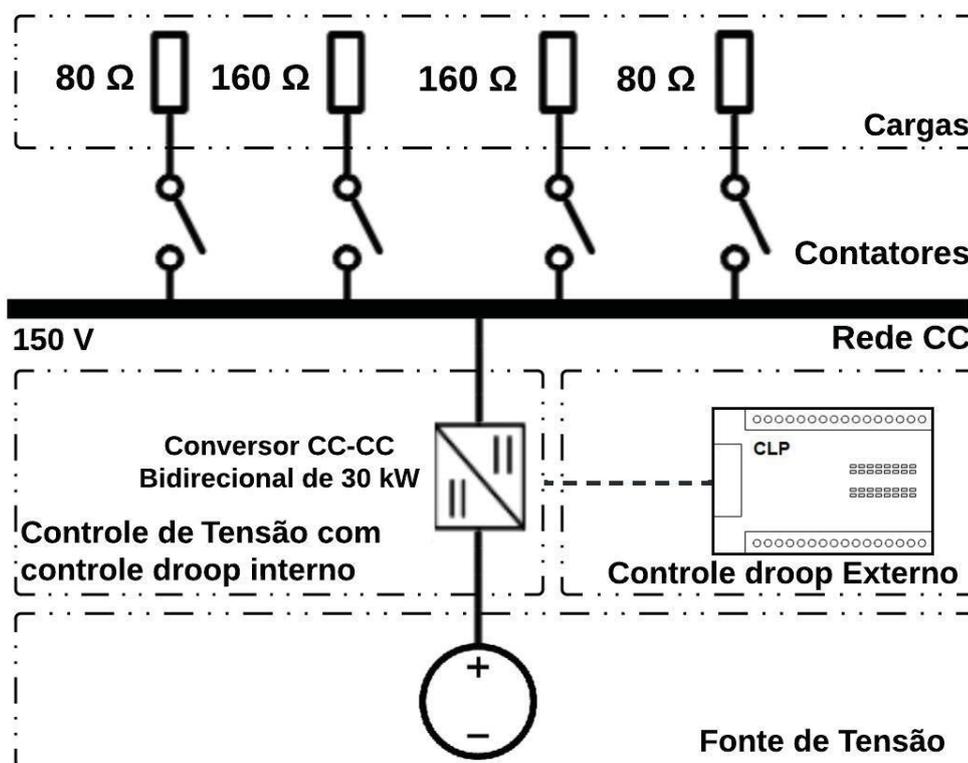


### 5.3 CENÁRIO III - CONTROLE *DROOP* EXTERNO E INTERNO: FONTE DE TENSÃO

Esse cenário tem como finalidade verificar a atuação dos dois controles concomitantemente e o tempo de resposta para um mesmo degrau de carga, implementando

coeficientes *droop* iguais nos dois conversores. A Figura 44 apresenta o diagrama de conexão dos equipamentos para o terceiro cenário.

FIGURA 44 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário III



Fonte: O autor (2022)

No início do cenário, o conversor é comissionado no modo FT e com tensão de saída de 150 V na condição a vazio, o coeficiente *droop* escolhido foi de 10% (1,2 Ω) para o controle interno e para o controle *droop* externo foi selecionado o valor de 1,2 Ω totalizando 2,4 Ω na saída do conversor.

Os parâmetros utilizados no conversor referentes ao terceiro cenário são indicados na Tabela 23.

TABELA 23 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário III

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída	150 V
Coefficiente <i>droop</i> interno ( $Rd_{int}$ )	10% (1,2 Ω)
Coefficiente <i>droop</i> externo ( $Rd_{ext}$ )	1,2 Ω

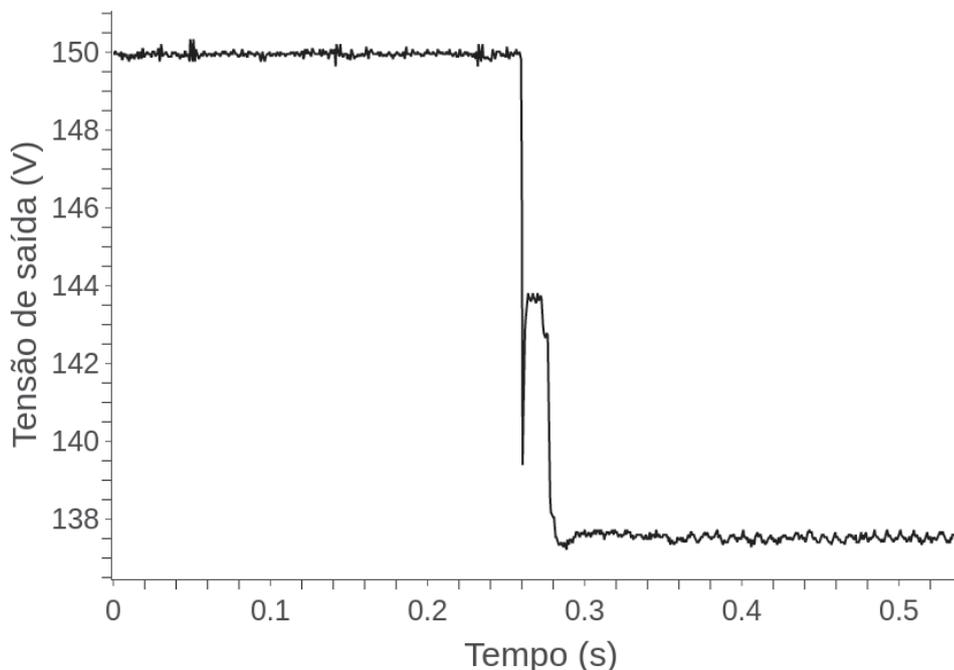
Fonte: O autor (2022)

### 5.3.1 Degrau de carga - Cenário III

Para verificar a resposta do controle para um degraú de carga, os contatores conectados em série nas cargas da Figura 44 são acoplados na rede no mesmo

instante. A Figura 45 apresenta o resultado da queda de tensão na saída do conversor para os controles *droop* externo e interno.

FIGURA 45 – Degrau de carga para o *droop* externo ( $1,2 \Omega$ ) e interno ( $1,2 \Omega$ ) - Cenário III



Fonte: O autor (2022)

Na Figura 45 a malha interna do conversor atua primeiro após 1 milissegundo do início do afundamento de tensão, para um tempo de estabilização de 3 milissegundos e uma tensão média de 143,61 V. O controle externo atua após 17 milissegundos após a entrada das cargas, para um tempo de estabilização de 7,5 milissegundos e uma tensão média de 137,60 V.

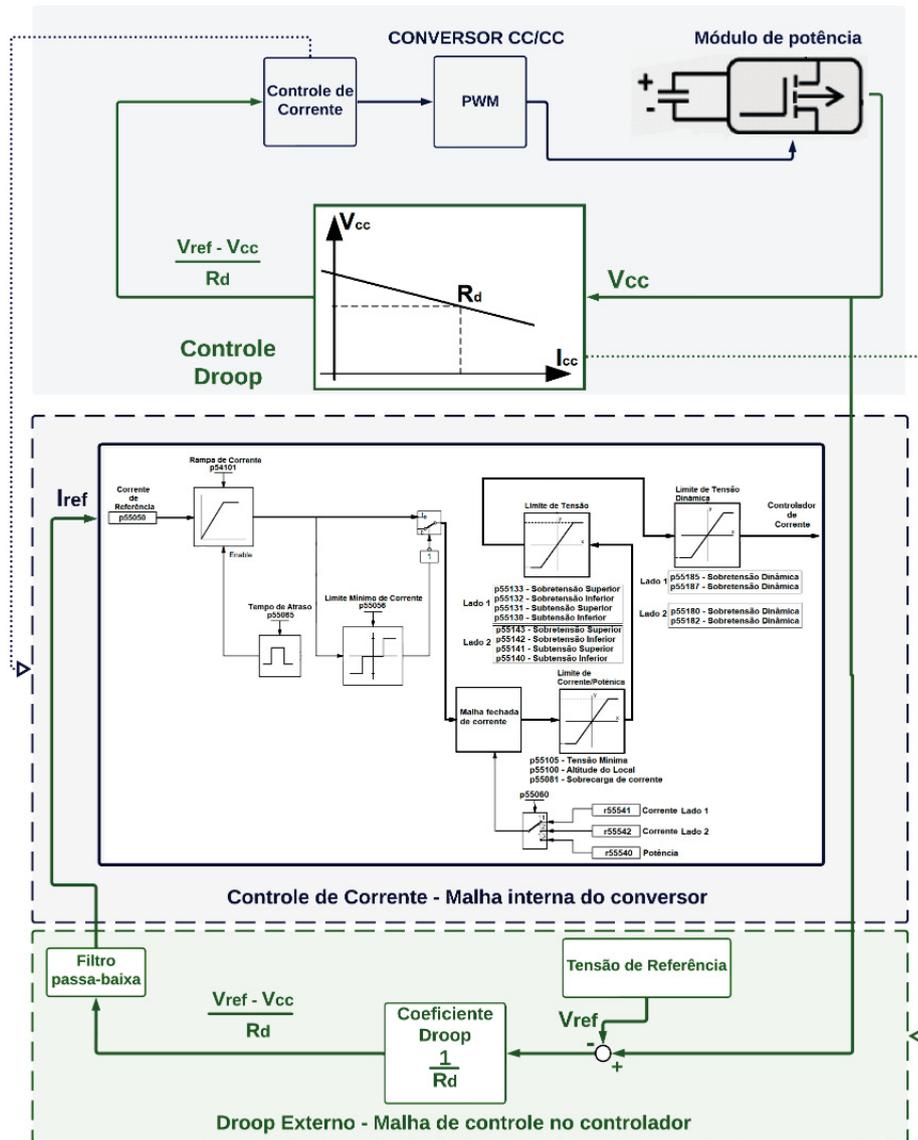
#### 5.4 CENÁRIO IV - CONTROLE *DROOP* EXTERNO: FONTE DE CORRENTE

O conversor atuando como FC não possui em sua malha de controle o coeficiente *droop* como demonstrado no caso do conversor atuando como FT. Nesse contexto foi desenvolvido um controle *droop* externo ao equipamento por meio do CLP, chamado de controle *droop* de corrente. O sinal de saída desse controle é enviado para a entrada da malha de controle de corrente através de um filtro passa-baixa, o sinal de corrente de referência enviado é calculado a partir da equação 2.4.

A tensão de saída do conversor  $V_{cc}$  é medida e enviada para o CLP utilizando os sensores internos do conversor. Em seguida, é comparada pelo sinal de tensão de referência  $V_{ref}$  definida no supervisor e então dividida por um coeficiente *droop*  $R_d$ .

O sinal resultante é enviado do CLP como sinal de corrente de referência  $I_{ref}$  atenuado por um filtro passa-baixa. O controle proposto pode ser verificado na Figura 46.

FIGURA 46 – Diagrama de controle: *droop* externo para fonte de corrente



Fonte: O autor (2022)

O filtro passa-baixa tem a função ajustar o sinal enviado para a malha interna de corrente com a finalidade de estabilizar o controle *droop*, o filtro também tem a função de atenuar ruídos do sensor de corrente referentes às rápidas oscilações na rede durante a entrada e saída de cargas. A função de transferência no domínio do tempo contínuo de um filtro passa-baixa de primeira ordem pode ser definida como:

$$H_{FP}(s) = \frac{s(s)}{e(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (5.2)$$

onde  $T$  é a constante de tempo,  $e(s)$  é a entrada do sinal no filtro e  $s(s)$  é a saída do sinal no filtro.

Contudo, para a implementação de um controlador digital, todos os parâmetros de saída e entrada devem ser discretos. Assim, foi necessário transformar a equação do filtro passa-baixa do domínio do tempo contínuo para o tempo discreto.

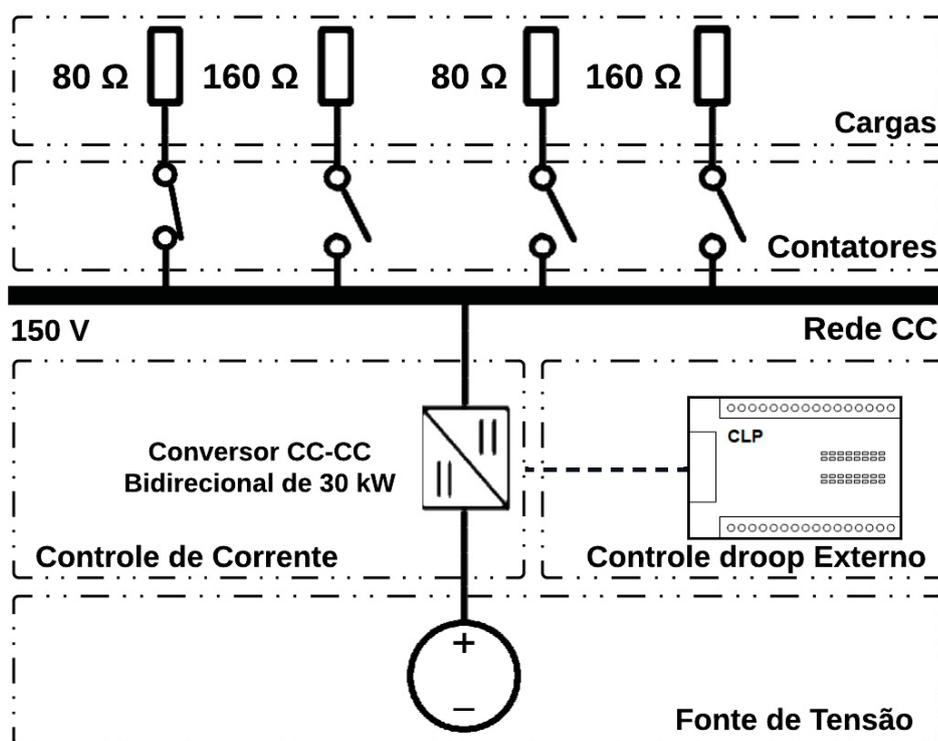
A dedução da equação do filtro passa-baixa pode ser vista no Apêndice C. É possível calcular a saída da corrente no filtro passa-baixa no controlador em cada instante de tempo, como descrito a seguir:

$$s(t_k) = \frac{T_s}{T+h} \times s(t_{k-1}) + \frac{h}{T_s+h} \times e(t_k) \quad (5.3)$$

onde  $t_k$  representa o tempo medido da primeira medição que passa pelo filtro e  $T$  é a constante de tempo, e o tempo de ciclo  $h$ .

Os tempos de ciclo do controlador, a constante de tempo e o período amostral das malhas internas de controle do conversor devem ser verificados para que o controle seja estável. Para todos os cenários com controle *droop* com o conversor operando como FC, a constante de tempo selecionada do filtro passa-baixa foi de quatro segundos. A Figura 47 apresenta o Diagrama de conexão dos equipamentos para o quarto cenário.

FIGURA 47 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário IV



Os parâmetros utilizados no conversor referentes ao quarto cenário são indicados na Tabela 24:

TABELA 24 – Parâmetros do comissionamento do conversor CC-CC - Cenário IV

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída	150 V
Coefficiente <i>droop</i> Externo ( $R_{d_{ext}}$ )	(2,4 $\Omega$ ) - (1,8 $\Omega$ ) - (1,2 $\Omega$ ) - (0,6 $\Omega$ )
Constante de tempo ( $T$ )	4 s
Ciclo entre amostras ( $h$ )	4 ms

Fonte: O autor (2022)

#### 5.4.1 Resultados do Cenário IV

Esta seção apresenta os resultados quantitativos e gráficos da curva de tensão, da curva de corrente e do coeficiente *droop* durante os degraus de carga utilizando o controle *droop* externo de corrente.

São medidos e calculados os parâmetros para o conversor com o coeficiente *droop* igual 0,6  $\Omega$ , 1,2  $\Omega$ , 1,8  $\Omega$  e 2,4  $\Omega$  respectivamente apresentados na Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28.

TABELA 25 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$ ) - Cenário IV

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 60 s	1,1265 V	-1,9221 A	0,5860 $\Omega$	0,6 $\Omega$	80 $\Omega$
60 s  — 90 s	1,7015 V	-2,8639 A	0,5941 $\Omega$	0,6 $\Omega$	53,33 $\Omega$
120 s  — 150 s	2,9030 V	-4,8599 A	0,5973 $\Omega$	0,6 $\Omega$	40 $\Omega$
150 s  — 180 s	4,3267 V	-6,6495 A	0,6506 $\Omega$	0,6 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 26 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$ ) - Cenário IV

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 60 s	2,2664 V	-1,9035 A	1,1906 $\Omega$	1,2 $\Omega$	80 $\Omega$
60 s  — 90 s	3,3743 V	-2,8243 A	1,1947 $\Omega$	1,2 $\Omega$	53,33 $\Omega$
120 s  — 150 s	5,6143 V	-4,6822 A	1,1990 $\Omega$	1,2 $\Omega$	40 $\Omega$
150 s  — 180 s	7,8783 V	-6,4178 A	1,2275 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 27 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 1,8 \Omega$ ) - Cenário IV

$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 60 s	3,3874 V	-1,8919 A	1,7905 $\Omega$	1,8 $\Omega$	80 $\Omega$
60 s  — 90 s	5,0172 V	-2,7967 A	1,7939 $\Omega$	1,8 $\Omega$	53,33 $\Omega$
120 s  — 150 s	8,2443 V	-4,5800 A	1,8000 $\Omega$	1,8 $\Omega$	40 $\Omega$
150 s  — 180 s	11,2786 V	-6,2761 A	1,7970 $\Omega$	1,8 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

TABELA 28 – Resultados para o controle droop externo ( $R_{d_{ext}} = 2,4 \Omega$ ) - Cenário IV

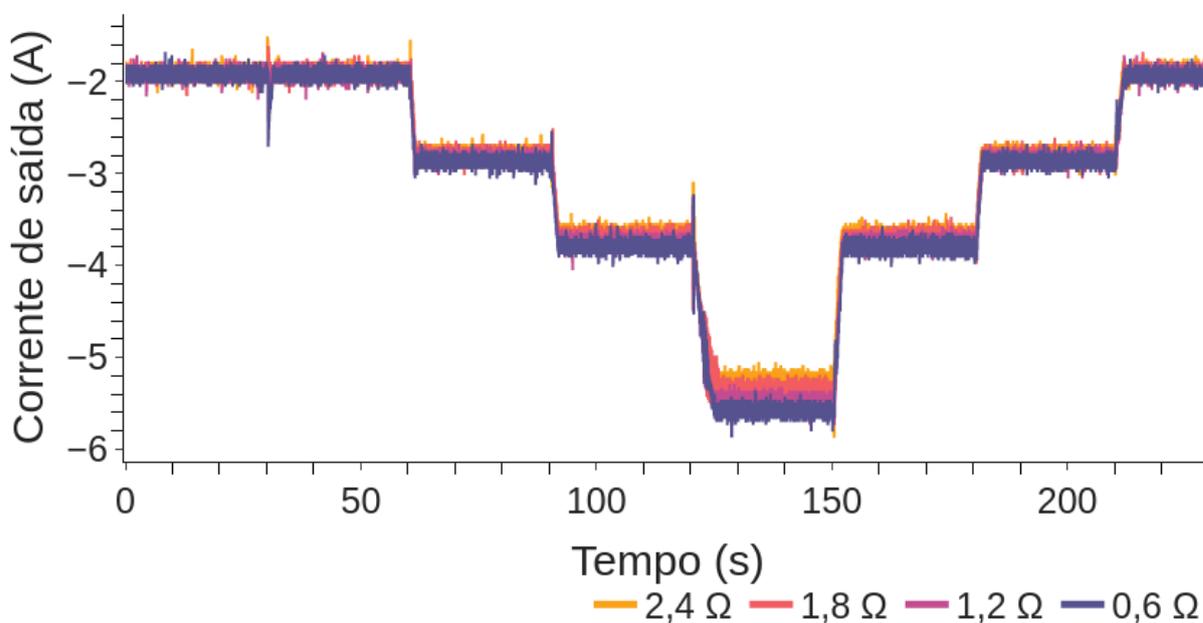
$\Delta T$	$\Delta v$	$I_m$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$
0 s  — 60 s	4,4873 V	-1,8779 A	2,3895 $\Omega$	2,4 $\Omega$	80 $\Omega$
60 s  — 90 s	6,6098 V	-2,7633 A	2,3919 $\Omega$	2,4 $\Omega$	53,33 $\Omega$
120 s  — 150 s	10,7623 V	-4,4809 A	2,4018 $\Omega$	2,4 $\Omega$	40 $\Omega$
150 s  — 180 s	14,6544 V	-6,1143 A	2,3967 $\Omega$	2,4 $\Omega$	26,67 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

Como pode ser verificado nas tabelas de resultados do controle *droop* externo de corrente, o coeficiente *droop* parametrizado apresentado na coluna ( $R_{dp}$ ) apresenta variações em relação ao coeficiente *droop* externo medido apresentado na coluna ( $R_{d_{int}}$ ).

O perfil de onda de tensão do conversor, o perfil da corrente de saída e a curva do coeficiente *droop* medido em cada degrau de carga podem ser visualizados na Figura 48, Figura 49 e Figura 50, respectivamente. Pode-se observar que o coeficiente *droop* para esse tipo de controle apresenta uma curva invertida da relação corrente de saída e tensão de saída do conversor apresentada na Figura 50.

FIGURA 48 – Corrente x Tempo - Cenário IV



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 49 – Tensão x Tempo - Cenário IV

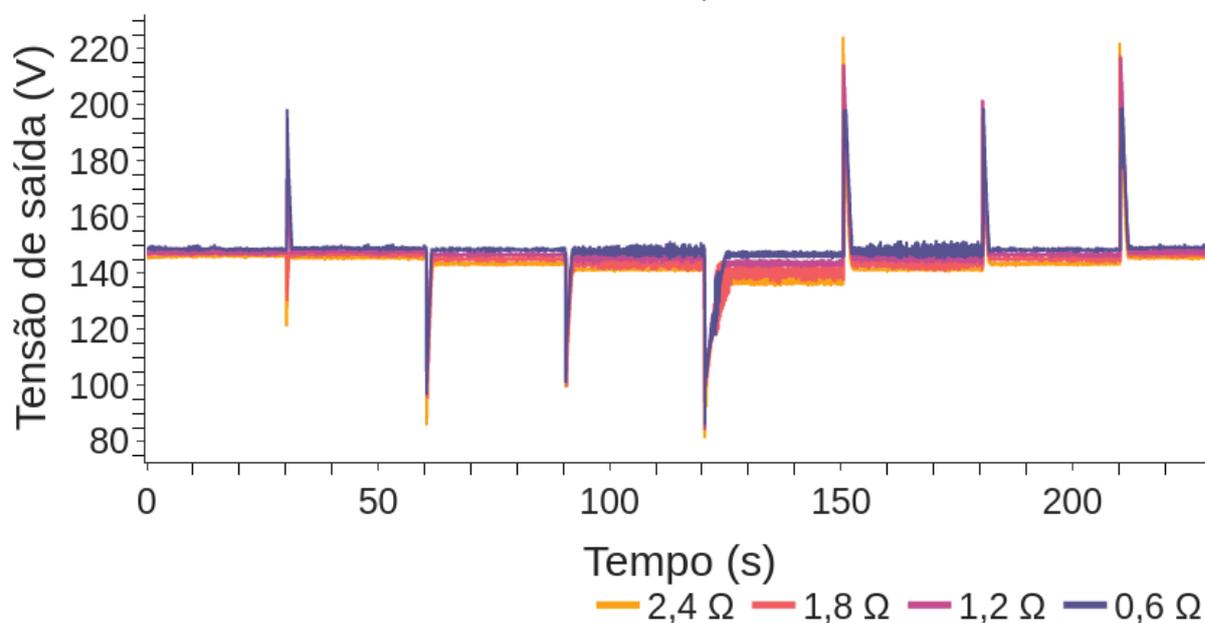
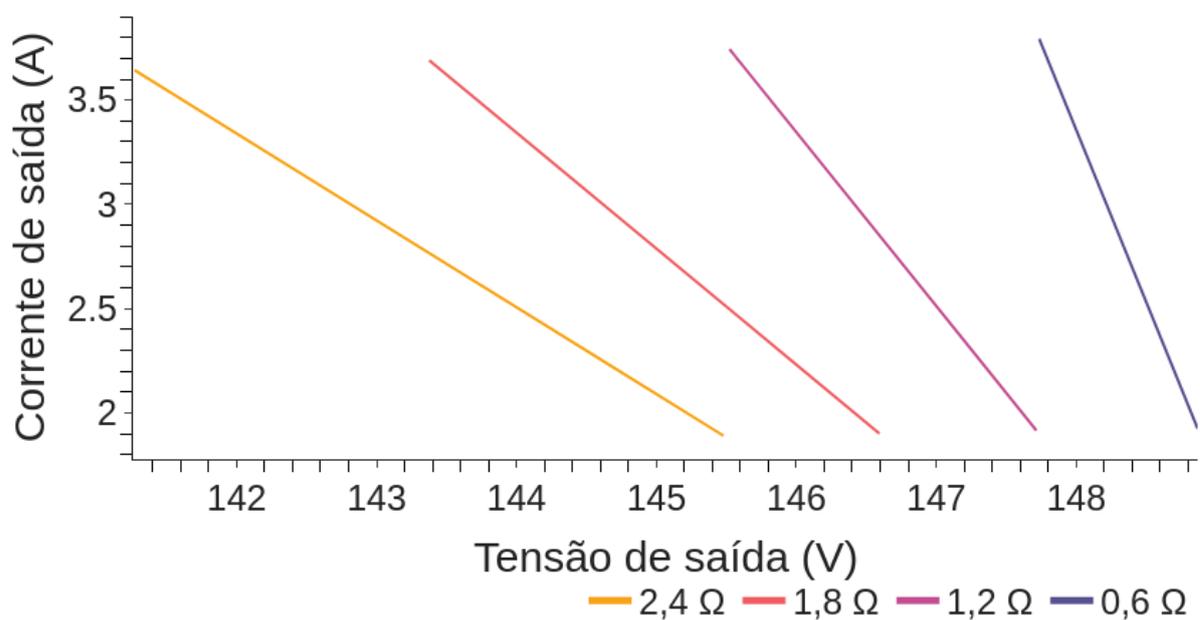


FIGURA 50 – Tensão x Corrente - Cenário IV

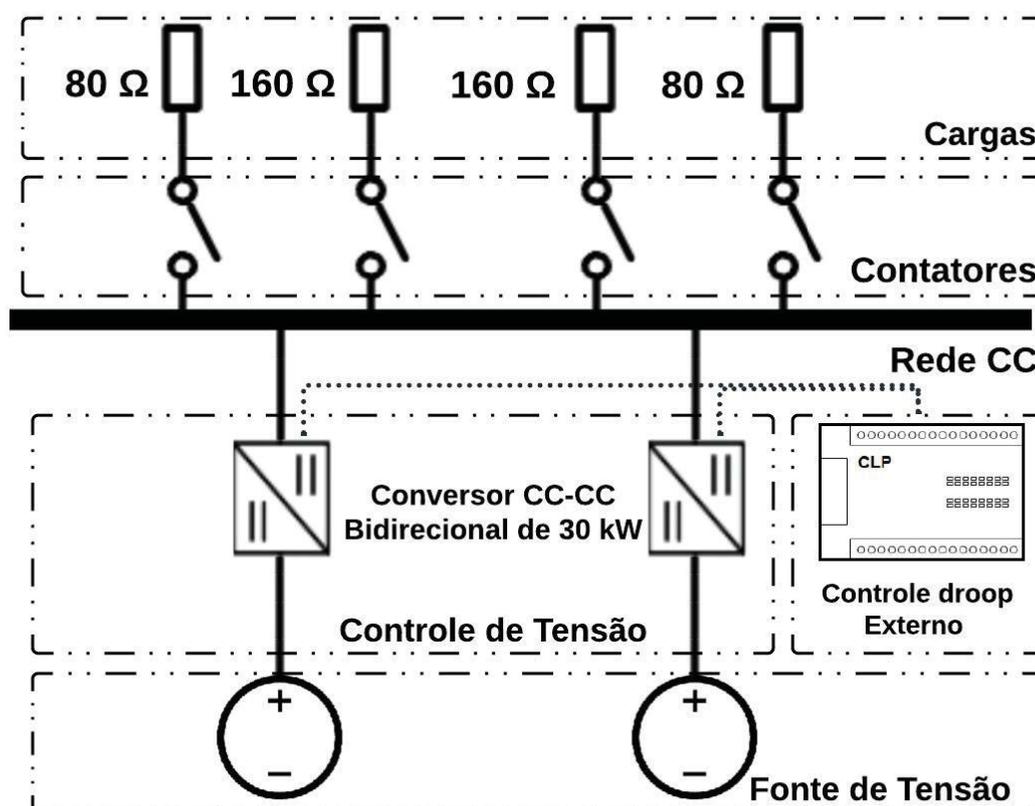


## 5.5 CENÁRIO V - CONTROLE *DROOP* EXTERNO: FONTES DE TENSÃO EM PARALELO

Nesse cenário foi verificada a resposta do controle *droop* implementado no CLP para compartilhar a carga acoplada na rede igualmente entre os conversores em paralelo.

Observou-se, na seção 5.3, que o controle *droop* externo é bastante lento quando comparado com o controle *droop* interno e por questões de segurança da operação foram utilizados ambos os controles nesse cenário. Em vista disso, todos os ensaios desse cenário possuem um controle *droop* interno de  $0,6 \Omega$ , que permanece apenas durante a entrada das cargas na rede. Após a atuação do controle externo, o controle interno é desativado automaticamente. A Figura 51 apresenta o diagrama de conexão dos equipamentos para o quinto cenário.

FIGURA 51 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário V



Fonte: O autor (2022)

Os parâmetros utilizados no conversor referentes ao quinto cenário são indicados na Tabela 29:

TABELA 29 – Parâmetros do comissionamento dos conversores CC-CC - Cenário V

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída	100 V
Coefficiente <i>droop</i> externo ( $Rd_{ext}$ )	$0,6 \Omega$ - $1,2 \Omega$ - $1,5 \Omega$

Fonte: O autor (2022)

No início do cenário as cargas são acopladas na ordem da Figura 51 e, assim, degraus de carga são gerados através da entrada das cargas subsequentes. Para os

cenários que envolvem apenas um degrau, todas as cargas são acopladas ao mesmo tempo.

Os dois primeiros experimentos têm a finalidade de analisar a resposta do controle *droop* para o degrau de carga com a entrada de todas as cargas na rede para diferentes coeficientes *droop*. Os dois próximos experimentos buscam verificar a resposta do controle para variados degraus de carga.

### 5.5.1 Resultados do Cenário V

Esta seção apresenta os resultados gráficos da curva de tensão, da curva de corrente e do coeficiente *droop* calculado. São apresentados também os resultados quantitativos da tensão ( $V_{cc}$ ) e corrente ( $I_{cc}$ ) de saída de cada conversor, do coeficiente *droop* calculado ( $R_d$ ) e parametrizado ( $R_{dp}$ ) e do valor da carga na rede ( $R_{carga}$ ). Para análise e validação do controle, a regulação de tensão ( $V_r$ ) e o compartilhamento de corrente ( $I_e$ ) são as métricas utilizadas para aferir o controle *droop* proposto.

Na Tabela 30 e Tabela 31, são apresentados os resultados do degrau máximo gerado por uma resistência de  $26,67 \Omega$  para coeficientes *droop* iguais de  $1,2 \Omega$  e coeficientes *droop* diferentes sendo  $1,2 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ .

Os resultados de compartilhamento de carga foram proporcionais com os coeficientes *droop* parametrizados, com uma variação bastante pequena na variação do coeficiente *droop*.

Na Tabela 32 e Tabela 33 são apresentados resultados de vários degraus de carga para coeficiente *droop* de  $1,2 \Omega$  em cada conversor e para coeficientes *droop* diferentes de  $1,5 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ . Para o experimento com ambos conversores com coeficiente *droop* iguais o compartilhamento de carga não foi afetado pela variação de carga, para o experimento com coeficientes *droop* diferentes cargas maiores apresentaram melhor compartilhamento de carga proporcional ao coeficiente *droop*.

TABELA 30 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ) - Cenário V

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 0,3 s	100,008 V	-0,0347873 A	-	-	-	-	-
Conversor II	-	99,6688 V	0,185818 A	-	-	-	-	-
Conversor I	0,3 s  — 0,7 s	97,7989 V	1,80898 A	1,21679 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$	2,20%	51,39%
Conversor II	-	97,6343 V	1,91282 A	1,23677 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	2,37%	48,60%

Fonte: O autor (2022)

TABELA 31 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ ) - Cenário V

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 0,3 s	99,7034 V	0,204446 A	-	-	-	-	-
Conversor II	-	99,9749 V	-0,0264399 A	-	-	-	-	-
Conversor I	0,3 s  — 0,7 s	98,1888 V	1,47622 A	1,22692 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$	1,81%	60,63%
Conversor II	-	98,5856 V	2,27391 A	0,622 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	1,41%	39,36%

Fonte: O autor (2022)

TABELA 32 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ) - Cenário V

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 5 s	99,6656 V	0,239857 A	-	-	-	-	-
Conversor II	-	99,9541 V	0,0413833 A	-	-	-	-	-
Conversor I	5 s  — 10 s	99,2005 V	0,636471 A	1,2562 $\Omega$	1,2 $\Omega$	80 $\Omega$	0,79%	45,51%
Conversor II	-	99,2985 V	0,531643 A	1,3294 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	0,70%	54,49%
Conversor I	10 s  — 15 s	98,8373 V	0,930768 A	1,2491 $\Omega$	1,2 $\Omega$	53,33 $\Omega$	1,16%	48,47%
Conversor II	-	98,8878 V	0,875695 A	1,2700 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	1,11%	51,52%
Conversor I	15 s  — 20 s	98,5419 V	1,18665 A	1,2287 $\Omega$	1,2 $\Omega$	40 $\Omega$	1,46%	48,54%
Conversor II	-	98,6114 V	1,11927 A	1,2406 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	1,39%	51,46%
Conversor I	25 s  — 30 s	97,7718 V	1,82652 A	1,2199 $\Omega$	1,2 $\Omega$	26,67 $\Omega$	2,23%	48,98%
Conversor II	-	97,8395 V	1,75401 A	1,2317 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	2,16%	51,01%

Fonte: O autor (2022)

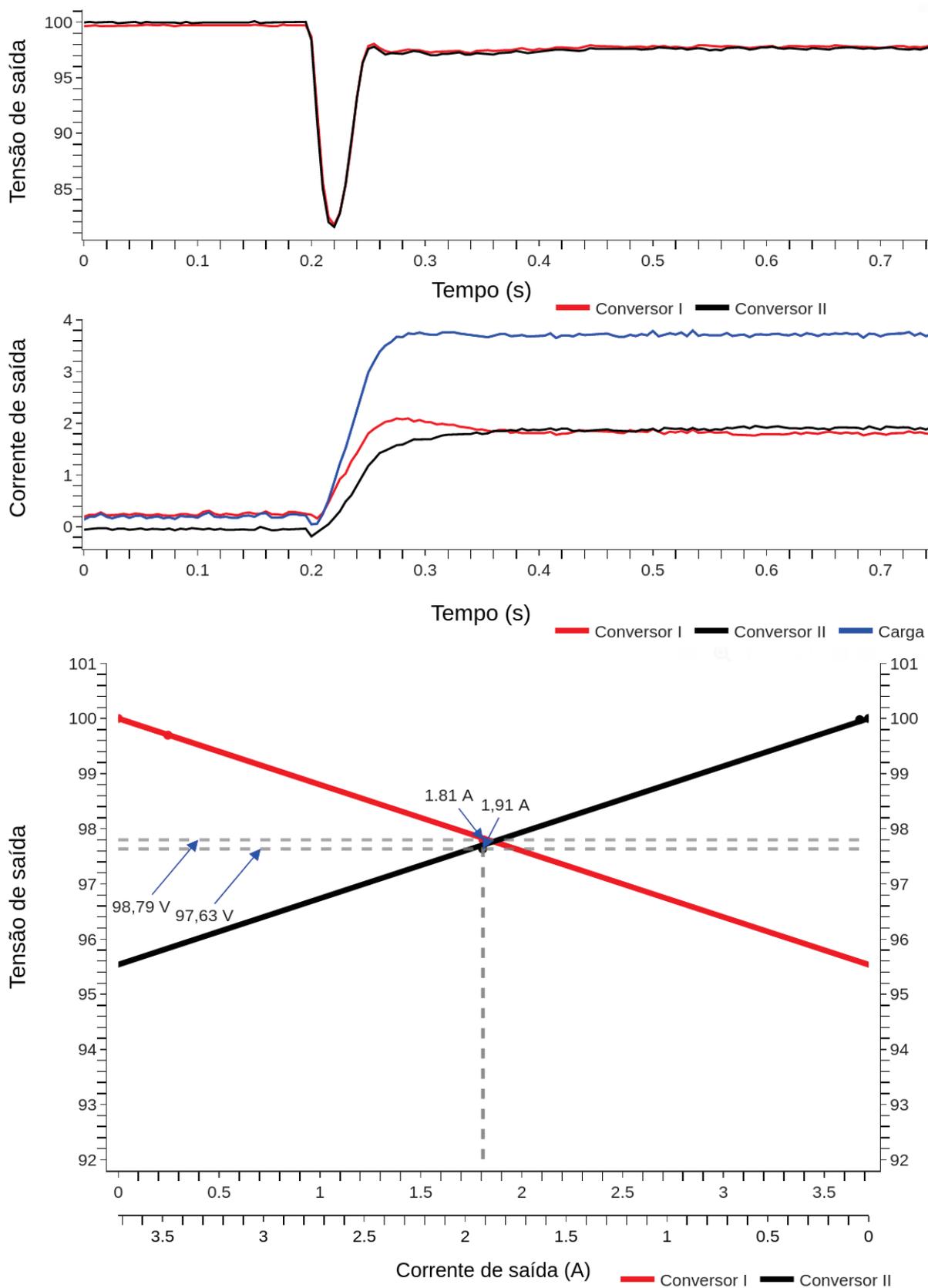
TABELA 33 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 0,6 \Omega$  e  $1,5 \Omega$ ) - Cenário V

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 7 s	99,8259 V	0,082089 A	-	1,5 $\Omega$	-	-	-
Conversor II	-	99,8997 V	0,0847706 A	-	0,6 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	7 s  — 15 s	99,0938 V	0,573106 A	1,5812 $\Omega$	1,5 $\Omega$	80 $\Omega$	0,91%	59,32%
Conversor II	-	99,4604 V	0,835845 A	0,645622 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	0,54%	40,67%
Conversor I	15 s  — 22 s	98,8863 V	0,709759 A	1,56906 $\Omega$	1,5 $\Omega$	53,33 $\Omega$	1,11%	62,61%
Conversor II	-	99,2301 V	1,18892 A	0,647556 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	0,77%	37,38%
Conversor I	22 s  — 28 s	98,5657 V	0,924036 A	1,55219 $\Omega$	1,5 $\Omega$	40 $\Omega$	1,43%	63,38%
Conversor II	-	98,9945 V	1,59934 A	0,628689 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	1,00%	36,61%

Fonte: O autor (2022)

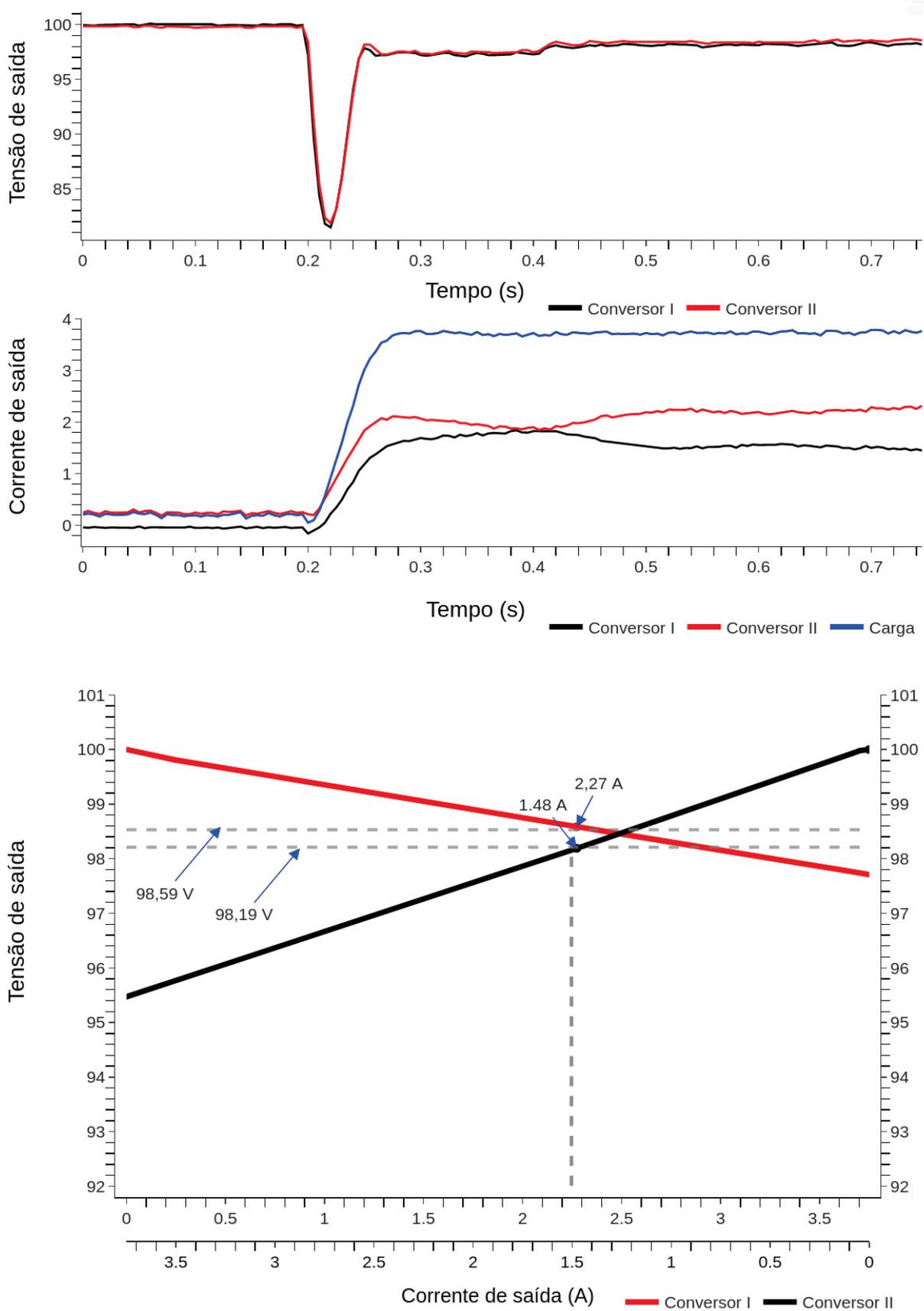
O perfil de onda de tensão e corrente de saída de cada conversor e a curva do coeficiente *droop* medido em cada degrau de carga podem ser visualizados na Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 respectivamente.

FIGURA 52 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário V - 1,2 Ω e 1,2 Ω



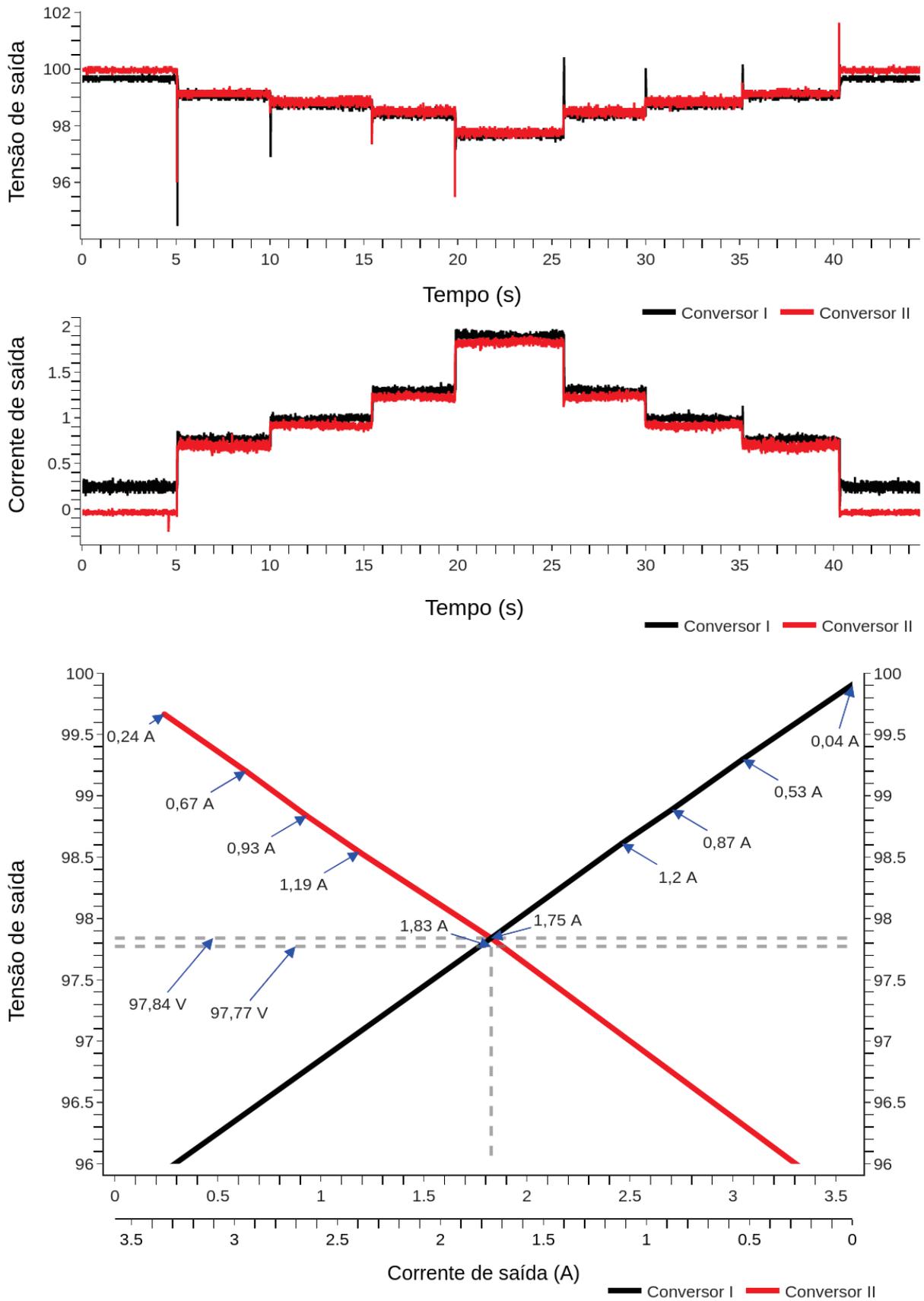
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 53 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário V - 1,2 Ω e 0,6 Ω



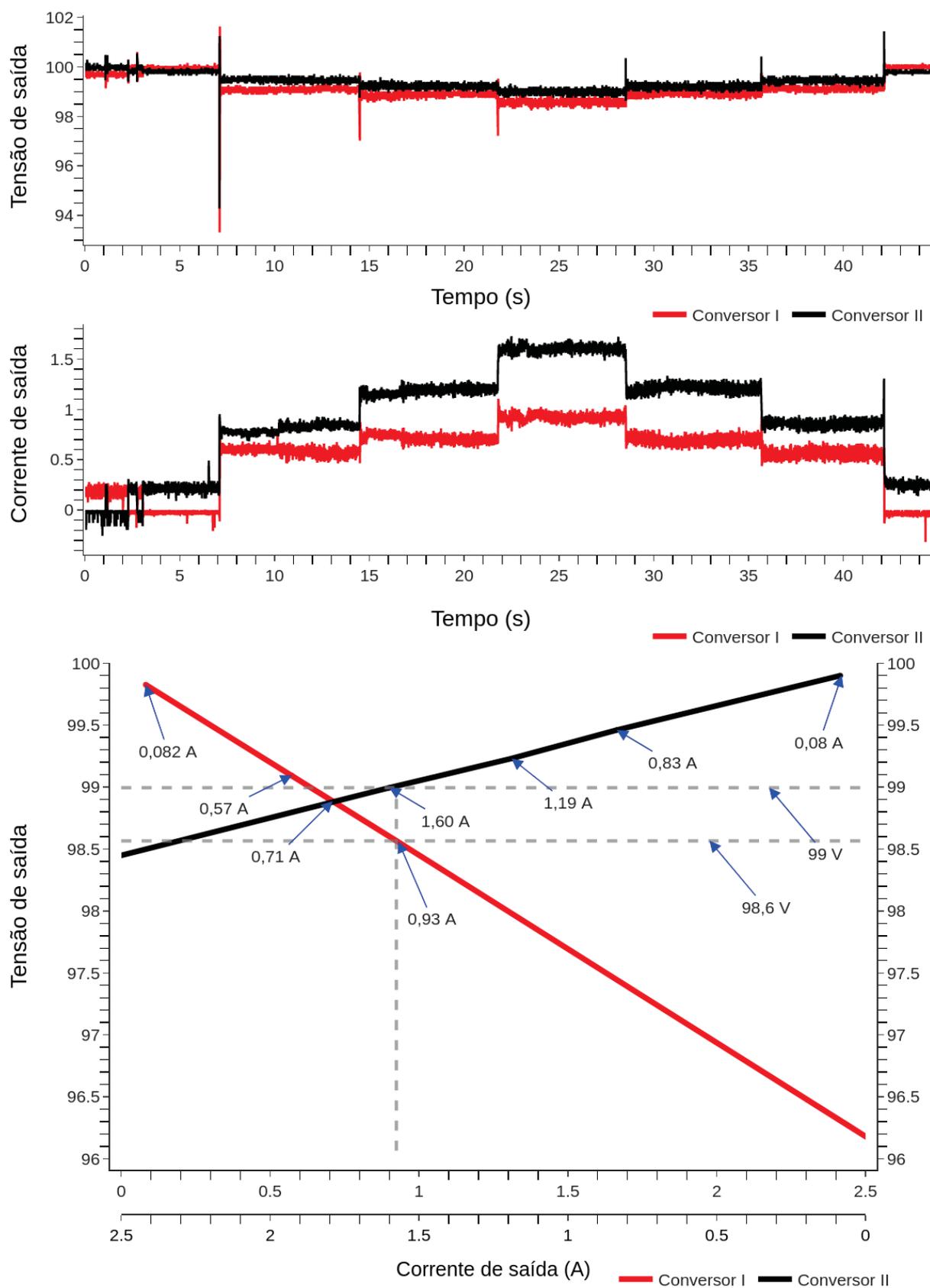
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 54 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário V - 1,2 Ω e 1,2 Ω



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 55 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário V - 0,6  $\Omega$  e 1,5  $\Omega$



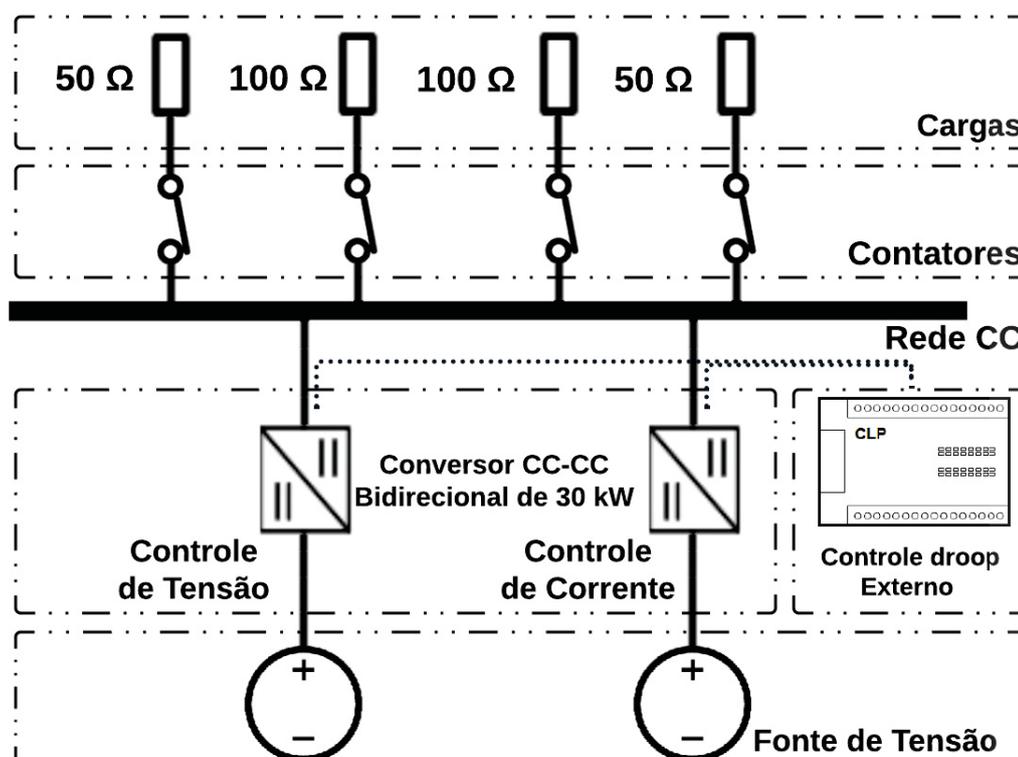
Fonte: O autor (2022)

## 5.6 CENÁRIO VI - CONTROLE *DROOP* EXTERNO: FONTE DE TENSÃO E FONTE DE CORRENTE EM PARALELO

Nesse cenário foi verificada a resposta do controle *droop* externo em diferentes modos de operação para o paralelismo entre um conversor operando no modo FT e o outro como FC.

Da mesma forma dos cenários anteriores, as cargas estão conectadas em paralelo. Os dois conversores estão acoplados em diferentes baterias e operam em paralelo. A Figura 56 apresenta o diagrama de conexão inicial dos equipamentos para o sexto cenário.

FIGURA 56 – Diagrama de conexão dos equipamentos - Cenário VI



Fonte: O autor (2022)

Inicialmente, o conversor operando no modo FT entra na rede com todas as cargas apresentadas na Figura 56. Após cerca de cinco a dez segundos, o conversor operando no modo FC é acoplado em paralelo na rede.

Os dois primeiros experimentos são realizados com a finalidade de analisar a resposta do controle *droop* para o degrau de carga, com a entrada de todas as cargas na rede para diferentes coeficientes *droop*.

Os parâmetros gerais de ambos os conversores referentes ao sexto cenário são indicados na Tabela 34 e na Tabela 35:

TABELA 34 – Parâmetros do comissionamento do conversor II (Modo: Fonte de Corrente) - Cenário VI

Parâmetros	Conversor II CC/CC
Tensão de saída (V)	100 V
Coefficiente <i>droop</i> externo ( $Rd_{ext}$ )	0,6 $\Omega$ - 1,2 $\Omega$
Constante de tempo ( $T$ )	4 s
Ciclo entre amostras ( $h$ )	4 ms

Fonte: O autor (2022)

TABELA 35 – Parâmetros do comissionamento do conversor I (Modo: Fonte de Tensão) - Cenário VI

Parâmetros	Conversor I CC/CC
Tensão de saída (V)	100 V
Coefficiente <i>droop</i> externo ( $Rd_{ext}$ )	0,6 $\Omega$

Fonte: O autor (2022)

### 5.6.1 Resultados do Cenário VI

Esta seção apresenta os resultados gráficos da curva de tensão, da curva de corrente, da resposta do filtro passa-baixa e do coeficiente *droop* calculado, assim como os resultados quantitativos da tensão ( $V_{cc}$ ) e corrente ( $I_{cc}$ ) de saída de cada conversor, do coeficiente *droop* calculado ( $R_d$ ) e parametrizado ( $R_{dp}$ ), do valor da carga na rede ( $R_{carga}$ ). Para análise e validação do controle, a regulação de tensão ( $V_r$ ) e o compartilhamento de corrente ( $I_e$ ) são as métricas utilizadas para aferir o controle *droop* proposto.

Na Tabela 36 e Tabela 37, são apresentados os resultados do degrau máximo gerado por uma resistência de 16,67  $\Omega$  para coeficientes *droop* iguais de 1.2  $\Omega$  e coeficientes *droop* diferentes sendo 1.2  $\Omega$  e 0.6  $\Omega$ .

Os resultados de compartilhamento de carga foram factíveis com os coeficientes *droop* parametrizados, no entanto foi possível perceber maior variação de coeficiente *droop* medido. Pequenos valores de tensão de saída medidas diferentes em cada conversor causou diferenças de compartilhamento de carga e conseqüentemente a variação do coeficiente *droop* medido.

Na Tabela 38 e Tabela 39 são apresentados resultados de vários degraus de carga para a mesma condição de coeficientes *droop*. Para coeficientes *droop* iguais são observados um melhor compartilhamento de carga com o acréscimo de carga na rede. Para coeficientes *droop* diferentes em cada conversor o compartilhamento de carga foi proporcional ao coeficiente *droop* parametrizado e também apresentou resultados mais satisfatórios para maiores cargas como no caso anterior.

TABELA 36 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ) - Cenário VI

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 4 s	100,4 V	0,1217 A	-	-	-	-	-
Conversor II	-	0 V	0 A	-	1,2 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	4 s  — 6 s	95,35 V	3,6564 A	1,2717 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	-	-
Conversor II	-	0 V	0 A	-	1,2 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	6 s  — 25 s	97,8094 V	1,79145 A	1,22283 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	2,19%	53,87%
Conversor II	-	97,4248 V	2,09249 A	1,2371 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	2,57%	46,12%

Fonte: O autor (2022)

TABELA 37 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ ) - Cenário VI

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 5 s	93,3171 V	5,5697 A	1,1998 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	-	-
Conversor II	-	0 V	0 A	-	0,6 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	5 s  — 35 s	97,5769 V	1,92235 A	1,2605 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	2,42%	67,21%
Conversor II	-	97,599 V	3,940489 A	0,609312 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	2,40%	32,79%

Fonte: O autor (2022)

TABELA 38 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ) - Cenário VI

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	0 s  — 7 s	93,2848 V	5,549477 A	1,21 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	-	-
Conversor II	-	0 V	0 A	-	1,2 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	7 s  — 16 s	96,6499 V	2,76248 A	1,2123 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	3,35%	52,39%
Conversor II	-	96,4075 V	3,0403 A	1,18164 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	3,59%	47,61%
Conversor I	16 s  — 22 s	98,0307 V	1,6758 A	1,17514 $\Omega$	1,2 $\Omega$	25,00 $\Omega$	1,97%	57,04%
Conversor II	-	97,8023 V	2,22527 A	0,987628 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	2,20%	42,96%
Conversor I	22 s  — 26 s	98,6273 V	1,187742 A	1,15607 $\Omega$	1,2 $\Omega$	33,33 $\Omega$	1,37%	59,27%
Conversor II	-	98,2719 V	1,7296 A	1,00006 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	1,73%	40,73%
Conversor I	26 s  — 31 s	99,0589 V	0,738972 A	1,27359 $\Omega$	1,2 $\Omega$	50 $\Omega$	0,94%	62,38%
Conversor II	-	98,5172 V	1,22519 A	1,21027 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	1,48%	37,62%
Conversor I	31 s  — 40 s	98,4198 V	1,26127 A	1,25283 $\Omega$	1,2 $\Omega$	33,33 $\Omega$	1,58%	56,57%
Conversor II	-	97,9152 V	1,64279 A	1,26907 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	2,08%	43,43%
Conversor I	40 s  — 46 s	96,4592 V	2,87151 A	1,23309 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	3,54%	50,46%
Conversor II	-	96,2578 V	2,92437 A	1,27966 $\Omega$	1,2 $\Omega$	-	3,74%	49,54%

Fonte: O autor (2022)

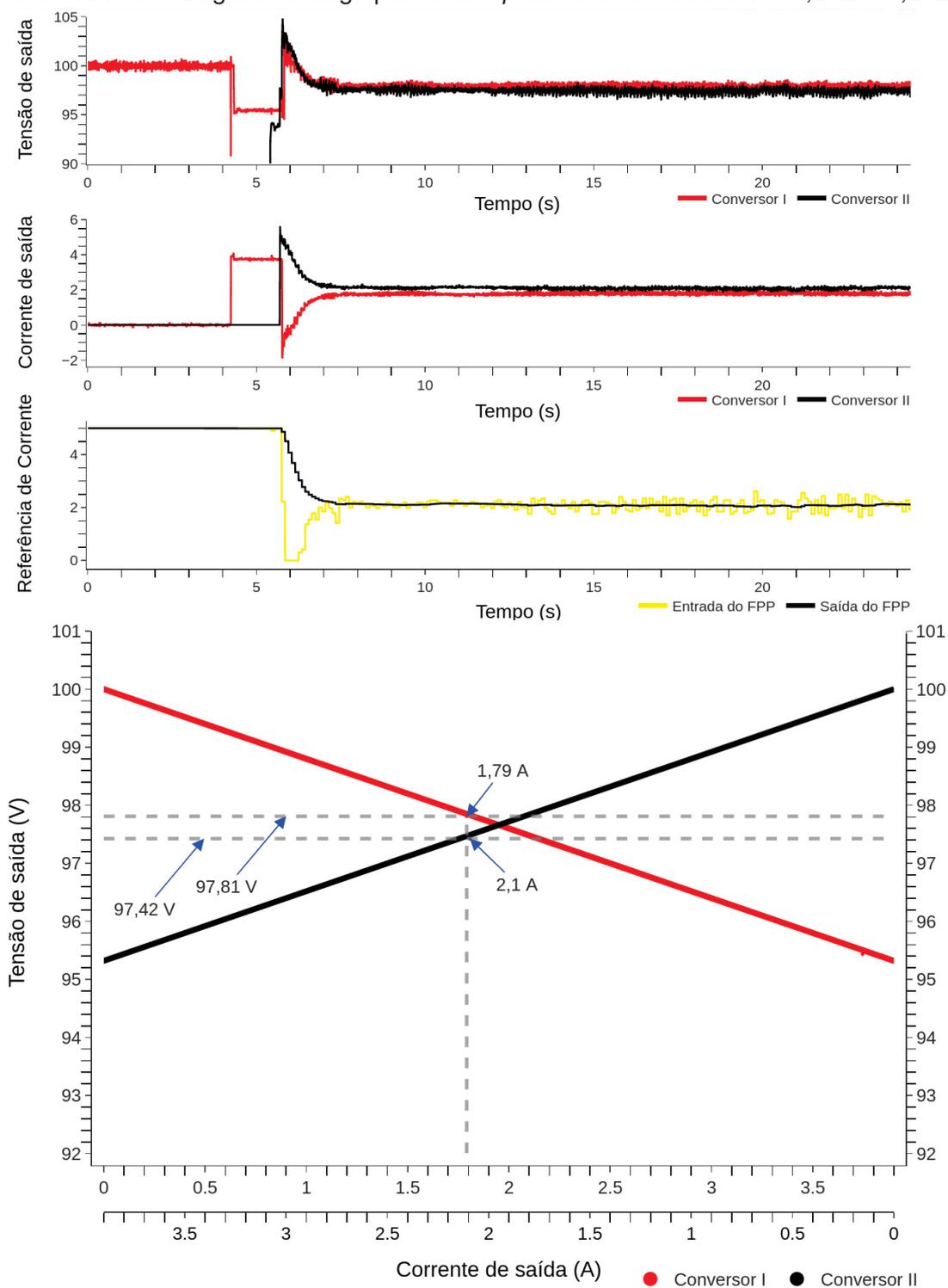
TABELA 39 – Resultados para o controle *droop* externo ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ ) - Cenário VI

	$\Delta T$	$V_{cc}$	$I_{cc}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_{carga}$	$V_r$	$I_e$
Conversor I	1 s  — 8 s	93,3173 V	5,53118 A	1,208 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	-	-
Conversor II	-	0 V	0 A	-	0,6 $\Omega$	-	-	-
Conversor I	8 s  — 18 s	97,5432 V	1,96373 A	1,25109 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	2,46%	66,48%
Conversor II	-	97,7827 V	3,89503 A	0,569271 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	2,21%	33,51%
Conversor I	18 s  — 23 s	98,2538 V	1,43602 A	1,21598 $\Omega$	1,2 $\Omega$	25,00 $\Omega$	1,75%	63,26%
Conversor II	-	98,3083 V	2,47315 A	0,684039 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	1,69%	36,73%
Conversor I	23 s  — 28 s	98,8052 V	1,02621 A	1,16433 $\Omega$	1,2 $\Omega$	33,33 $\Omega$	1,19%	64,78%
Conversor II	-	98,5885 V	1,88787 A	0,747691 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	1,41%	35,21%
Conversor I	28 s  — 33 s	99,2973 V	0,564852 A	1,24396 $\Omega$	1,2 $\Omega$	50 $\Omega$	0,70%	71,44%
Conversor II	-	99,0653 V	1,41316 A	0,661461 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	0,93%	28,56%
Conversor I	33 s  — 39 s	98,8322 V	0,9418 A	1,23999 $\Omega$	1,2 $\Omega$	33,33 $\Omega$	1,17%	67,70%
Conversor II	-	98,7013 V	1,97389 A	0,657918 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	1,30%	32,30%
Conversor I	39 s  — 44 s	97,6252 V	1,95172 A	1,21677 $\Omega$	1,2 $\Omega$	16,67 $\Omega$	2,37%	66,73%
Conversor II	-	97,7367 V	3,91442 A	0,578195 $\Omega$	0,6 $\Omega$	-	2,26%	33,27%

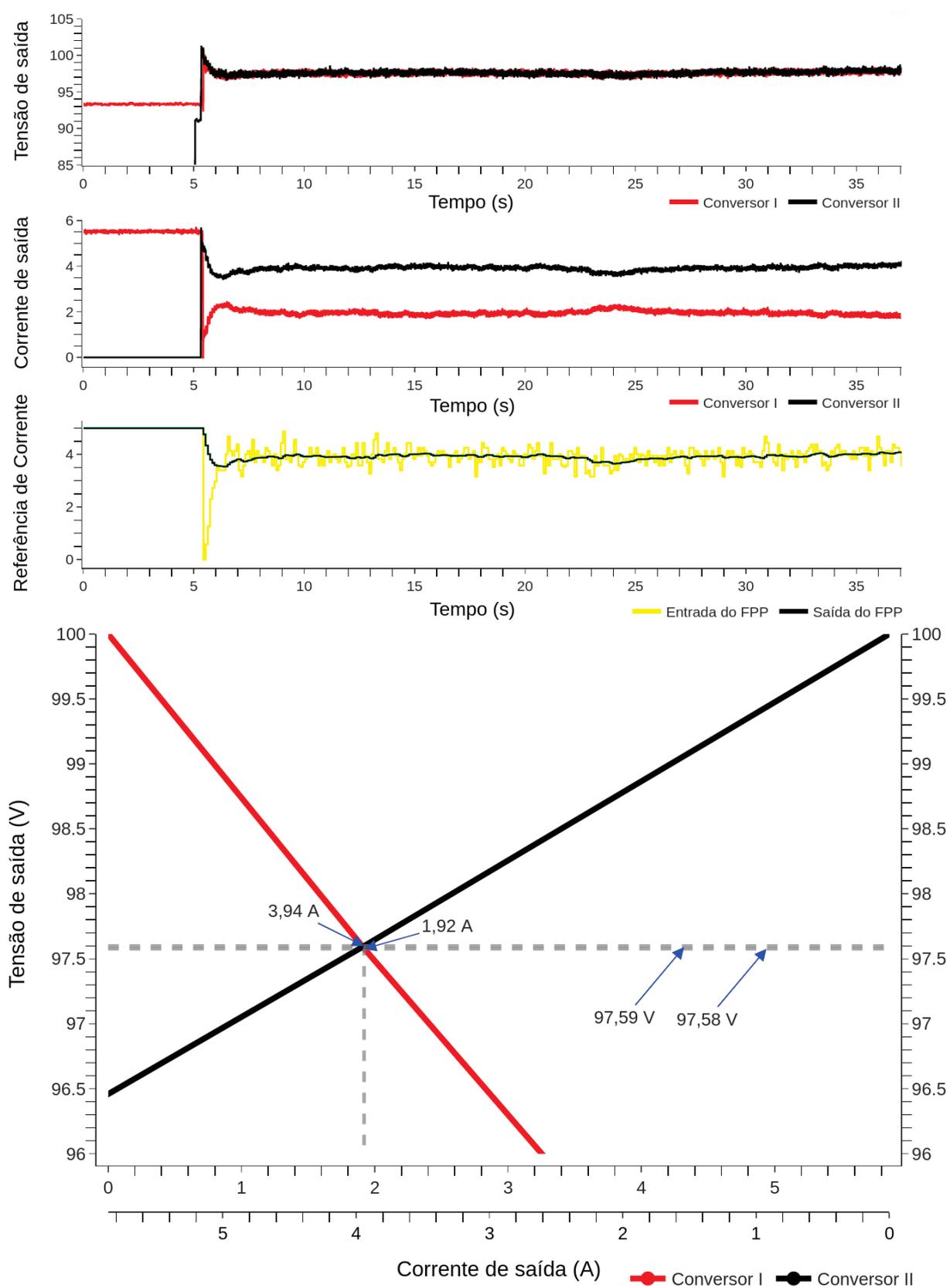
Fonte: O autor (2022)

O perfil de onda de tensão e corrente de saída de cada conversor, o sinal de entrada e saída do filtro passa-baixa para o conversor operando como FC e a curva do coeficiente *droop* medido em cada degrau de carga podem ser visualizados na Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60 respectivamente.

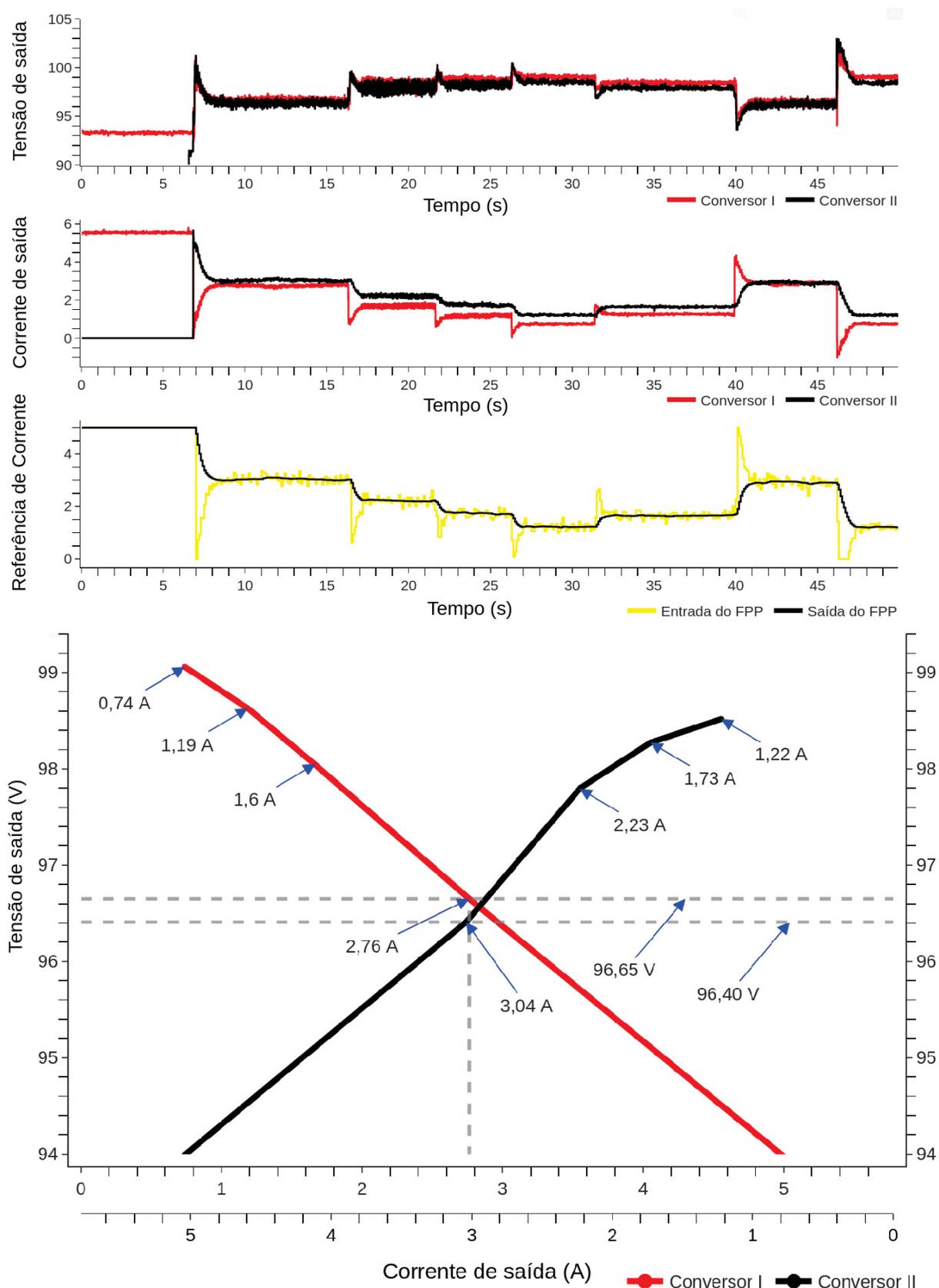
FIGURA 57 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário VI -  $1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$



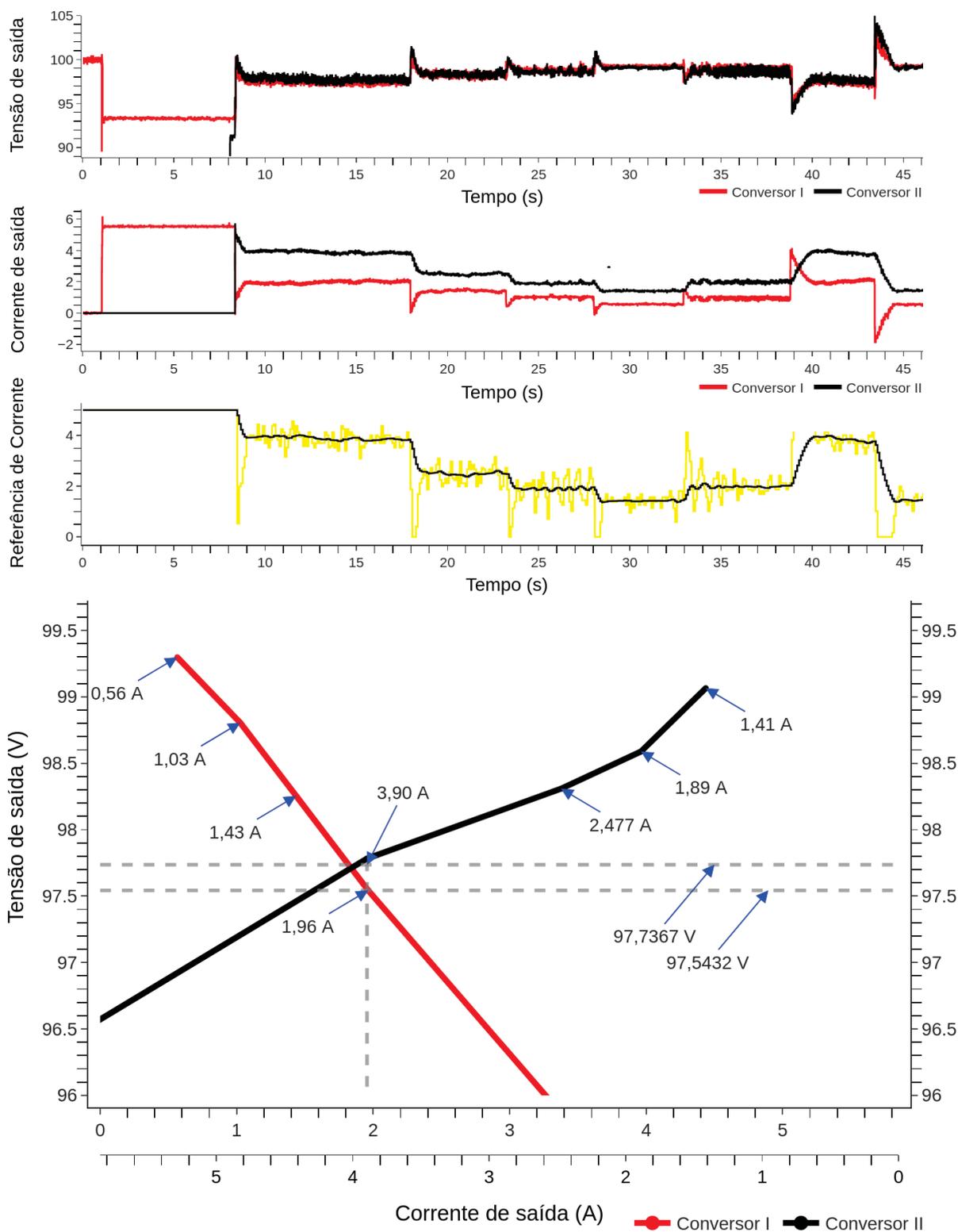
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 58 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário VI - 1,2  $\Omega$  e 0,6  $\Omega$ 

Fonte: O autor (2022)

FIGURA 59 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário VI - 1,2  $\Omega$  e 1,2  $\Omega$ 

Fonte: O autor (2022)

FIGURA 60 – Degrau de carga para o *droop* externo do Cenário VI - 1,2  $\Omega$  e 0,6  $\Omega$ 

Fonte: O autor (2022)

## 5.7 DISCUSSÃO E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

### 5.7.1 Coeficiente *droop* parametrizado e medido

Os primeiros cenários da dissertação visaram validar o comissionamento do equipamento, bem como os controles interno e externo *droop* no conversor.

Durante os degraus de carga aplicados no barramento da MR CC, o controle *droop* comportou-se conforme o esperado, apresentando uma queda de tensão proporcional ao coeficiente *droop* parametrizado.

Tanto o coeficiente *droop* parametrizado no CLP quanto o coeficiente *droop* interno à malha de controle do conversor mantiveram diferenças abaixo de 1% em relação aos coeficientes *droop* medidos e parametrizados. Os valores do coeficiente parametrizado ( $R_{dp}$ ) e do coeficiente *droop* medido ( $R_d$ ) apresentados no cenário I, cenário II e cenário III são apresentados na tabela 40.

TABELA 40 – Coeficiente *droop* parametrizado e coeficiente *droop* medido

(a) Droop Interno - Fonte de Tensão		(b) Droop Externo - Fonte de Tensão		(c) Droop Externo - Fonte de Corrente	
$R_{dp}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_d$	$R_{dp}$	$R_d$
0.6		0.6		0.6	
	0.6097		0.5963		0.586
	0.6064		0.6032		0.5941
	0.6049		0.5994		0.5973
	0.6034		0.5993		0.6506
1.2		1.2		1.2	
	1.2179		1.2022		1.1906
	1.21		1.1957		1.1947
	1.21		1.2034		1.199
	1.2056		1.2026		1.2275
1.8		1.8		1.8	
	1.8161		1.8023		1.7905
	1.8103		1.7968		1.7939
	1.8069		1.8003		1.8
	1.8057		1.8007		1.797
2.4		2.4		2.4	
	2.4284		2.3966		2.3895
	2.4167		2.4012		2.3919
	2.4137		2.3977		2.4018
	2.4089		2.3992		2.3967

Fonte: O autor (2022)

### 5.7.2 Tempos de resposta para um degrau de carga

Inicialmente, realizou-se a análise comparativa dos tempos de resposta de cada controle. Para os conversores atuando no modo FT e coeficiente *droop* de 1,2  $\Omega$ , o tempo de transporte do controlador interno foi de 2 ms, enquanto que o do controlador

externo foi de 30,5 ms. Os tempos de estabilização da tensão foram de 3 ms e 14 ms, para valores de tensão de saída bastante próximos.

Foi observado que a malha de controle interna de tensão atua antes do controle *droop* externo, resultando no restabelecimento da tensão após o afundamento de tensão provocado pela entrada de cargas na rede. Além disso, constatou-se que o tempo de resposta do controle interno do conversor é cerca de quinze vezes mais rápido do que o tempo de resposta do controle externo.

Para a condição de coeficiente *droop* de  $0,6 \Omega$  no controle interno e também no externo atuando no mesmo conversor, foi possível verificar um aumento do tempo de transporte e diminuição do tempo de estabilização da tensão, em comparação com o coeficiente *droop* de  $1,2 \Omega$ . Os valores de tempo de transporte ( $T_m$ ), tempo de estabilização ( $T_e$ ) e tensão média de saída no conversor ( $V_m$ ) estão apresentados na Tabela 41.

TABELA 41 – Degrau de carga para o controle *droop* ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ): Fonte de Tensão

(a) Droop Interno			(b) Droop Externo		
$T_m$	$T_e$	$V_m$	$T_m$	$T_e$	$V_m$
2 ms	3 ms	137,8 V	30,5 ms	14 ms	137,47 V

(c) Droop Interno e Externo		
$T_m$	$T_e$	$V_m$
18 ms	10,5 ms	137,6 V

Fonte: O autor (2022)

### 5.7.3 Controle *droop*: fonte de tensão e fonte de corrente

Para analisar o compartilhamento de carga em cada conversor, foram estabelecidas três faixas de cargas impostas durante os degraus de carga. Essas faixas foram definidas com base na carga inserida no barramento CC ao qual os conversores estão conectados. Os dados retirados desta seção são provenientes dos cenários V e VI.

A faixa de baixa carga foi estabelecida entre  $16 \Omega$  e  $30 \Omega$ , a faixa de média carga foi definida entre  $30 \Omega$  e  $50 \Omega$ , e a faixa de alta carga foi estabelecida entre  $50 \Omega$  e  $80 \Omega$ . A Figura 61 ilustra as faixas de carga utilizando diferentes cores para cada faixa.

FIGURA 61 – Faixas de carga na rede CC



Fonte: O autor (2022)

Dois conversores operando em paralelo foram submetidos a um degrau de carga sob condição de alta carga. Em seguida, o compartilhamento de carga foi comparado em duas situações de operação distintas. Na primeira situação, os conversores atuaram com o controle externo de *droop* e operaram no modo FT. Já na segunda situação, ambos os conversores também foram submetidos ao controle externo, porém o primeiro operou no modo FT e o segundo como FC.

Quando o valor do coeficiente de *droop* é  $1,2 \Omega$  e são iguais para os dois conversores, o compartilhamento de carga deveria apresentar proporções de corrente de 50% em cada conversor. Na primeira situação, foram observados erros no compartilhamento de carga de 1,39%, enquanto na segunda situação o erro foi de 3,87%.

Em situações em que os coeficientes de *droop* são diferentes, sendo um coeficiente igual a  $1,2 \Omega$  e o outro igual a  $0,6 \Omega$ , é esperado uma proporção de corrente de 33,33% e 66,66%, respectivamente. Na primeira situação, o erro observado foi de 6,03%, enquanto na segunda situação o erro medido foi de 0,54%.

Quando os coeficientes *droop* são iguais, as duas abordagens apresentaram compartilhamento de carga muito próximo, no entanto os conversores operando como FT apresentaram resultados melhores. Enquanto isso, para coeficientes *droop* diferentes, os conversores atuando como FT e o outro como FC apresentaram melhores resultados.

Os dados medidos de regulação de tensão ( $V_r$ ) e compartilhamento de carga ( $I_e$ ) podem ser vistos na Tabela 42 e na Tabela 43.

TABELA 42 – Controle *droop* ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ )  
 (a) FT e FC em paralelo (b) FT em paralelo

	$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$		$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$
FT I	97,81 V	53,87 %	Alta	FT I	97,80 V	51,39 %	Alta
FC II	97,42 V	46,12 %		FT II	97,63 V	48,60 %	

Fonte: O autor (2022)

TABELA 43 – Controle *droop* ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $0,6 \Omega$ )  
 (a) FT e FC em paralelo (b) FT em paralelo

	$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$		$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$
FT I	97,58 V	67,21 %	Alta	FT I	98,18 V	60,63 %	Alta
FC II	97,6 V	32,79 %		FT II	98,59 V	39,36 %	

Fonte: O autor (2022)

A diferença no compartilhamento de carga é proveniente da diferença de medição de tensão em cada conversor. Como visto, esse erro não é constante e diminuiu para coeficientes *droop* diferentes. A regulação de tensão foi proporcional às cargas na rede, como esperado, em todas as situações.

#### 5.7.4 Degraus de carga para diferentes faixas de carga

Analisando a diferença no compartilhamento de carga ao longo de um dia típico na MR CC, foram realizadas medições de corrente e tensão de saída do conversor durante variações de carga em diversas faixas para ambas as situações com coeficientes de *droop* iguais.

O controle *droop* é amplamente utilizado para promover o compartilhamento de carga entre conversores em paralelo. Para avaliar a eficácia dessa técnica, foram comparadas em uma primeira abordagem com um conversor operando como FT e o outro como FC e na segunda abordagem os dois conversores operando como FT. Ambas abordagens são referentes ao cenário V e cenário VI.

Foi verificado que, na primeira situação em que os conversores atuavam como FT, ocorreu um compartilhamento de corrente consistente para diferentes níveis de carga. Entretanto, na segunda situação, os conversores apresentaram um compartilhamento desigual para a condição de baixa carga. No entanto, à medida que a carga aumentava, verificou-se uma mudança considerável no compartilhamento de carga, chegando a alcançar um melhor compartilhamento do que na primeira situação.

Os dados medidos de tensão de saída em cada conversor ( $V_{cc}$ ), compartilhamento de carga ( $I_e$ ) e a carga na rede ( $R_c$ ) podem ser vistos na Tabela 44.

TABELA 44 – Controle *droop* ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ ) - Diversas Cargas  
(a) FT e FC em paralelo (b) FT em paralelo

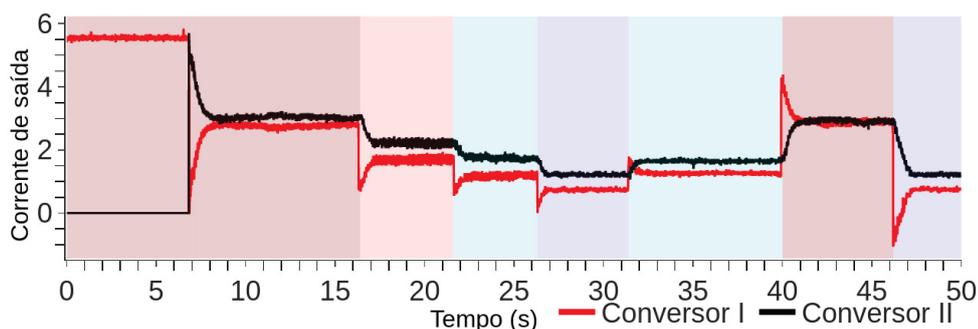
	$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$		$V_{cc}$	$I_e$	$R_c$
FT I	98,51 V	37,62 %	Baixa	FT I	98,84 V	48,47 %	Baixa
FC II	99,05 V	62,28 %		FT II	98,89 V	51,52 %	
FT I	97,91 V	43,43 %	Média	FT I	98,54 V	48,54 %	Média
FC II	98,42 V	56,57 %		FT II	98,61 V	51,46 %	
FT I	97,80 V	42,96 %	Alta	FT I	97,77 V	48,98 %	Alta
FC II	98,03 V	57,04 %		FT II	97,84 V	51,01 %	
FT I	96,26 V	49,54 %	Alta				
FC II	96,46 V	50,46 %					

Fonte: O autor (2022)

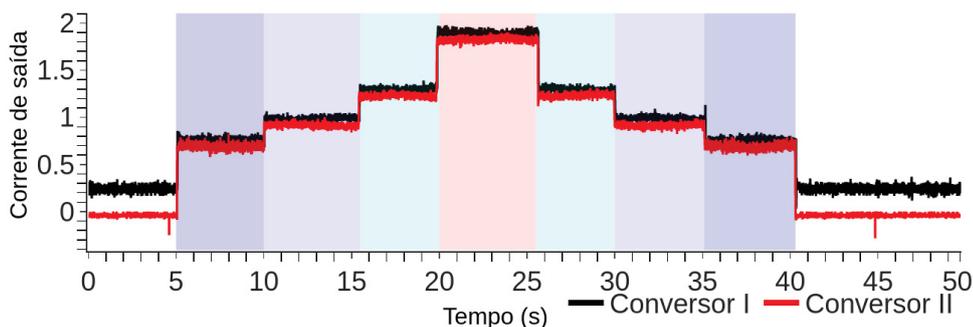
Foi observado que a variação de compartilhamento de corrente é mais expressiva no cenário em que a FC atua, uma vez que, para cargas maiores, o compartilhamento de carga se torna mais equilibrado. Em contrapartida, no cenário em que ambos os conversores operam como FT, o compartilhamento de carga se mantém constante durante a variação de carga na rede.

As curvas de tensão, corrente e as faixas de carga utilizadas nas análises anteriores estão apresentadas nas Figura 62 e Figura 63.

FIGURA 62 – Compartilhamento de carga ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ )  
(a) Fonte de Tensão e Corrente em paralelo



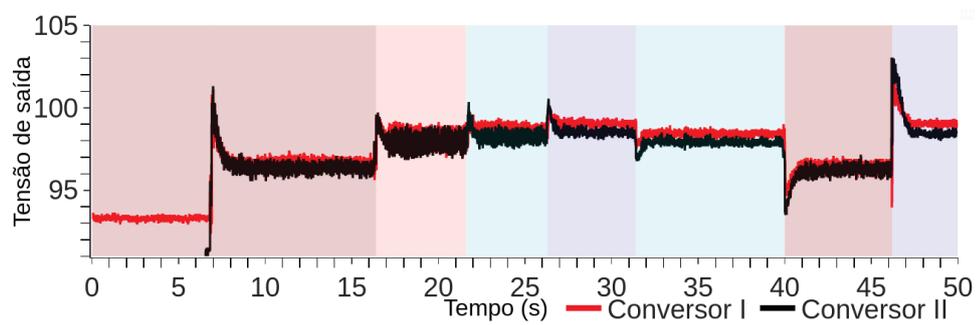
(b) Fonte de Tensão em paralelo



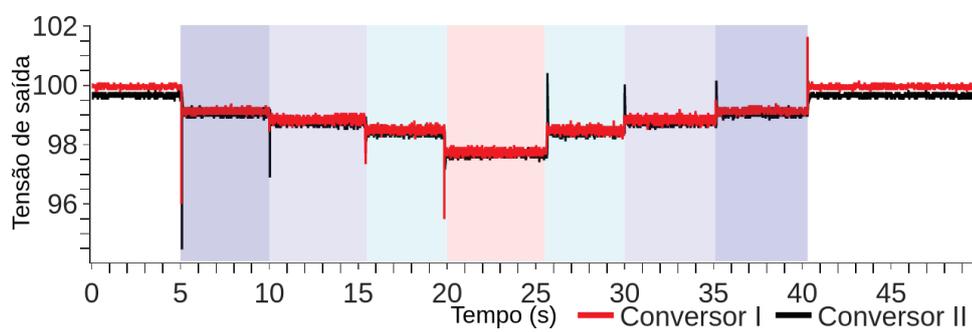
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 63 – Regulação de tensão ( $R_{d_{ext}} = 1,2 \Omega$  e  $1,2 \Omega$ )

(a) Fonte de Tensão e Corrente em paralelo



(b) Fonte de Tensão em paralelo



Fonte: O autor (2022)

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação apresentou a aplicação prática do paralelismo em conversores de potência, utilizando o controle *droop* implementado em um CLP, para tornar uma MR CC operacional.

Foi realizada a comunicação entre o CLP e os equipamentos da MR, e a implementação de um sistema de supervisão e aquisição de dados que foi capaz de monitorar e controlar os parâmetros envolvidos nas estratégias de controle.

O controle *droop* padrão do conversor tem limitações, pois está restrito a uma faixa fixa de valores e não permite modificações em tempo real. No entanto, o controle externo proposto supera essas limitações, permitindo ajustes em tempo real e a aplicação de estratégias de controle flexíveis.

Os resultados obtidos demonstraram a implementação bem-sucedida do controle *droop* para variados níveis de cargas. Foram aferidos resultados satisfatórios de estabilidade de tensão para a operação isolada dos conversores utilizando o controle *droop*.

As análises realizadas verificaram o funcionamento das malhas de controle *droop* para conversores operando no modo FT e no modo FC, tanto individualmente quanto na operação em paralelo. Além disso, foram realizados estudos comparativos para coeficientes *droop* iguais e diferentes e sua dependência do compartilhamento de corrente em relação à carga na rede.

Verificou-se que o paralelismo dos conversores com coeficientes *droop* iguais, tanto em modos de operação iguais como diferentes, produziram resultados similares, porém alcançaram resultados melhores para cargas mais elevadas na rede. Isso ocorre em grande parte devido à instabilidade dos sensores de corrente em baixas cargas, principalmente porque o conversor foi projetado para trabalhar em média tensão.

O paralelismo dos conversores com diferentes modos de operação e coeficientes *droop* diferentes resultaram em proporções bastante consistentes com os coeficientes parametrizados para a maioria das cargas. De forma geral, os resultados sugerem que a diferença de compartilhamento de carga entre os conversores pode ser reduzido com o aumento da potência das cargas conectadas na rede, ou por meio do uso intencional de SAEs com capacidades nominais diferentes.

Os resultados obtidos nesta dissertação demonstraram que o controle *droop* implementado em um CLP industrial pode ser uma ferramenta eficiente para a flexibilização de estratégias de controle em conversores CC-CC. Esses resultados podem

contribuir para o aprimoramento da aplicação prática do paralelismo em conversores de potência e para o desenvolvimento de estratégias de diferentes controles hierárquicos.

Com base nos resultados obtidos e levando em consideração as diversas oportunidades de exploração do tema, são sugeridas possibilidades para futuros trabalhos.

A primeira sugestão consiste no desenvolvimento de um controle *droop* adaptativo, considerando o estado de carga da bateria.

Outra possibilidade seria realizar estudos de estabilidade para pequenos ou grandes sinais, utilizando uma função de transferência apropriada dos conversores de potência.

Por fim, seria relevante desenvolver controles em níveis hierárquicos superiores, permitindo a simulação do nível secundário e terciário no mesmo controlador.

## REFERÊNCIAS

- AKINYELE, Daniel; BELIKOV, Juri; LEVRON, Yoash. Challenges of microgrids in remote communities: A STEEP model application. **Energies**, v. 11, n. 2, 2018. ISSN 19961073. DOI: 10.3390/en11020432.
- ANAND, Sandeep; FERNANDES, Baylon G.; GUERRERO, Josep M. 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, 2013. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2215055.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL**, Brasília, DF, 17 abr. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL**, Brasília, DF, 24 nov. 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.
- BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 6 jan. 2022. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=07/01/2022&jornal=515&pagina=4>>.
- CHEN, Fang et al. A nonlinear droop method to improve voltage regulation and load sharing in DC systems. **IEEE 1st International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2015**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 45–50, jul. 2015. DOI: 10.1109/ICDCM.2015.7152008.
- DIAZ, Nelson L et al. Intelligent Distributed Generation and Storage Units for DC Microgrids—A New Concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 5, p. 2476–2485, jun. 2014. ISSN 1949-3053, 1949-3061. DOI: 10.1109/TSG.2014.2341740. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6874575/%20https://vbn.aau.dk/ws/files/201725324/finalpaper12.pdf>>.
- DRAGICEVIC, Tomislav 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. 2014. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2257857. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6497633/>>.
- GAO, Fei et al. Coordinated control of a DC electrical power system in the more electric aircraft integrated with energy storage. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 5431–5438, out. 2015. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310424.

GUERRERO, Josep 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, jun. 2011. ISSN 02780046. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5546958/>>.

ISHIGAKI, Masanori; SHIN, Jongwon; DEDE, Ercan M. A Novel Soft Switching Bidirectional DC-DC Converter Using Magnetic and Capacitive Hybrid Power Transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 32, n. 9, p. 6961–6970, set. 2017. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2624024.

KAKIGANO, H.; NISHINO, A.; ISE, T. Distribution voltage control for DC microgrid with fuzzy control and gain-scheduling control. **8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", ICPE 2011-ECCE Asia**, p. 256–263, 2011. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944599.

KARLSSON, Per. **DC Distributed Power Systems - Analysis, Design and Control for a Renewable Energy System**. 2002. Sweden. ISBN 91-88934-25-X. Disponível em: <<http://lup.lub.lu.se/record/20667/file/716070.pdf>>.

LI, Chendan; VASQUEZ, Juan C.; GUERRERO, Josep M. Multiagent-based distributed control for operation cost minimization of droop controlled DC microgrid using incremental cost consensus. **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 5202–5205, 2015. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392917.

LIU, Yiqi et al. Enhanced load power sharing accuracy in droop-controlled DC microgrids with both mesh and radial configurations. en. **Energies**, v. 8, n. 5, p. 3591–3605, ago. 2015. ISSN 19961073. DOI: 10.3390/en8053591. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/3591>>.

LOPES, J. A. Peças; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 916–924, mai. 2006. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.873018.

LU, Xiaonan; GUERRERO, Josep M. 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, jun. 2014. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2266419. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6531679/>>.

LU, Xiaonan; SUN, Kai et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 6, n. 1, p. 147–157, jan. 2015. ISSN 19493053. DOI: 10.1109/TSG.2014.2352342.

LU, Xiaonan; SUN, Kai et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 6, p. 2804–2815, jun. 2014. ISSN 02780046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2279374. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6584748/>>.

LUO, Shiguo et al. Classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, IEEE, v. 2, p. 901–908, 1999. ISSN 02759306. DOI: 10.1109/pesc.1999.785618.

MA, Weiwu; FANG, Song; LIU, Gang. Hybrid optimization method and seasonal operation strategy for distributed energy system integrating CCHP, photovoltaic and ground source heat pump. **Energy**, Pergamon, v. 141, p. 1439–1455, dez. 2017. ISSN 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.081.

MAKNOUNINEJAD, Ali et al. Optimal, nonlinear, and distributed designs of droop controls for DC microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 5, p. 2508–2516, ago. 2014. ISSN 19493053. DOI: 10.1109/TSG.2014.2325855. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6894269/>>.

MARCELINO, Frederico L.F. **Paralelismo de unidades de armazenamento de energia conectadas em uma microrrede c.c.** Jun. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-APGMR7>>.

MARCELINO, Frederico L.F. et al. A comparative study of Droop Compensation Functions for State-of-Charge based adaptive droop control for Distributed Energy Storage Systems. **IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems**, p. 1–8, 2017. DOI: 10.1109/PEDG.2017.7972492. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7972492>>.

MARNAY, Chris et al. Microgrid evolution roadmap. **International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies, EDST 2015**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 139–144, nov. 2015. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315197.

NAVIGANT RESEARCH. **Market Drivers, Barriers, Business Models, Innovators, and Key Market Segment Forecasts.** Published. [S.l.], 2019. P. 72. Disponível em: <<https://www.navigantresearch.com/reports/microgrids-overview>>.

OLIVARES, Daniel E. et al. Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. ISSN 19493053. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514.

OLIVEIRA, Thiago Ribeiro. **Distribuição Local de Energia em Corrente Contínua: Estudo, Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Nanorede CC Dedicado aos Setores Residencial e Comercial**. Abr. 2016. F. 340. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A96N3D>>.

PRABHAKARAN, Prajof; GOYAL, Yogendra; AGARWAL, Vivek. Novel nonlinear droop control techniques to overcome the load sharing and voltage regulation issues in DC Microgrid. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 5, p. 4477–4487, ago. 2018. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2723045. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7967860/>>.

SAMSUNG. **Introduction of 21700 50E**. [S.l.]: Samsung SDI Co. Ltd. r, 2018.

SHAFIEE, Qobad et al. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 29, n. 4, p. 922–933, jun. 2014. ISSN 08858969. DOI: 10.1109/TEC.2014.2362191. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6939722>>.

SHEHATA, E. G. et al. An Improved Droop Control for a Low Voltage DC Microgrid Operation. **20th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2018 - Proceedings**, IEEE, p. 850–855, 2019. DOI: 10.1109/MEPCON.2018.8635258.

SIEMENS. **Sinamics DCP - Operating Instructions**. [S.l.]: Siemens - Division Process Industries Drives, 2016.

TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. **World Electric Vehicle Journal**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 2, p. 289–298, jun. 2009. ISSN 20326653. DOI: 10.3390/wevj3020289. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2032-6653/3/2/289>>.

WANG, Panbao 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, jun. 2016. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2499310. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7323851/>>.

XU, Guo; SHA, Deshang; LIAO, Xiaozhong. Decentralized inverse-droop control for input-series-output-parallel DC-DC Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 30, n. 9, p. 4621–4625, set. 2015. ISSN 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2396898.

YANG, Bao et al. Design of Bidirectional DC-DC Converter Control Based on Arrange the Transition Process. **Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, p. 5064–5069, jun. 2019. DOI: 10.1109/CCDC.2019.8832650.

ZHANG, Justin Zuopeng et al. Big data analytics and machine learning: A retrospective overview and bibliometric analysis. **Expert Systems with Applications**, Pergamon, v. 184, p. 115561, dez. 2021. ISSN 09574174. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115561.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – COMISSIONAMENTO: CONVERSOR SINAMICS DCP

### A.1 COMISSIONAMENTO E COMUNICAÇÃO

Para parametrização inicial e diagnóstico do conversor de potência foram configurados inicialmente telegramas no software STARTER, via protocolo de comunicação PROFINET. Os telegramas são pacotes de dados pré-definidos na memória dos equipamentos da fabricante SIEMENS, que são utilizados para a comunicação.

Com a utilização dos telegramas, o conversor de potência atua como um dispositivo controlável, portanto, pode receber dados do controlador, enviar dados e atuar como dispositivo I/O (Input/Output) em uma rede de campo PROFINET.

O conversor não possui suporte a telegramas padronizados em sua configuração, a única maneira de processar as informações de leitura ou de escrita é com o uso da tecnologia de conectores e binectores (BICO). Essa técnica tem sido o método utilizado para programar equipamentos sem pré-configuração de telegramas em equipamentos da fabricante SIEMENS.

Por sua vez, cada telegrama possui subdivisões que são chamadas de dados de processo ou PZD (da palavra alemã prozessdaten). A parametrização de cada PZD permite, na rede PROFINET, a troca de dados entre o equipamento e o controlador ciclicamente.

Para os dois módulos, que são, respectivamente, a unidade avançada de controle (CU\_DCP) e a unidade de controle de malha fechada (DCP\_CTRL). No módulo DCP\_CTRL, foram configurados telegramas de comprimento de 16/16, o que significa que há alocação de 32 bytes nas direções de envio e 32 bytes nas direções de recebimento na rede. O funcionamento dos módulos ocorre de forma independente durante a operação do equipamento, e os parâmetros variam de acordo com a funcionalidade de cada módulo.

Em cada módulo, existem parâmetros apropriados que permitem a escrita e a leitura dos dados. Os parâmetros que possuem início com a letra "r" podem ser apenas lidos, enquanto parâmetros com a letra "p" podem ser lidos e escritos. Na tabela de parâmetros gerais do conversor SINAMICS DCP, é possível verificar o nome do parâmetro, a descrição, sua respectiva alocação de memória e os valores permitidos pelo equipamento para comissionamento inicial.

Dentre os parâmetros utilizados no equipamento, está o parâmetro p55100, que informa a altitude do local de instalação do equipamento, o parâmetro p55105 que se refere à menor tensão possível no equipamento, e o parâmetro p55081 que seleciona o tipo de sobrecarga de corrente que o equipamento poderá ser exposto. Para a parametrização geral do conversor, é necessário configurar dois módulos, a

unidade avançada de controle (CU\_DCP) e a unidade de controle de malha fechada (DCP\_CTRL).

Por fim, para a inicialização do equipamento, é necessário que o parâmetro p0010 esteja na opção "pronto para iniciar". Além disso, para a parametrização geral do conversor, é necessário configurar os parâmetros p0840, p0852 e p0854 para o modo fonte de tensão ou modo fonte de corrente, e o parâmetro p55352 para representar a tensão nominal de pré-carga. Também é necessário escolher o lado de pré-carga no qual a tensão será imposta, definido pelo parâmetro p55350.

## A.2 CONTROLE DE MALHA FECHADA DE TENSÃO

Inicialmente, no controle de malha fechada de tensão, é necessário selecionar alguns parâmetros. O sinal de entrada de tensão, também chamado de sinal de referência de tensão, deve ser enviado para o parâmetro p54100. O sinal representa a tensão nominal de saída do equipamento e, em seguida, uma rampa de tensão recebe o sinal que foi enviado. O tempo máximo da atuação da rampa é determinado no parâmetro p54101.

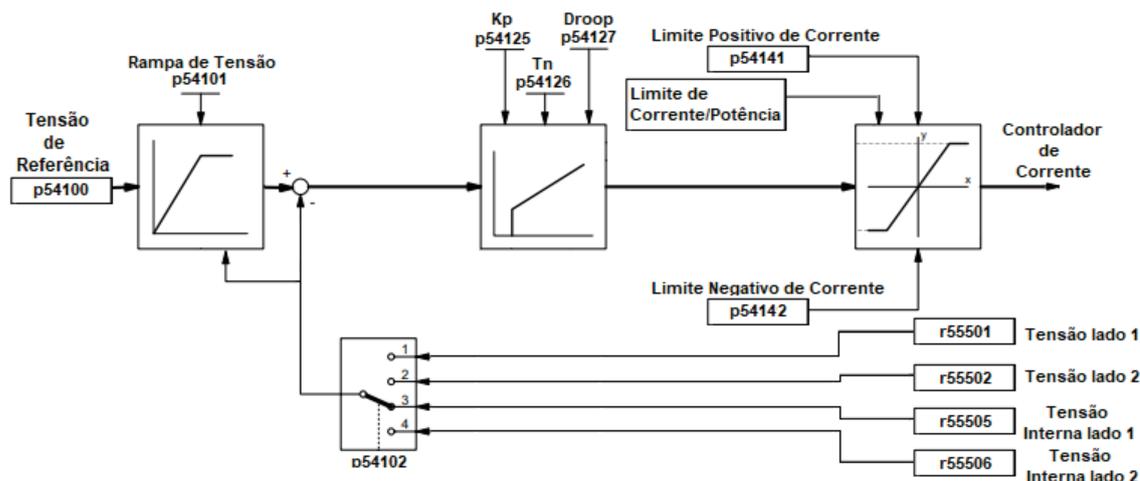
O sinal de entrada de tensão é comparado com um sinal selecionado na malha de controle de tensão do conversor CC-CC. O sinal selecionado pode ser escolhido entre a tensão do lado 1 (r55501), a tensão do lado 2 (r55502), a tensão do lado 1 interna (r55505) e a tensão do lado 2 interna (r55506). O conceito de tensão interna do conversor será aprofundado mais à frente.

O desvio entre os dois sinais de tensão é enviado ao controlador proporcional integral. No controlador proporcional integral é possível parametrizar o ganho proporcional (p54125) e o tempo integral (p54126), como também, se necessário, o ganho estático (p54127), este último é equivalente ao coeficiente *droop* interno ao equipamento. O sinal resultante do controle proporcional integral é enviado para o limitador de potência e para um limitador de corrente. Esse último tem a possibilidade de limitar a corrente dos dois lados do conversor CC-CC, sendo representados pelo sinal positivo de corrente (p54141) e pelo sinal negativo de corrente (p54142).

Dessa forma, o sinal de saída da limitação de corrente é enviado para o controlador de corrente e, em seguida, para os módulos de potência. Como pode ser observado, o controle de malha fechada de tensão é implementado em cascata com o controle de corrente.

A Figura 64 apresenta o controle de malha fechada de tensão do SINAMICS DCP e seus respectivos parâmetros, comentados anteriormente.

FIGURA 64 – Controle de malha fechada de tensão do SINAMICS DCP 30kW



Fonte: O autor (2022)

### A.3 CONTROLE DE MALHA FECHADA DE CORRENTE

No controle de malha fechada de corrente, o sinal de corrente deve ser enviado pelo parâmetro p55050, que representa a corrente nominal de saída do equipamento para as cargas e, em seguida, para a rampa de corrente, que recebe o sinal que foi enviado. O tempo máximo de atuação da rampa é determinado pelo parâmetro p54101.

O parâmetro p55065 seleciona o tempo mínimo que o sinal de corrente deve demorar para estar próximo do sinal de corrente da entrada selecionada. O desvio mínimo aceito dentro desse tempo definido é escolhido pelo parâmetro p55056. Ambos os parâmetros podem acionar a proteção do equipamento caso não sejam validados.

Na sequência, o sinal de entrada alimenta a malha fechada de corrente. Na malha, o sinal de entrada é comparado com um sinal selecionado. O sinal selecionado que será comparado com o sinal de entrada pode ser escolhido entre a corrente do lado 1 (r55541), a corrente do lado 2 (r55542) ou a potência de saída (r55540).

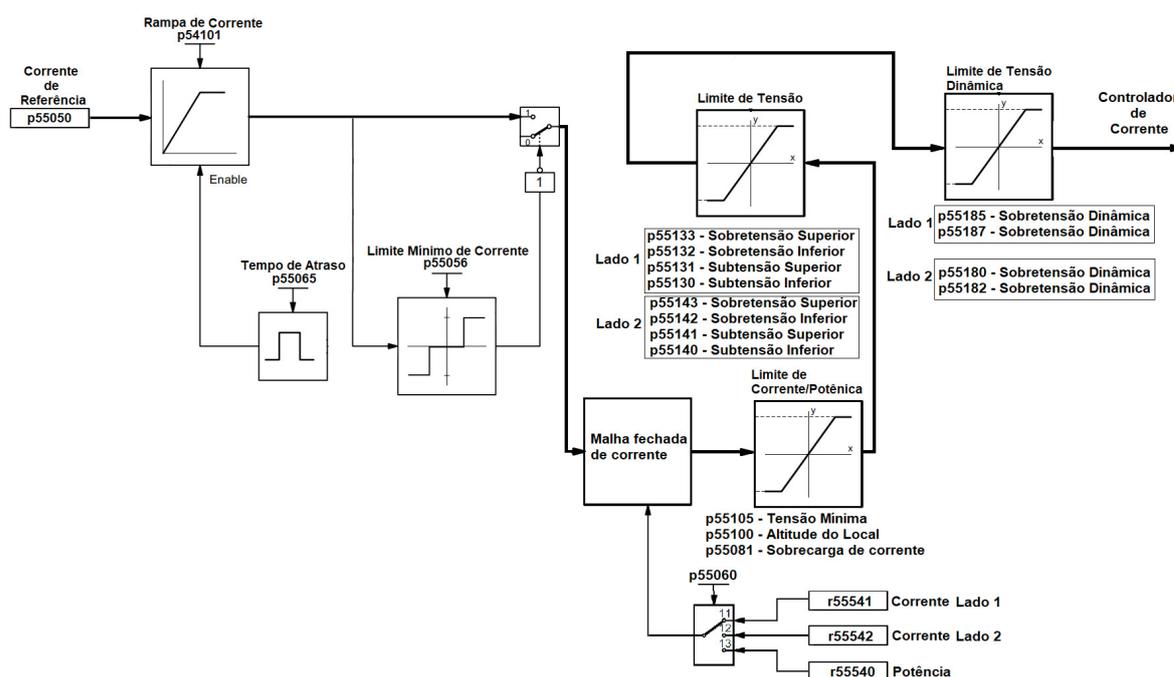
Após a comparação, o desvio é enviado para um limitador de potência/corrente. O sinal é limitado por faixas de limite de tensão inferior e superior que são parametrizadas pelos endereços de memória definidos por p55130, p55131 para subtensão do lado 1 e p55140, p55141 para subtensão do lado 2; os parâmetros p55132, p55133 para sobretensão do lado 1 e os parâmetros p55142 e p55143 para sobretensão do lado 2.

O limite de tensão opera em função da corrente de saída do conversor, que é reduzida quando alcança os valores inferiores da limitação, e para os valores superiores de limitação o sinal de corrente é anulado.

Por fim, o sinal resultante da limitação de tensão passa pelo limite de tensão dinâmica que também atua na corrente de saída do conversor de acordo com os parâmetros p55185 ou p55187 para o lado 1, e os parâmetros p55180 ou p55182 para o lado 2. O limite de tensão dinâmica atua anulando a corrente instantaneamente quando o valor definido pelo parâmetro é alcançado.

A Figura 65 apresenta o controle de malha fechada de corrente do SINAMICS DCP e seus respectivos parâmetros, comentados anteriormente.

FIGURA 65 – Controle de malha fechada de corrente do SINAMICS DCP 30kW



Fonte: O autor (2022)

## APÊNDICE B – PARÂMETROS GERAIS DO CONVERSOR

TABELA 45 – Parâmetros Gerais do conversor SINAMICS DCP

Parâmetro	Função	Valor
p0003	Nível de Acesso	[3] Expert
p0010	Filtro de parâmetros	[0] Ready
p55100	Altitude do local	-
p0840	Sinal para início/parada da operação	r2050[0] - r2090.0
p0852	Sinal para habilitar a operação	r2050[0] - r2090.1
p55350	Seleção do tipo de pré-carregamento	[2]
p55352	Tensão de entrada para o pré-carregamento	r2050[2]
p54141	Limite da corrente positiva	r2050[4] = 0% - 200%
p54142	Limite da corrente negativa	r2050[5] = 0% - 200%
p55130	Lado 1: limite mínimo da proteção de subtensão	-
p55131	Lado 1: limite máximo da proteção de subtensão	-
p55132	Lado 1: limite mínimo da proteção de sobretensão	-
p55133	Lado 1: limite máximo da proteção de sobretensão	-
p55140	Lado 2: limite mínimo da proteção de subtensão	-
p55141	Lado 2: limite máximo da proteção de subtensão	-
p55142	Lado 2: limite mínimo da proteção de sobretensão	-
p55143	Lado 2: limite máximo da proteção de sobretensão	-

TABELA 46 – Parâmetros de operação: Fonte de corrente

Parâmetro	Função	Valor Nominal
p54145	Habilitar controle de tensão	1
p54105	Ativar o controle de tensão	0
p55050	Setpoint de corrente	r2050[6] = 0% - 100%
p54100	Setpoint de tensão	100%
p55060	Lado do controle de corrente	[11]
p54102	Lado do controle de tensão	[3]

TABELA 47 – Parâmetros de operação: Fonte de tensão

Parâmetro	Função	Valor Nominal
p54145	Habilitar controle de tensão	1
p54105	Ativar o controle de tensão	1
p54100	Setpoint de tensão	r2050[1] = 0% - 100%
p54102	Lado do controle de tensão	[1]

## APÊNDICE C – FILTRO PASSA BAIXA

O filtro passa-baixa é utilizado para reduzir altas frequências ou ruídos aleatórios nas medições de sinais. Um filtro passa-baixa digital em um sistema de controle pode ser referido como um filtro discreto de primeira ordem ou um filtro de constante de tempo.

O método de discretização do filtro passa-baixa pode ser calculado através do método de Euler na função de transferência de Laplace de um filtro passa-baixa de primeira ordem.

A função de transferência de Laplace de um filtro passa-baixa de primeira ordem no tempo contínuo pode ser calculada como:

$$H_{FP}(s) = \frac{Is(s)}{Ie(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

onde T é a constante de tempo,  $e(s)$  é a entrada do sinal no filtro e  $s(s)$  é a saída do sinal no filtro. Resolvendo a igualdade com a multiplicação cruzada:

$$(Ts + 1) \times s(s) = e(s)$$

Resolvendo os parenteses:

$$Ts \times s \times s(s) + s(s) = e(s)$$

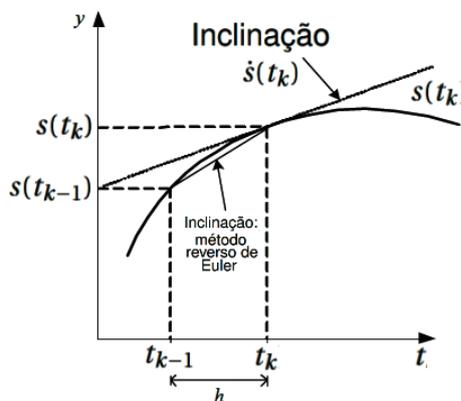
Utilizando da transformação inversa de Laplace em ambos os lados da equação é gerada uma função diferencial:

$$Ts \times \dot{s}(t_{k-1}) + s(t_k) = e(t_k)$$

o termo  $t_k$  representa o valor do tempo instantâneo.

A Figura 66 apresenta a reta de aproximação referente a inclinação no método reverso de Euler:

FIGURA 66 – Aproximação da derivada no tempo para o método reverso de Euler



Fonte: O autor (2022)

Pode-se substituir a inclinação do método reverso de Euler pela derivada do tempo, para uma aproximação:

$$\hat{s}(t_k) \approx \frac{s(t_k) - s(t_{k-1})}{h}$$

Da Figura 66 a equação da reta pode ser calculada como:

$$T \times \frac{s(t_k) - s(t_{k-1})}{h} + s(t_k) = e(t_k)$$

Resolvendo para  $s(t_k)$ :

$$s(t_k) = \frac{T}{T+h} \times s(t_{k-1}) + \frac{h}{T+h} \times e(t_k)$$

onde  $s(t_k)$  é a saída do filtro passa baixa em função de uma constante de tempo e um tempo de ciclo  $h$ .

A equação também pode ser reescrita utilizando o termo  $\alpha$ :

$$s(t_k) = (1 - \alpha) \times s(t_{k-1}) + \alpha \times e(t_k)$$

$$\alpha = \frac{h}{T+h}$$

No método reverso de Euler, a reta de aproximação é desenhada no ponto final da etapa do intervalo de tempo. A inclinação dessa reta é determinada pela diferença entre o valor da saída do filtro no final da etapa do intervalo de tempo e o valor da entrada do filtro naquele mesmo ponto. O tempo instantâneo no qual essa inclinação é calculada é o valor final do intervalo de tempo, representado pelo termo  $t_k$ .

Esse método é uma técnica de discretização de equações diferenciais que aproxima a solução no ponto final de cada intervalo de tempo, em vez de no início do intervalo, como no método de Euler explícito.

A equação acima também é chamada de média móvel ponderada exponencialmente, e representa o filtro passa baixa de primeira ordem.

O filtro passa baixa funciona de modo que o sinal inicial de saída  $s_{(tk)}$  do filtro é uma função do sinal de entrada  $e_{(tk)}$  e do sinal de saída no tempo anteriormente medido  $s_{(tk-1)}$ .

A cada ciclo de execução um novo valor entra no filtro, esse valor é armazenado e o valor anterior é descartado, o filtro calcula a média de todos os valores armazenados, que se torna a nova saída do filtro.

O primeiro termo do lado esquerdo da equação corresponde à resposta forçada à entrada do sistema e o segundo termo representa a resposta do sistema na condição inicial.