



CONTROLE DIRETO DE TENSÃO USANDO O D²VC NO REFERENCIAL $\alpha\beta$

Elienai de Oliveira Macedo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Rio de Janeiro

Maio de 2021

CONTROLE DIRETO DE TENSÃO USANDO O D²VC NO REFERENCIAL $\alpha\beta$

Elienai de Oliveira Macedo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Aprovada por: Prof. Robson Francisco da Silva Dias

Prof. Edson Hirokazu Watanabe

Prof. Silvangela Lilian da Silva Lima Barcelos

Prof. José Andrés Santisteban Larrea

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2021

Macedo, Elienai de Oliveira

Controle Direto de tensão usando o D²VC no referencial $\alpha\beta$ /Elienai de Oliveira Macedo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XVIII, 124 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 112 – 117.

1. Controle direto. 2. Referencial $\alpha\beta$. 3. Desequilíbrio. I. Dias, Robson Francisco da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Soli Deo Gloria.

Agradecimentos

Antes de tudo, agradeço ao Deus da minha vida! Por ter me guiado até aqui e me dado forças para prosseguir.

Eu agradeço à minha fiel e companheira esposa Luiza, que me inspirou a iniciar este mestrado, me encorajando e sempre acreditando em mim, mais do que eu mesmo! Por me amar e compreender, me dando toda a força para trilhar os caminhos que se estendem diante de mim e por querer me acompanhar até o fim deles! Te amo! Eu tenho um pacto contigo!

Agradeço aos meus pais, Edilson, Jussara e à minha irmã Elisama, que durante a minha vida foram a base e incentivo para ser uma pessoa melhor! Agradeço também o meu sogro Deusdedit por mostrar que podemos encarar a vida sempre com bom humor e fé em Deus. Também faço lembrança à minha sogra Sandra (*in memoriam*), que me considerou como um verdadeiro filho e sempre vai ser lembrada como um exemplo para mim.

Sou também grato ao Prof. D.Sc. Robson Dias, não apenas por ter me orientado nesta pesquisa, mas também por ter me motivado a perscrutar a carreira acadêmica. Ao Prof. D.Eng. Edson Watanabe, por ser uma referência na área de eletrônica de potência para mim, e aos Profs. D.Sc. Silvangela Barcelos e D.Sc. Santisteban Larrea, por fazerem parte do meu desenvolvimento como pesquisador na área de eletrônica de potência. Não posso deixar de agradecer também aos meus amigos na COPPE, especialmente à querida Márcia Coelho, por todo o suporte e encorajamento dados a mim, me fazendo acreditar no meu potencial. Também, agradeço de forma honrosa ao meu amigo Eng. Lauro Neto por seu companheirismo e cooperação, tanto perto quanto longe, e ao grande Eng. Daniel Juliano, parceiro nas madrugadas de estudo, se tornando uma preciosa amizade pra mim.

Ao CNPq que, por via auxílio financeiro concedido por meio de bolsa de estudos, contribuiu para o nascimento deste trabalho.

E a todos quantos, de alguma maneira, contribuíram para que eu chegasse até aqui, deixo meu reconhecimento no nível mais profundo da gratidão: Muito obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONTROLE DIRETO DE TENSÃO USANDO O D²VC NO REFERENCIAL $\alpha\beta$

Elienai de Oliveira Macedo

Maió/2021

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Programa: Engenharia Elétrica

Um dos problemas mais comuns relacionado aos critérios de qualidade de energia elétrica é o desvio de tensão nos alimentadores das redes de distribuição de energia urbanas e rurais. Isto evidencia-se em tais tipos de sistemas pelo fato de apresentarem níveis de potência de curto-circuito menores que os sistemas de transmissão. Ademais, as redes de distribuição costumam apresentar uma característica menos indutiva que as de transmissão, o que ocasiona ineficácia da aplicação de equipamentos para regulação de tensão que se baseiem na compensação de potência reativa, método este conhecido como método indireto de controle de tensão. Isto dá ensejo à utilização de equipamentos baseados no método direto de controle de tensão, que se fundamenta na criação de tensões em série com o sistema para compensar os desvios, seja em cenários de tensões equilibradas ou desequilibradas. Este trabalho foca na proposição do D²VC, um equipamento de eletrônica de potência, cujo algoritmo de controle é baseado nas componentes de sequência positiva e negativa no referencial $\alpha\beta$, e cujos sinais de referência de compensação são obtidos usando controladores proporcionais+ressonantes. Não há necessidade do uso de qualquer tipo de algoritmo de sincronismo, e.g., PLL, o que significa que o desempenho do D²VC independe da dinâmica deste tipo de circuito de sincronismo. Este trabalho se propõe a averiguar a efetividade do controle desenvolvido com o D²VC mediante testes de simulação no domínio do tempo usando o PSCAD/EMTDC, e também, atestar a validade do controle com ensaios em bancada usando um protótipo experimental construído em laboratório.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIRECT VOLTAGE CONTROL USING D²VC IN $\alpha\beta$ REFERENCE FRAME

Elienai de Oliveira Macedo

May/2021

Advisor: Robson Francisco da Silva Dias

Department: Electrical Engineering

One of the most common problems related to the electric power quality is the voltage deviation in urban and rural power distribution feeders. This fact is evident in such systems due to the fact that they have lower short-circuit levels than transmission systems. Moreover, distribution grids tend to have a less inductive characteristic than transmission grids, which causes ineffective application of voltage regulation equipment based on reactive power compensation, a method known as indirect voltage control method. This gives rise to the use of equipment based on the direct voltage control method, which is based on the creation of voltages in series with the system to compensate for deviations, whether in balanced or unbalanced voltage scenarios. This work focuses on the proposition of D²VC, a power electronics equipment, whose control algorithm is based on the positive and negative sequence components in the *alpha beta* frame, and whose compensation reference are obtained using proportional + resonant controllers. There is no need to use any type of synchronism algorithm, e.g., PLL, which means that the performance of D²VC is independent of the dynamics of this type of synchronization circuit. This work aims to verify the effectiveness of the developed control with D²VC through simulation tests in the time domain using the PSCAD / EMTDC, and also, to certify the validity of the control with experimental trials using a prototype built in laboratory.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Impactos do Desequilíbrio de Tensão	2
1.3 Critérios e Normas de Avaliação de Desequilíbrio de Tensão	3
1.4 Trabalhos relacionados	10
1.5 Motivação	12
1.6 Objetivos	13
1.7 Organização do Texto	13
1.8 Contribuições para a Literatura	14
2 Desvios de Tensão em Redes Elétricas	15
2.1 Fundamentação Teórica	15
2.2 Diferenças entre linhas de transmissão e linhas de distribuição	16
2.2.1 Fator X/R	17
2.2.2 Potência de Curto Circuito	18
2.2.3 Desequilíbrio da Impedância da Rede	23
2.3 Métodos de Controle de Tensão	24
2.3.1 Controle Indireto de Tensão (CIT)	25
2.3.2 Controle Direto de Tensão (CDT)	29
2.4 Conclusões Parciais	38
3 Controlador Direto Dinâmico de Tensão	40
3.1 Principais Topologias	40
3.2 Princípio de Operação	43
3.3 Modelagem da rede	48
3.3.1 Transformação dos eixos de referência	48

3.3.2	Descrição do modelo da rede	49
3.4	Algoritmo de Controle do D ² VC	52
3.4.1	Controle do VSC ₁	52
3.4.2	Controle do VSC ₂	53
3.4.3	Regulação da componente de sequência positiva	58
3.4.4	Regulação da componente de sequência negativa	59
3.4.5	Controlador P+R	59
3.4.6	Limitadora Senoidal	61
3.5	Sumário do Capítulo e Conclusões	63
4	Resultados de Simulação	64
4.1	Parâmetros do sistema de teste	64
4.1.1	Projeto do Filtro LC	67
4.2	Avaliação dos controles dos VSCs	67
4.2.1	Chaveamento do VSC ₂	67
4.2.2	D ² VC operando com rede em vazio	73
4.2.3	D ² VC operando concomitante com a carga	74
4.2.4	Correção das componentes de sequência	76
4.3	Monitoramento do D ² VC no sistema	82
4.3.1	Manobra de carga equilibrada	82
4.3.2	Carga desequilibrada	86
4.4	Sumário do Capítulo	90
5	Validação Experimental	91
5.1	Protótipo experimental	91
5.2	Implementação do controle no dSpace	96
5.3	Resultados Experimentais	98
5.3.1	Comissionamento do protótipo experimental	99
5.4	Sintetização de tensões em série	102
5.4.1	Rede em vazio	102
5.4.2	Rede com cargas equilibradas e desequilibradas	104
5.4.3	Carga Equilibrada	104
5.4.4	Carga Desequilibrada	106
5.5	Sumário do Capítulo	108
6	Conclusões	109
6.1	Propostas de Trabalhos Futuros	110
	Referências Bibliográficas	112

A	Cr�terios de Projeto do Filtro LC	118
A.1	Especifica�o da indut�ncia	118
A.2	Especifica�o da Capacit�ncia	120
B	Diagrama de blocos do Simulink	123
B.1	Transforma�es	123
B.2	Controlador P+R	123
B.3	PNSC	124

Lista de Figuras

1.1	Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária Equivalente. . .	5
1.2	Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica Equivalente. . .	5
1.3	Valor de Compensações Pagas por Concessionárias do Rio de Janeiro.	6
1.4	Classificação das VTCDs	7
1.5	Conjunto de tensões trifásicas: (a) Simétricas, (b) Desequilíbrio causado pela assimetria angular das tensões de linha, (c) Desequilíbrio causado pela assimetria angular das tensões de fase.	8
1.6	Decomposição em componentes de sequência simétricas.	9
2.1	Modelo π de uma linha de transmissão com parâmetros concentrados.	16
2.2	Diagrama do Sistema de Distribuição.	17
2.3	Desvios da altura de referência de acordo com cargas acopladas a: (a) um "forte" sistema barra-molas e (b) um "fraco" sistema barra-molas.	19
2.4	Aumento da impedância de linha Z_{linha}	20
2.5	Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de Z_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.	20
2.6	Tensão na barra de carga.	21
2.7	Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de R_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.	22
2.8	Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de jX_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.	23
2.9	Estratégia conceitual do CIT.	25
2.10	Compensação para correntes: (a) em atraso e, (b) em avanço.	26
2.11	STATCOM.	27
2.12	Controle do STATCOM.	27
2.13	Rede predominantemente resistiva com GD.	28
2.14	Diagrama fasorial de compensação de potência ativa.	29
2.15	Estratégia conceitual do CDT.	29

2.16	Circuito básico do: (a) OLTC e do (b) SVR.	30
2.17	Circuito de comando de tapes.	31
2.18	Perfil tensão no alimentador (a) sem regulação, (b) controlado com uso do OLTC.	31
2.19	DVR.	33
2.20	Topologias possíveis: (a) retificador <i>shunt</i> conectado à montante e (b) retificador <i>shunt</i> conectado à jusante do transformador série. . . .	33
2.21	Diagrama em blocos do controlador do DVR implementado em	34
2.22	VEC com: (a) comutador e, (b) chaves de estado sólido.	35
2.23	UPLC.	36
2.24	Esquemático do UPFC para controle de tensão em redes com GD. . .	37
2.25	Controle de tensão no elo CC.	37
2.26	Controle de tensão no PAC em magnitude e fase.	38
3.1	Diagrama unifilar do D ² VC.	41
3.2	Topologias de conexão do D ² VC: (a) com conversores 1 ϕ e, (b) com 1 VSC ₁ -3 ϕ <i>shunt</i> e 3 VSC ₂ -1 ϕ série.	42
3.3	D ² VC baseado em conversores 3 ϕ	43
3.4	sistema 3f	44
3.5	Representação conceitual dos conversores do D ² VC.	45
3.6	Modos de controle do D ² VC: (a) controle de magnitude, (b) controle de fase e, (c) controle combinado.	46
3.7	Modos de controle de magnitude e fase regulando a tensão da carga. .	47
3.8	Transformação $abc \rightarrow \alpha\beta$: (a) Representação espacial, (b) <i>locus</i> de tensão em redes equilibradas e, (c) <i>locus</i> de tensão em redes desequi- libradas.	49
3.9	Modelagem do sistema no referencial estático.	50
3.10	Controle da tensão no elo CC.	53
3.11	Conexão série do VSC ₂	54
3.12	Controle do VSC ₂ em $\alpha\beta$	54
3.13	Lógica da limitadora senoidal.	55
3.14	Diagrama de blocos do DSOGI.	56
3.15	Filtro passa-banda do sinal direto v'	57
3.16	Filtro passa-baixas do sinal em quadratura qv'	57
3.17	Resposta em frequência dos controladores ideal e não-ideal para $\omega_0 =$ 377 rad/s , $\omega_c = 5 \text{ rad/s}$, $K_p = 1$ e $K_i = 100$	60
3.18	Chaveamento bipolar e: (a) Condição normal, (b) condição anormal, (c) regiões de não-linearidade do conversor para $m_f = 15$	61
3.19	Estratégia limitadora.	62

4.1	Sistema simulado no PSCAD/EMTDC.	65
4.2	Comportamento da tensão na barra de carga e no filtro para: (a) Configuração inicial do sistema (sem D ² VC), (b) configuração com VSC ₂ em estado de repouso e, (c) configuração com VSC ₂ com sinal modulante nulo.	69
4.3	VSC ₂ chaveando com sinal modulante nulo: (a) Correntes nos diodos, (b) correntes nos IGBTs, (c) correntes através do indutor, (d) correntes no capacitor e, (e) correntes de saída.	70
4.4	VSC ₂ com chaves superiores acionadas: (a) Correntes nos diodos, (b) correntes nos IGBTs, (c) correntes através do indutor, (d) correntes no capacitor e, (e) correntes de saída.	71
4.5	Controle do elo CC implementado no PSCAD/EMTDC.	72
4.6	Controle do VSC ₁ : (a) Potência ativa instantânea entrando no conversor, (b) regulação da tensão CC e, (c) afundamento de tensão na barra de carga.	73
4.7	Controle do VSC ₁ com rede em vazio: (a) Potência de entrada do VSC ₁ , (b) tensão controlada do elo CC e, (c) tensão controlada na barra de carga.	74
4.8	Controle do VSC ₁ concomitante com a entrada da carga: (a) Potência de entrada do VSC ₁ , (a) tensão controlada do elo CC e, (a) tensão controlada na barra de carga.	75
4.9	Tensões instantâneas da barra de carga.	75
4.10	Obtenção das amplitudes de sequência positiva e negativa no PSCAD/EMTDC.	76
4.11	Entrada da carga equilibrada: (a) Tensões instantâneas, (b) tensões RMS e, (c) amplitude da sequência positiva.	77
4.12	Senoides de erro de sequência positiva e negativa no PSCAD/EMTDC.	77
4.13	Controle de sequência positiva: (a) Erro de amplitude da componente de sequência positiva, (b) senoides unitárias sincronizadas com a rede e, (c) tensões de entrada dos controladores P+R.	78
4.14	Atuação do D ² VC na barra de carga: (a) Perfil de tensão corrigida e, (b) tensões instantâneas corrigidas.	78
4.15	Atuação da compensação apenas de componentes de sequência positiva: (a) Tensões instantâneas desequilibradas, (b) perfil do desequilíbrio em pu e, (c) correção do valor nominal de sequência positiva.	79
4.16	Atuação da compensação apenas de componentes de sequência negativa: (a) Tensões instantâneas equilibradas, (b) perfil do equilíbrio em pu e, (c) correção do valor nominal de sequência negativa.	80

4.17	Confecção das tensões de referência e lógica da limitadora senoidal no PSCAD/EMTDC.	80
4.18	Limitadora senoidal fora de operação: (a) Moduladoras fora da região linear, (b) valor de pico instantâneo das moduladoras e, (c) tensões de saída do VSC ₂	81
4.19	Limitadora senoidal em operação: (a) Moduladoras dentro da região linear, (b) valor de pico instantâneo das moduladoras e, (c) tensões de saída do VSC.	81
4.20	Picos de tensões instantâneas na barra de carga com atuação da limitadora senoidal.	82
4.21	Comportamento do sistema antes e depois da atuação do D ² VC: (a) Perfil de tensões na barra de carga e, (b) componente de sequência positiva.	83
4.22	Fluxo de potência ativa: (a) Antes da atuação do D ² VC e, (b) depois da atuação do D ² VC.	85
4.23	Tensão no Elo CC para compensação atuação do D ² VC frente a entrada e saída de cargas.	85
4.24	Comportamento do sistema antes e depois da atuação do D ² VC: (a) Perfil de tensões na barra de carga, (b) componente de sequência positiva e, (c) componente de sequência negativa.	87
4.25	Fator de desequilíbrio.	88
4.26	Fluxo de potência ativa: (a) Sem atuação do D ² VC e, (b) com atuação do D ² VC.	89
5.1	Vista geral do arranjo experimental em laboratório.	92
5.2	Detalhes da configuração do VSC ₂	92
5.3	Conexão dos indutores de entrada e resistores de pré-carga do VSC ₁	93
5.4	Bancada simulada no PSCAD/EMTDC.	94
5.5	Biblioteca de blocos de interface em tempo real.	96
5.6	Diagrama de blocos do algoritmo de controle construído no MATLAB/Simulink.	97
5.7	Sequência do sensoriamento e controle.	98
5.8	Pré-carregamento do elo CC.	100
5.9	Detalhe da tensão na carga a partir do chaveamento do VSC ₂ com referência nula de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.	101
5.10	Detalhe da mudança da sequência de fases (a) Experimental e (b) Simulação.	102
5.11	Degrau de tensão com circuito a vazio: (a) Experimental e, (b) Simulação.	103

5.12	Degrau negativo de tensão com circuito a vazio: (a) Experimental e, (b) Simulação.	104
5.13	Correção do afundamento de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.	105
5.14	Correção da elevação de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação. .	105
5.15	Correção do desequilíbrio de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.	106
5.16	Fator de desequilíbrio simulado.	107
5.17	Correção do desequilíbrio de tensão afundada: (a) Experimental e, (b) Simulação.	107
5.18	Correção do desequilíbrio de tensão sobre-elevada: (a) Experimental e, (b) Simulação.	108
A.1	Formas de onda consideradas no indutor e no capacitor do filtro LC. .	118
A.2	Tensão de linha chaveada e sua componente fundamental.	121
A.3	Diagrama de Bode da tensão de saída.	121
A.4	Corrente: (a) no indutor, (b) no capacitor e, (c) na saída do filtro LC.	122
A.5	Detalhe da ondulação de corrente no indutor.	122
B.1	Transformação de referenciais: (a) Transformação de Clarke, (b) Transformação Inversa de Clarke e (c) equações escritas em forma de função.	123
B.2	Detalhe do controlador P+R construído no Simulink.	124
B.3	Detalhe do PNSC.	124

Lista de Tabelas

1.1	Varição de Temperatura frente a desequilíbrios de Tensão.	3
1.2	Limites de tensão normatizados pela ANEEL para redes com tensão abaixo de 1kV.	4
2.1	Definições de rede segundo os níveis de tensão.	16
4.1	Parâmetros elétricos da simulação.	66
4.2	Dados de carga da simulação.	66
4.3	Especificações do VSC ₂	67
5.1	Parâmetros elétricos do protótipo em pequena escala.	95

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica, p. 3
CDT	Controle Direto de Tensão, p. 25
CIT	Controle Indireto de Tensão, p. 25
D ² VC	Dynamic Direct Voltage Controller, p. 12
DRCE	Índices equivalentes de duração de tensão crítica, p. 4
DRC	Índice de Duração Relativa da transgressão para tensão Crítica, p. 4
DRPE	Índices equivalentes de duração de tensão precária, p. 4
DRP	Índice de Duração Relativa da transgressão para tensão Precária, p. 4
DSOGI	Double Second Order Generalized Integrator, p. 55
DSTATCOM	Distribution Static Compensator, p. 10
DVR	Dynamic Voltage Restorer, p. 11, 32
FACTS	Flexible AC Transmission Systems, p. 35
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 7
MMC	Modular Multilevel Converter, p. 27
NEMA	National Equipment Manufacture's Association, p. 7
OLTC	On-load tap changers, p. 10
P+R	Proporcional+Ressonante, p. 59
PAC	Ponto de Acoplamento Comum, p. 28
PAC	ponto de acoplamento comum, p. 27

PI	Proporcional e Integral, p. 27
PLL	Phase-Locked Loop, p. 12
PNSC	Positive and Negative Sequence Calculation, p. 57
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, p. 3
PVUR	Phase Voltage Unbalance Rate, p. 7
QEE	Qualidade de Energia Elétrica, p. 1
QSG	Quadrature Signal Generator, p. 56
RMS	Root Mean Square, p. 3
SIN	Sistema Interligado Nacional, p. 16
SOGI	Second Order Generalized Integrator, p. 56
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation, p. 27
SSSC	Static Synchronous Series Compensator, p. 36
STATCOM	Static Synchronous Compensator, p. 10
SVR	Step Voltage Regulators, p. 10
UPFC	Unified Power Flow Controller, p. 11, 36
UPLC	Universal Active Power Line Conditioner, p. 35
UPQC	Unified Power Quality Conditioner, p. 36
UTSP	Unified Three-Phase Processor, p. 12
VEC	Voltage Electromagnetic Compensator, p. 34
VSC	Voltage Source Converter, p. 11
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração, p. 6

Capítulo 1

Introdução

Desde o final dos anos 1800, o mundo testemunhou vários avanços no setor tecnológico que nos influenciam até os dias de hoje. Pensando em consumo de energia, por exemplo, desde essa época, a demanda por mais recursos energéticos vem crescendo, juntamente com a necessidade de maiores fontes de energias, sejam elas química, elétrica e outras mais, a fim de atender ao alto consumo de energia da sociedade.

No setor elétrico, a entrega de energia com maior qualidade acelerou buscas por alternativas de transmissão de energia elétrica, principalmente depois da chegada do transformador elétrico nos sistemas de energia. Assim, constitui-se a atual estruturação de sistemas de potência: geração, transmissão e distribuição. Com isso, a energia gerada dos sistemas trifásicos é entregue aos centros de distribuição mais eficientemente, com tensões e correntes equilibradas, assentando as bases dos conceitos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em sistemas de potência.

1.1 Contextualização

Em termos gerais, pode-se inferir que as plantas de geração de energia elétrica geram tensões trifásicas perfeitamente senoidais, e as linhas de transmissão são construídas de maneira a permitirem suprimento aos centros de carga nas condições mais próximas possíveis da etapa da geração. Desta maneira, a energia elétrica é fornecida ao sistema de distribuição com tensões equilibradas, ou bem próximas desta condição. Contudo, ainda que as tensões supridas pela geração e transmissão possam ser consideradas equilibradas, invariavelmente as suas magnitudes e/ou fases sofrem desvios nas etapas da distribuição nos grandes centros consumidores de energia. Além disso, tal impacto na magnitude das tensões pode se dar em diferentes níveis em cada fase dos alimentadores das redes urbanas e rurais, o que assevera ainda mais cenários comumente desequilibrados. Tais desvios acontecem de forma momentânea ou sustentada, afetando o fluxo de potência na rede e o adequado suprimento das

cargas.

Uma das grandes mudanças nas redes de distribuição está no fato de que vem sendo possível verificar alterações no sentido do fluxo de potência, o que não se observava comumente em redes passivas [1]. Ao longo dos últimos anos, este paradigma tem sido quebrado com a crescente penetração de geração distribuída, baseada em fontes renováveis. Por esta causa, tais fontes de geração instaladas junto às unidades consumidoras podem gerar energia em vez de apenas consumi-la, configurando-as como agentes prosumidores de energia.

Tal mudança vem tornar as redes de distribuição cada vez mais ativas à medida que a figura de prosumidores se populariza, intensificando fenômenos antes difíceis de serem observados na rede elétrica. Como exemplo podemos citar a reversão de fluxo de potência ativa na rede elétrica, a influência nos esquemas de proteção de sobrecorrente na rede frente a defeitos e as elevações de tensão equilibradas e desequilibradas, que comprometem os índices de QEE. No que tange a desvios de tensão, a simples injeção de potência ativa nos alimentadores já agrava as violações de tensão [2], visto que tais redes não foram projetadas para acomodarem plantas de geração.

1.2 Impactos do Desequilíbrio de Tensão

Além das questões ligadas ao afundamento de tensão, diversas cargas existentes nos centros consumidores e instalações industriais são sensíveis a desequilíbrios de tensão, comprometendo a operação das mesmas e prejudicando seu funcionamento [3]. Pode-se citar como exemplo o comprometimento do desempenho de motores de indução trifásicos, quando alimentados por tensões desequilibradas [4]. A preocupação nessas máquinas vem logo à mente pela grande aplicação em instalações industriais e sensibilidade ao desequilíbrio, devido ao baixo valor da impedância de sequência negativa destes motores, quando comparado à de sequência positiva. Dessarte, para um dado desequilíbrio presente nas tensões trifásicas, a corrente originada nos enrolamentos do motor se eleva a magnitudes muito danosas ao equipamento. Segundo OLIVEIRA [5], a impedância de sequência negativa alcança valores próximos a faixa de 1/5 a 1/10 da impedância normal a plena carga. Assim, estima-se que a corrente de sequência negativa alcance valores 5 a 10 vezes maiores com relação à corrente que circularia quando aplicada a tensão de sequência positiva nominal, resultando em aumentos de temperatura, como os mostrados na Tabela 1.1, onde FD , I^- e ΔT são os valores percentuais do fator de desequilíbrio, corrente e temperatura, respectivamente, para um certo sistema de distribuição.

Impressoras fabris de jornais, que comumente imprimem várias (camadas) *layers* de cores sobrepostas, podem não conseguir alinhar tal sobreposição por conta do de-

Tabela 1.1: Variação de Temperatura frente a desequilíbrios de Tensão.

FD(%)	I ⁻ (%)	ΔT(C°)
0,0	0	0
2,0	15	5
3,5	27	15
5,0	38	30

sequilíbrio presente nas tensões da rede de alimentação. Máquinas síncronas podem apresentar perdas excessivas no rotor. E, dada a baixa impedância característica do circuito amortecedor, similar ao motor de indução, a corrente que surge pelo desequilíbrio também se eleva, gerando aquecimentos excessivos.

A própria rede de distribuição em si também é afetada pelo fenômeno do desequilíbrio. Transformadores, cabos e linhas de distribuição acabam ficando inclusive subutilizados, em termos de capacidade de condução, quando uma das fases dos alimentadores alcança seu limite térmico por conta do desequilíbrio de tensão [3, 6]. No emprego de retificadores trifásicos em redes desequilibradas podem surgir componentes harmônicas de corrente com ordens diferentes das esperadas¹, o que dificulta o projeto de filtros de linha para imunização da rede a tais perturbações.

1.3 Critérios e Normas de Avaliação de Desequilíbrio de Tensão

Observa-se a importância de características de tensão que cumpram os limites normatizados nacional e/ou internacionalmente, e assim, atenderem aos índices de QEE estabelecidos. De acordo com o padrão europeu EN 50160 [7], para cada período de 1 semana, 95% do valor da tensão RMS deve estar dentro da faixa de ±10% da tensão RMS nominal, considerando medições de 10 em 10 minutos.

As diretrizes brasileiras são estipuladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que divide em diversos módulos os requerimentos que garantem segurança e confiabilidade de suprimento de energia, a saber, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). De acordo com o módulo 8, que regula a QEE em redes de distribuição, os desvios de tensão são compreendidos em 3 diferentes categorias, em ordem crescente de gravidade, como mostrado na Tabela 1.2.

$$DRP(\%) = \frac{nlp}{N} \times 100 \text{ e} \quad (1.1)$$

¹Harmônicos de corrente de ordens $6n \pm 1$, para $n=1,2,3\dots$

$$DRC(\%) = \frac{n_{lc}}{N} \times 100, \quad (1.2)$$

onde,

n_{lp} e n_{lc} : maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente; e,

N : número de leituras, sendo normatizado como 1008 leituras válidas.

Na busca da garantia de um atendimento adequado e de qualidade por parte das concessionárias de energia, a ANEEL [8] fiscaliza a adequação da tensão fornecida aos consumidores por meio de dois principais indicadores. Tais indicadores são: o índice de Duração Relativa da transgressão para tensão Precária (DRP) e o índice de Duração Relativa da transgressão para tensão Crítica (DRC). O cálculo do DRP e do DRC é feito de acordo com (1.1) e (1.2), respectivamente:

Tabela 1.2: Limites de tensão normatizados pela ANEEL para redes com tensão abaixo de 1kV.

Tensão	Faixa de variação		Unidade
	$V_{base}=220$	$V_{base}=127$	
Adequado	$0.92 < V_{rede} < 1.05$	$0.92 < V_{rede} < 1.05$	pu
Precário	$0.87 < V_{rede} < 0.92$	$0.87 < V_{rede} < 0.92$	
	$1.05 < V_{rede} < 1.06$	$1.05 < V_{rede} < 1.06$	
Crítico	$V_{rede} < 0.87$	$V_{rede} < 0.87$	
	$V_{rede} > 1.06$	$V_{rede} > 1.06$	

A ANEEL disponibiliza para acesso público *online*² os indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em toda as regiões do Brasil, de todas as concessionárias de energia. São dadas as médias dos índices DRP e DRC, sendo definidas respectivamente como: índices equivalentes de duração de tensão precária (DRPE) e crítica (DRCE). As Figuras 1.1 e 1.2 mostram os índices DRPE e DRCE, respectivamente, para consumidores atendidos pelas concessionárias de energia do Estado do Rio de Janeiro.

²<https://www.aneel.gov.br/conformidade>

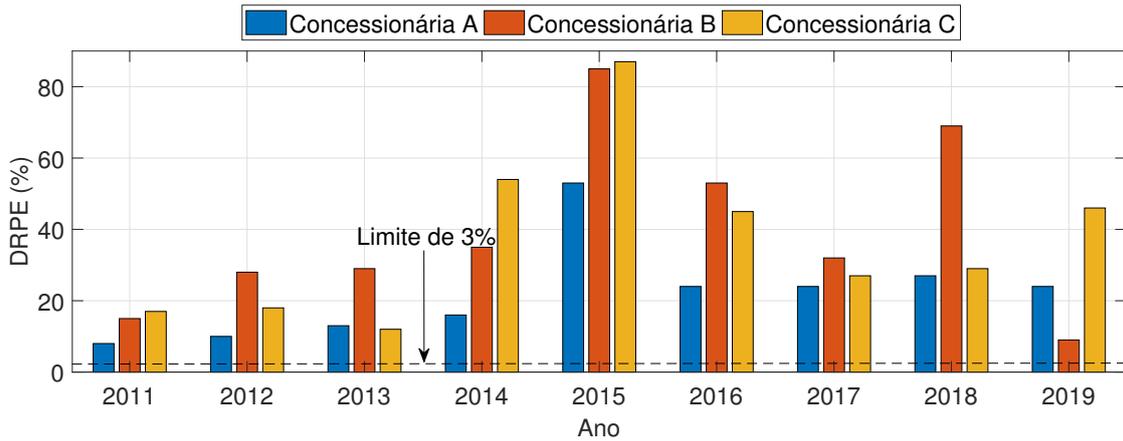


Figura 1.1: Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária Equivalente.

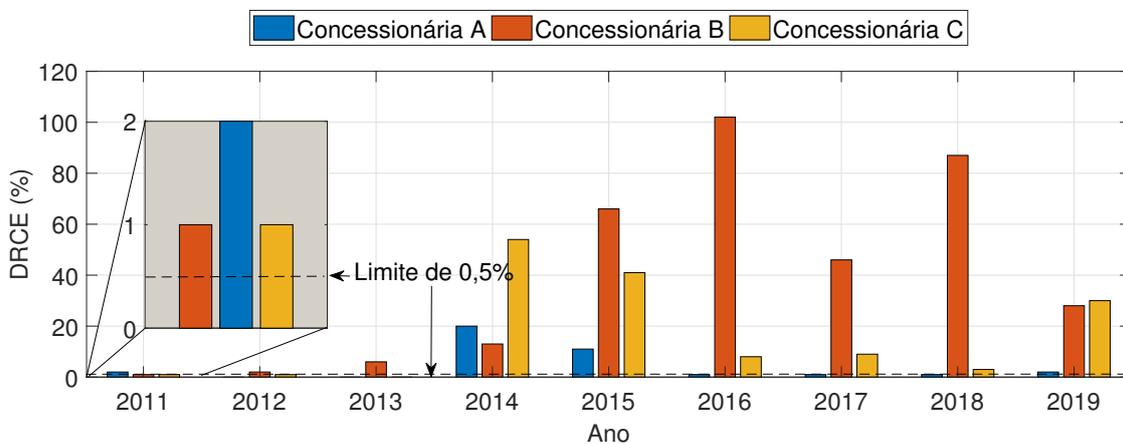


Figura 1.2: Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica Equivalente.

Tais indicadores, limitados em $DRP \leq 3\%$ e $DRC \leq 0,5\%$, passaram a ser utilizados pela ANEEL desde 2010, como ilustrado na Figura 1.1 e na Figura 1.2³. Caso estes limites não sejam respeitados, a concessionária de energia é obrigada a compensar financeiramente os consumidores que estiverem sendo atendidos com desvios de tensão mais severos que os permitidos.

Observa-se da análise de registros da ANEEL que, no Estado do Rio de Janeiro, o indicador DRPE da concessionária A esteve desde 2011 abaixo das demais concessionárias, porém, em todos os anos houve ultrapassagem dos limites permitidos. Já quanto ao indicador DRCE, as concessionárias B e C não vêm conseguindo atender desde 2014 aos requisitos da ANEEL, tendo que compensar financeiramente os consumidores em sua área de concessão. No ano de 2016, a concessionária B chegou a atender os consumidores com tensões consideradas críticas durante 100% do período de atendimento. A título de exemplo, a Figura 1.3 mostra as compensações pagas

³O ano de 2010 foi omitido dos gráficos por não haver registros diferentes de zero neste ano. O ano de 2020 foi omitido por ser o ano corrente de coleta de leituras.

pelas concessionárias de energia do Estado do Rio de Janeiro devido a violações de tensão.

Percebe-se que no início dos registros de indicadores para indenizações, a concessionária A vinha apresentando prejuízos cada vez maiores até 2016, ano a partir do qual ela começa a apresentar resultados no sentido de melhora nas adequações de tensão fornecida aos clientes. Por outro lado, a concessionária C começa a experimentar a partir de 2015 os efeitos financeiros da transgressão de tensão. Já a concessionária B não apresenta valores expressivos frente as demais. Dessa maneira, observa-se que os problemas associados à QEE importam não apenas sob a perspectiva do consumidor, mas também são alvos de interesse por parte das concessionárias de energia.

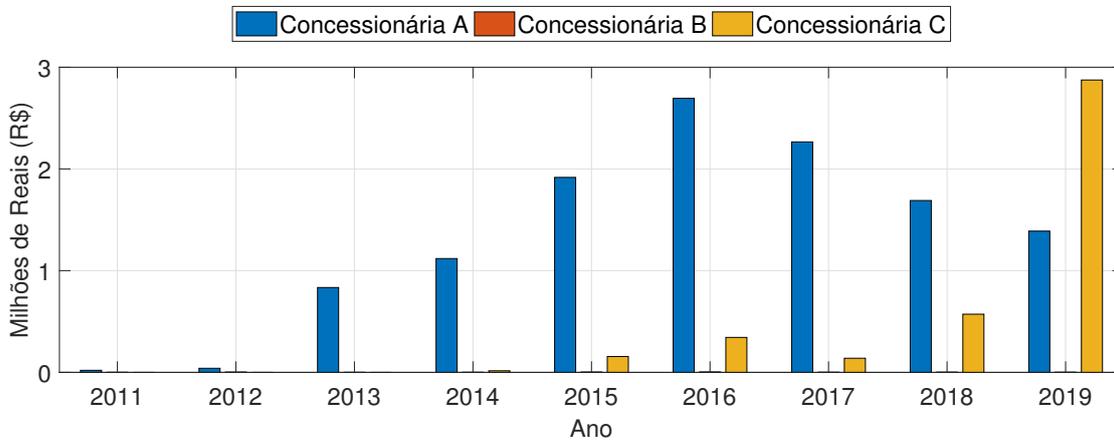


Figura 1.3: Valor de Compensações Pagas por Concessionárias do Rio de Janeiro.

A ANEEL [8] ainda classifica estes desvios de tensão como: flutuações de tensão ou variações de tensão de curta duração (VTCDD). As flutuações de tensão são comumente chamadas de *flicker* por causa da percepção visível do fenômeno a olho nu nas variações luminosas de lâmpadas incandescentes, por exemplo. Já as VTCDDs são caracterizadas por severos desvios das tensões de referência, sendo classificadas quanto a sua duração e amplitude. A Figura 1.4 ilustra os intervalos de tempo que distinguem as VTCDDs de acordo com a duração do distúrbio e consoante com a severidade dos mesmos.

Sendo portanto um fenômeno naturalmente observado nas redes de distribuição, a ANEEL [8] estabelece uma expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão, dada por (1.3):

$$FD(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (1.3)$$

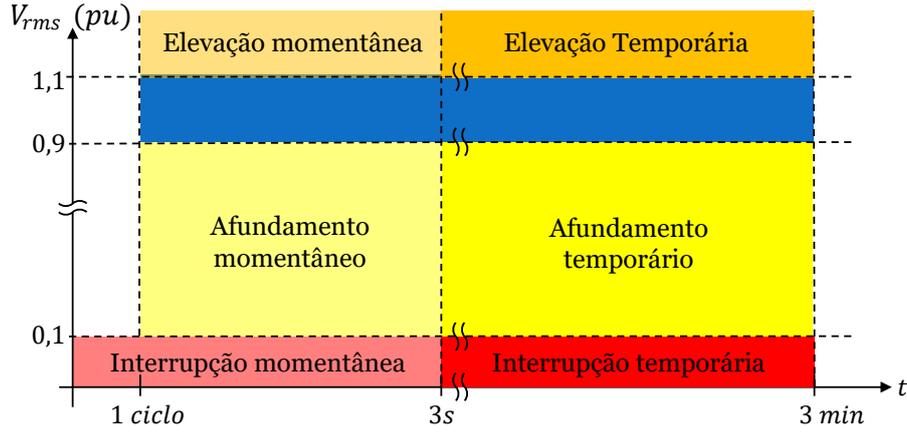


Figura 1.4: Classificação das VTCDs [8].

onde,

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}.$$

Outras normas, de abrangência internacional, vêm também mensurar o nível de desequilíbrio de tensão por meio das magnitudes das tensões de linha e de fase do sistema. A *National Equipment Manufacture's Association* (NEMA) expressa a taxa de desbalanço das tensões de linha, i.e., *Line Voltage Unbalance Rate* (LVUR) por meio do percentual:

$$LVUR(\%) = \frac{\Delta V_{max}}{V_{avg}} \times 100. \quad (1.4)$$

Onde,

ΔV_{max} : Máximo desvio da média das tensões de linha;

V_{avg} : Média das tensões de linha.

Ainda no mesmo nível de abrangência, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) mensura a taxa de desequilíbrio de tensões de fase, i.e., *phase voltage unbalance rate* (PVUR), segundo:

$$PVUR(\%) = \frac{\Delta V_{max}}{V_{avg}} \times 100, \quad (1.5)$$

onde,

ΔV_{max} : Máximo desvio da média das tensões de fase;

V_{avg} : Média das tensões de fase.

Percebe-se que as expressões (1.3), (1.4) e (1.5) meramente calculam o fator de desequilíbrio usando as magnitudes das tensões, tanto de linha quanto de fase,

mas não levam em consideração possíveis desvios de ângulos de fase, ou seja, não consideram assimetrias nas formas de onda. Deste modo, isso pode conduzir a avaliações incompletas do estado da rede, no tocante ao desequilíbrio de tensões. Um simples exemplo que traduz tal afirmação pode ser dado por meio da Figura 1.5. Na situação apresentada, a aplicação direta das magnitudes das tensões de linha da Figura 1.5b em (1.4) não revelaria o desequilíbrio existente em um dado sistema, visto que tais tensões são iguais em magnitude, porém assimétricas em relação à defasagem entre tensões. A mesma desinformação seria dada quanto às tensões de fase assimétricas da Figura 1.5c aplicadas em (1.5).

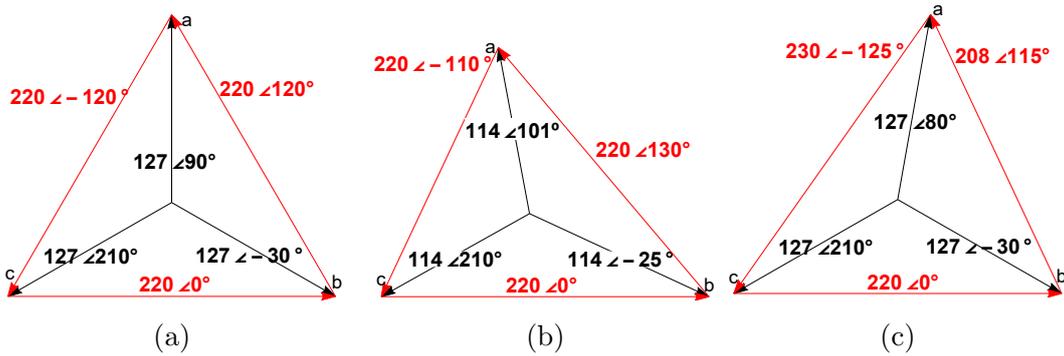


Figura 1.5: Conjunto de tensões trifásicas: (a) Simétricas, (b) Desequilíbrio causado pela assimetria angular das tensões de linha, (c) Desequilíbrio causado pela assimetria angular das tensões de fase.

Contudo, as limitações apresentadas não descartam totalmente a aplicação de tais formulações, já que desvios de ângulo de fase das tensões de linha alteram as magnitudes das tensões de fase, e vice-versa. Logo, tais formulações podem ser utilizadas em conjunto, inclusive quando não se dispuser de equipamentos sofisticados e capazes de realizar detecções de ângulos de fase, traduzindo mais confiavelmente o estado de desequilíbrio da rede.

Alternativamente, as condições de equilíbrio na rede trifásica podem ser dadas por meio da avaliação das componentes de sequência simétricas, conforme mostradas na Figura 1.6. Note-se que na decomposição revela que as componentes de sequência positiva têm a mesma sequência de fases do sistema original, enquanto as de sequência negativa apresentam a sequência de fases invertida. As componentes de sequência zero, por outro lado, são consideradas como fasores homopolares e estão presentes em sistemas trifásicos a 4 fios. O desequilíbrio de tensão está intimamente ligado com a presença de componentes de sequência negativa e zero [4, 7, 8], e tais componentes se fazem presentes tanto quando há desvios em magnitude quanto em ângulos de fase, englobando as situações fictícias de assimetria da Figura 1.5.

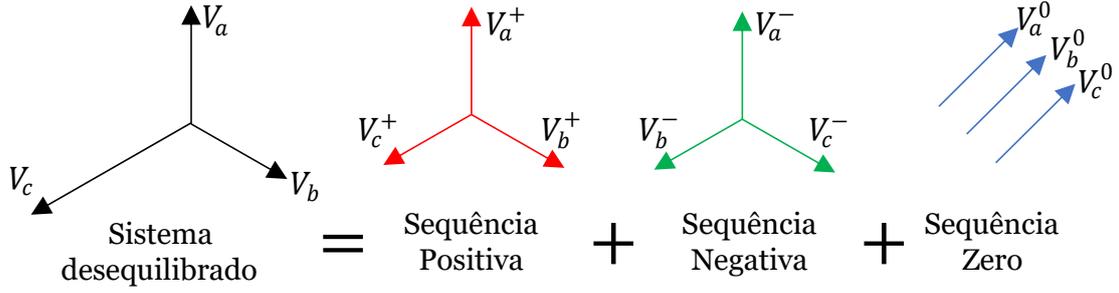


Figura 1.6: Decomposição em componentes de sequência simétricas.

Portanto, a ANEEL [8] também expressa o fator de desequilíbrio FD em um sistema avaliando a relação entre o conteúdo de sequência negativa V^- e o conteúdo de sequência positiva V^+ , conforme dado em:

$$FD(\%) = \frac{V^-}{V^+} \times 100. \quad (1.6)$$

Conseqüentemente, quanto maior a participação da componente de sequência negativa nos sistemas de potência, mais desequilibradas eles se mostram. Assim, visando estabelecer tolerâncias para o surgimento de desequilíbrio nas tensões, a ANEEL [8] estabelece o limite de $FD < 3\%$ para redes de distribuição abaixo de 1kV, de modo a serem consideradas equilibradas.

Portanto, dado que a maior contribuição de desequilíbrios na rede advém da conexão de cargas monofásicas e/ou trifásicas desequilibradas, a conexão das mesmas deve ser planejada, de forma a causar o menor desequilíbrio possível [9]. Uma das formas possíveis seria a de manter um registro da conexão de consumidores à rede, por parte da concessionária, de modo que se permita a igual distribuição de cargas por fase. Entretanto, esta tática não representa uma ação factível, do ponto de vista prático, dada a dificuldade de se manter dados confiáveis. E, ainda que fosse viável, ainda existe a questão da dificuldade da previsibilidade e do comportamento das cargas no sistema. Ademais, existem cargas que naturalmente degradam o equilíbrio das tensões no sistema, como por exemplo fornos a arco elétrico e máquinas de solda sendo classificadas como cargas não-lineares [6].

Além da conexão de cargas desequilibradas, as redes de distribuição urbanas podem ser malhadas [1], com vistas ao aumento da confiabilidade no suprimento de energia e na continuidade do atendimento à carga. No caso de situações de defeitos na linha, onde sejam necessárias desconexões e isolamento do ramo defeituoso do resto do sistema, as cargas podem ser atendidas por meio de outro caminho na rede. Se por um lado tal redundância garante o suprimento à carga, o mais ininterruptamente possível, por outro, submete a carga à eventuais desequilíbrios oriundos de outro subsistema.

Em suma, importa mitigar desvios equilibrados e desequilibrados de tensão na rede de distribuição, de modo a atender aos requisitos de QEE no sistema. A seguir, são descritas algumas abordagens encontradas na literatura para a solução do problema exposto.

1.4 Trabalhos relacionados

A maior contribuição ao desequilíbrio de tensões em redes de distribuição é a não equalização de cargas conectadas ao longo dos alimentadores. Dessarte, uma das formas que poderiam levar à redução do nível de desequilíbrio seria manter o máximo possível uma conexão equilibrada de cargas à rede, como proposto por SHAHNIA *et al.* [9, 10]. A manobra das cargas entre as fases do alimentador possibilita a equalização das mesmas no sistema, reduzindo assim o desequilíbrio por meio da igual distribuição do carregamento no sistema. Para realizar tal tarefa, um controle inteligente de transferência de cargas rege um esquema de conexões baseadas em chaves de estado sólido, que conectam uma determinada carga à fase correta, com vistas à redução dinâmica do fator de desequilíbrio.

Contudo, os métodos mais atuais de regulação de tensão na distribuição baseiam-se em equipamentos que controlam diretamente a tensão fornecida no alimentador. Os equipamentos mais utilizados são os conhecidos *On-load tap changers* (OLTC) ou Reguladores Estáticos de Tensão (*Step Voltage Regulators*, SVR), baseados em métodos diretos de compensação e, instalados em subestações ou ao longo dos alimentadores [11]. O apelo principal destes equipamentos reside no fato de serem tecnologias dominadas, de fácil implementação e comportamento conhecido, sendo muito empregados para regulação de tensão, especialmente em redes de alta tensão [12].

Diversos trabalhos de pesquisa têm se dedicado à mitigação dos desvios de tensão utilizando métodos baseados na compensação de potência reativa, conhecidos como métodos indiretos de controle de tensão, seja por meios de elementos passivos, como capacitores ou via equipamentos baseados em eletrônica de potência. Porém, não muitos trabalhos consideram a efetividade de tais métodos em redes predominantemente resistivas.

Concernente à compensação de potência reativa, MOHAMED [13], TAKAHASHI e HAYASHI [14] investigaram a aplicação de um Compensador Estático na Distribuição (DSTATCOM) na mitigação de desvios de tensão usando um esquema de controle de tensão de sequência dual, de maneira a produzir tensões de compensação, mesmo em cenários de desequilíbrio. Ainda na mesma linha de pesquisa, LI *et al.* [15] investigaram estratégias de compensação de tensões desequilibradas usando um Compensador Estático (STATCOM) para casos em que tais

desequilíbrios pudessem danificar o equipamento, conduzindo ao seu desligamento. Tal verificação motivou o desenvolvimento de um novo controle de potência reativa baseado em lógica *fuzzy*, de acordo com CHAMUNDESWARI e RAJU [16]. Em resumo, técnicas baseadas em compensação de potência reativa em sistemas de potência são largamente utilizadas, porém, não são efetivas em todos os níveis de tensão dos sistemas de potência. Mais recentemente, BOZALAKOV *et al.* [17] constataram que além deste método de controle de tensão em redes de distribuição ter um impacto desprezível na regulação da tensão, ele ainda pode introduzir perdas adicionais nos alimentadores. Além disso, BLAŽIČ e PAPIČ [18] ainda afirmam que tais métodos de regulação são tão menos eficazes quanto menor for o fator X/R dos alimentadores.

Por outro lado, as pesquisas de LIMA *et al.* [19, 20] abordam o problema da regulação de tensão mediante métodos diretos de controle de tensão, que consistem na adição de tensões em série com a tensão da rede, mitigando assim o desvio de tensão. Um dos equipamentos baseados em eletrônica de potência que utilizam este método direto é o Restaurador Dinâmico de Tensão (*Dynamic Voltage Restorer*, DVR). Este equipamento é constituído de um Conversor Fonte de Tensão (VSC), que pode gerar tensões de compensação e são alimentados por elementos armazenadores de energia, como apontado por MELONI *et al.* [21], ITAL e BORAKHADE [22], ou por uma ponte retificadora alimentando o VSC [23]. Tal estrutura de conversores torna viável a dispensa de elementos armazenadores de energia em equipamentos baseados em VSC. Não obstante, BOZALAKOV *et al.* [17] pontuam que o DVR geralmente é empregado em redes de média tensão, dificilmente mitigando desvios de tensão em redes de baixa tensão, especialmente em cenários desequilibrados.

Utilizando-se da mesma estrutura de conversores conectados em *back-to-back*, BARCELOS [24] propôs o uso de um Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC), com aplicação diferente da proposta originalmente por GYUGYI *et al.* [25], visando controlar flutuações de tensão causadas pela intermitência de geração de potência ativa de geradores distribuídos na rede. Adicionalmente, BARCELOS [24] ainda avalia comparativamente o método direto com o indireto através de simulações com o emprego de um STATCOM, provando vantagens do método direto de controle de tensão em relação ao indireto quando aplicados em redes predominantemente resistivas. Ambos os métodos são exaustivamente discutidos em LIMA *et al.* [19, 20], provando categoricamente a baixa influência da gestão de potência reativa em redes de distribuição.

1.5 Motivação

Mais recentemente, novos estudos em métodos diretos de controle de tensão realizados por BARCELOS *et al.* [26] conduziram à concepção de um novo equipamento baseado em eletrônica de potência, o *Dynamic Direct Voltage Controller*, ou Controlador Direto Dinâmico de Tensão, doravante referenciado pelo seu acrônimo D²VC. A estrutura deste equipamento se assemelha ao do UPFC e realiza a regulação de tensão de forma direta, por meio da instalação de uma estrutura do D²VC em cada fase do sistema.

As demonstrações de eficácia do método direto usando o UPFC [24] e mais recentemente a sua evolução para o D²VC [19, 20, 26] deram ensejo à continuidade de estudos utilizando o referido equipamento. A técnica aplicada nos trabalhos supracitados avalia o desequilíbrio de tensões na rede por meio das componentes simétricas, calculados mediante um Processador Trifásico Unificado, i.e., *Unified Three-Phase Processor* (UTSP), e de posse das componentes simétricas de sequência, é feita a regulação do seu conteúdo na rede.

Desta forma, uma das motivações do presente trabalho de mestrado é o desenvolvimento de um algoritmo de controle aplicável para mitigação das transgressões de tensão em sistemas de distribuição de energia, visto que apresentam baixos níveis de curto circuito, razão da susceptibilidade a desvios de tensão. Dada a ineficácia de métodos indiretos em redes com baixo fator X/R, investiga-se a viabilidade da proposta desta dissertação, em elaborar um controle baseado no método direto, como será mostrado no capítulo a seguir. Além disso, sendo o foco de estudo em redes de distribuição, o algoritmo de controle deve ser capaz de levar em consideração também os cenários de desequilíbrio de tensão.

Portanto, a principal característica do algoritmo de controle sob estudo é: (i) suprimir a aparição de componentes de sequência negativa de tensão em redes elétricas a três-fios, razão pela qual a sequência zero não é considerada, e assim, eliminar situações de desequilíbrio, e (ii) regular a componente de sequência positiva de tensão, corrigindo o desvio dos valores de referência.

Outro ponto de interesse desta pesquisa é oferecer uma alternativa para algoritmos de controle clássicos, calculados em referenciais síncronos, como o referencial *dq*, geralmente requerendo o uso de circuitos de sincronização, como o *Phase-Locked Loop* (PLL). Embora isto não constitua mais um problema tão sério para o processamento de sinais digitais dos atuais DSPs, propõe-se neste trabalho de pesquisa evitar o custo computacional envolvido com tais referenciais síncronos. Além disso, a aplicação de um PLL influenciaria no desempenho do controle do D²VC, por conta da sua própria dinâmica de rastreamento angular da rede. Por este motivo, a construção do algoritmo se desvencilha da dependência da dinâmica do PLL por basear-

se no referencial $\alpha\beta$, cuja transformação envolve cálculos puramente algébricos, se tornando adequada para controladores proporcionais+ressonantes.

1.6 Objetivos

Os objetivos principais desta dissertação concentram-se na (i) proposta do método direto como alternativa ao método indireto para o controle de tensão em redes de distribuição, (ii) análise conceitual de compensação utilizando o D²VC, (iii) desenvolvimento de um algoritmo de controle em ambiente de simulação e, (iv) validação do controle por meio de ensaios experimentais.

O algoritmo desenvolvido contribui com as pesquisas atuais relacionadas ao método direto de controle de tensão devido a seu desprendimento do uso de PLLs, comumente utilizado em transformações para referenciais estáticos em síncronos, e cálculos das componentes de sequência simétricas sem complexidades adicionais associadas a um UTSP. Os cálculos de tais componentes de sequência são realizados no referencial estático $\alpha\beta$. Deste modo, esforços computacionais excessivos não representam desvantagens a serem consideradas.

Em resumo, pretende-se demonstrar nesta dissertação a efetividade da proposta do D²VC através de:

- Simulações realizadas no PSCAD/EMTDC, e
- Ensaios experimentais em laboratório.

A validação dos objetivos em ambos os estágios se dá tanto em cenários (i) equilibrados quanto (ii) desequilibrados de tensão. Para a validação experimental do D²VC, embarca-se o controle desenvolvido na plataforma dSpace1103, possibilitando a prototipagem rápida do equipamento em laboratório. Neste sentido, todo o tratamento de sinais do aparato montado em laboratório é realizado pelo controle embarcado no dSpace1103, controlando o chaveamento correto do D²VC. A validação do controle desenvolvido se dá submetendo-o a cenários (i) equilibrados e (ii) desequilibrados de tensão.

1.7 Organização do Texto

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos, sendo este Capítulo de introdução destinado a considerações sobre o problema dos desvios de tensão nas redes de distribuição, e à breve descrição dos trabalhos relacionados com o tema.

No Capítulo 2 é dado um panorama de redes elétricas e os níveis de curto-circuito associados, destacando-o como fator relevante para o surgimento dos desvios de

tensão equilibrados e desequilibrados em sistemas de distribuição. Além disso, são expostas as filosofias de controle direto e indireto de tensão, os equipamentos que utilizam tais métodos para regulação de tensão e por fim, se apresenta a proposta de aplicação do D²VC.

O Capítulo 3 apresenta os princípios básicos do D²VC, bem como suas características de funcionamento e as topologias possíveis de serem construídas na rede de distribuição. Em seguida, explana-se em detalhes o algoritmo de controle desenvolvido nesta pesquisa, dando ênfase na estratégia de supressão de componentes de sequência negativa e regulação da positiva.

No Capítulo 4 são apresentadas considerações a respeito do desempenho do D²VC, baseado no método direto de controle de tensão em redes de distribuição. Para tanto, são dados resultados de simulação no PSCAD/EMTDC envolvendo alguns cenários de desvio equilibrados e desequilibrados de tensão.

No Capítulo 5 constata-se a aplicabilidade da proposta por meio de testes realizados com um protótipo experimental do D²VC construído em bancada de testes no laboratório. Neste capítulo valida-se parte do controle desenvolvido, comprovando que o método direto pode ser uma alternativa para o controle de tensão em redes de distribuição.

No Capítulo 6 estão as principais conclusões obtidas nas fases de pesquisa realizadas durante a escrita deste documento. Também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.8 Contribuições para a Literatura

Este trabalho de pesquisa produziu, até o momento, a publicação de um artigo [27] no Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, IEEE SPEC/COBEP-2019, realizado em Santos, SP, Brasil. Neste artigo foram mostrados resultados de simulação do algoritmo apresentado em uma rede equivalente de distribuição de energia, em ambos os cenários de equilíbrio e desequilíbrio de tensão. Os próximos passos desta pesquisa estão sendo escritos para publicações em revistas científicas com os resultados e conclusões apresentados neste documento.

Capítulo 2

Desvios de Tensão em Redes Elétricas

Embora desvios de tensão em sistemas de potência sejam, a rigor, inevitáveis, a sua severidade pode ser em muitos casos reduzida, tanto em sistemas de transmissão quanto de distribuição. Do contrário, o dano causado a cargas sensíveis pode ser inaceitável, infringindo os índices de QEE, e conduzindo a penalizações financeiras. Neste sentido, o presente capítulo se dedica a identificar as condições originárias de desvios de tensão em sistemas elétricos, dando enfoque às redes de distribuição. Os métodos de controle aplicados em ambos os sistemas são descritos, estabelecendo as diferenças entre o método indireto, mais usualmente empregado em sistemas de transmissão, e o método direto, alvo do estudo desta pesquisa. Descreve-se em detalhes alguns equipamentos de cada método, estabelecendo os motivos pelos quais os dispositivos baseados em métodos diretos se mostram mais aplicáveis em redes de distribuição, em detrimento dos usuais equipamentos baseados nos métodos indiretos.

2.1 Fundamentação Teórica

Antes da análise de métodos de controle de tensão em sistemas de distribuição é importante compreender e identificar propriamente as causas do fenômeno dos desvios de tensão. Vale destacar que embora todo o sistema de potência possa sofrer tais distúrbios, as plantas de geração, a priori, não contribuem com o fenômeno. Parte-se, portanto, da premissa de que a etapa da geração entrega tensões trifásicas perfeitamente senoidais e equilibradas [28].

Portanto, deve ser dada atenção especial a outros aspectos do sistema de potência, como a impedância das linhas que transmitem e distribuem energia, e a natureza da operação e conexão de cargas [3]. Além destes fatores, a inserção e cres-

cimento de geração distribuída nas redes também contribuem para o desequilíbrio nas redes de distribuição, conforme estudado em [24, 29], dada a possibilidade de haver conexões monofásicas na rede, e deste modo, injeções desequilibradas de potência nos alimentadores.

2.2 Diferenças entre linhas de transmissão e linhas de distribuição

No contexto do Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN), majoritariamente constituído por máquinas síncronas de base hidráulica, muitas centrais geradoras se localizam longe dos centros de consumo. Desse modo, as impedâncias do sistema, proporcionais ao comprimento das linhas, são tão maiores quanto mais longas forem as linhas de transmissão. As categorias de tensão das etapas dos sistemas de potência brasileiros, definidas por [8], são dadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Definições de rede segundo os níveis de tensão.

Tensão	Categoria
Acima de 230 kV	Transmissão
Entre 69kV e 230 kV	Subtransmissão
Entre 1 kV e 69 kV	Distribuição em média tensão
Igual ou inferior a 1kV	Distribuição em baixa tensão

As representações clássicas de linhas de transmissão podem ser encontradas extensivamente na literatura [28, 30], com parâmetros elétricos distribuídos ou concentrados segundo os modelos “ T ”, “ L ” ou como o modelo “ π ”, representado na Figura 2.1 com parâmetros concentrados.

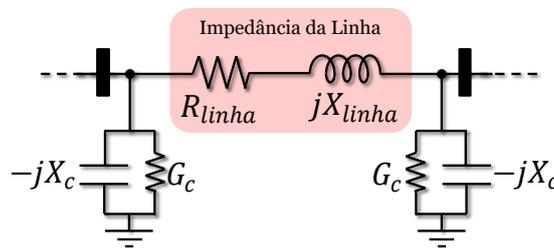


Figura 2.1: Modelo π de uma linha de transmissão com parâmetros concentrados.

Tais impedâncias de linha, nesta etapa do sistema de potência, são modeladas (i) pela resistência, proporcional a área da seção transversal dos cabos, (ii) pela reatância indutiva, representada pelo campo magnético estabelecido entre os condutores, (iii) por capacitores em paralelo, para representarem o campo elétrico existente entre os condutores e o terra, e por fim, (iv) por condutâncias em para-

lelo, representando o efeito de fuga de correntes, algumas vezes omitido por baixo impacto no modelo [6].

2.2.1 Fator X/R

Em sistemas de tensão acima de 69 kV, o efeito mais expressivo que se observa, com respeito à impedância da linha, é o da reatância indutiva [1], sendo por vezes negligenciado o efeito da resistência sem prejuízos [28]. Este é o motivo pelo qual sistemas de tensão acima de 69 kV são conhecidos pelos seus altos fatores X/R, sendo consideradas redes predominantemente indutivas. Este atributo permite a aplicação de métodos de compensação de tensões baseados em características reativas, como demonstrado em [12, 14, 16].

Entretanto, esta característica de linhas predominantemente indutivas são uma peculiaridade dos sistemas de tensão acima de 69 kV, de forma genérica. Tal característica não se observa geralmente em linhas de distribuição. A Figura 2.2 ilustra o modelo de uma linha curta de um sistema genérico de distribuição.

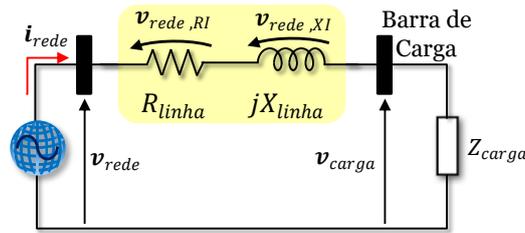


Figura 2.2: Diagrama do Sistema de Distribuição.

No sistema da Figura 2.2, cujo modelo é dado por (2.1), a tensão v_{carga} nos terminais das cargas é resultado das correntes que elas drenam através da impedância de linha:

$$v_{rede} = \underbrace{\mathbf{i}_{rede} \mathbf{Z}_{rede}}_{v_{drop}} + \underbrace{\mathbf{i}_{rede} (\mathbf{R}_{carga} + j\mathbf{X}_{carga})}_{v_{carga}} \quad (2.1)$$

Neste modelo, os capacitores e condutâncias em paralelo da linha não desempenham representação importante, e podem ser desconsiderados. Além disso, o campo magnético tão presente nas linhas de transmissão perde predominância significativamente em linhas de distribuição, reduzindo diretamente a contribuição da reatância indutiva na impedância da linha. Ademais, dada a menor seção transversal dos cabos dos alimentadores, a resistência deixa de ser desprezível frente a reatância indutiva [18], o que permite visualizar as redes de distribuição como redes predominantemente resistivas, i.e., com baixo fator X/R .

A partir da avaliação de (2.1), percebe-se que sempre existirão desvios de tensão devido às quedas de tensão produzidas nas linhas da rede. Tais desvios de tensão

vão demandar regulações dependendo do quão severas as transgressões de tensão se mostram. Redes com perfis de tensão próximos dos valores de referência podem dispensar dispositivos de regulação de tensão. Porém, para aqueles sistemas com violações maiores que as permitidas, técnicas de compensação de tensão podem ser mandatórias nas regiões do sistema em que tais violações forem detectadas.

Um atributo de sistemas elétricos que pode ajudar na avaliação da necessidade de regulação de tensão é o nível de curto-circuito da rede, explicado na seção a seguir. A partir desse fator pode ser possível avaliar o quão susceptível a distúrbios de tensão uma rede pode ser.

2.2.2 Potência de Curto Circuito

A partir da modelagem (2.1) do circuito da Figura 2.2, percebe-se que a tensão da barra de carga seria a mesma da fonte em dois casos: (i) se não houvesse carregamento, ou seja, quando não houver corrente drenada, e (ii) se a impedância da linha fosse nula. Como são dois casos não realizáveis, sempre há desvios de tensão na barra da carga, sendo a impedância observada à montante dela, a impedância equivalente de Thèvenin.

No contexto desta pesquisa, associa-se a “força” do sistema com a imunidade a distúrbios de tensão. Em outras palavras, uma rede considerada “forte” tende a não apresentar desvios de tensão frente a defeitos ou entrada de grandes blocos de carga, enquanto uma rede considerada “fraca” é aquela que sofre sérios desvios de tensão para as mesmas situações.

Isto posto, a avaliação da “força” da barra de carga ($S_{cc,3\phi}$) pode ser feita por meio de sua tensão de linha pré-defeito (V_n) e a corrente que surge na rede na ocasião do defeito (I_{cc}), estabelecendo a definição de nível de curto-circuito [6, 28, 30], de acordo com:

$$S_{cc,3\phi} = \sqrt{3}V_n I_{cc}. \quad (2.2)$$

Assim sendo, define-se a potência de curto-circuito pelo produto da tensão nominal (V_n) pela corrente de defeito (I_{cc}). Para uma tensão pré-defeito igual à nominal, têm-se que a potência de curto-circuito é dada pelo inverso da impedância de Thèvenin equivalente em pu:

$$\begin{aligned} S_{cc,3\phi} &= \frac{V_n^2}{Z_{Th}} \\ S_{cc,3\phi(pu)} &= \frac{1}{Z_{Th(pu)}}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

A partir do instante em que um defeito é estabelecido em uma determinada

barra, a corrente de defeito originada será tão maior quanto menor for a impedância de Thèvenin Z_{Th} observada deste ponto elétrico da rede. Por conseguinte, redes com baixos valores de Z_{Th} são referidas como redes fortes, apresentando altos níveis de potência de curto-circuito S_{cc} .

A Figura 2.3a ajuda na compreensão de desvios usando conceitos de massas ligadas por uma barra fictícia suspensa por um conjunto de molas, cujas constantes elásticas definem a força da suspensão. Quanto mais fortes são as molas, mais próximas as cargas estarão da altura de referência. Quanto mais fracas as molas são, mais distantes as cargas estão da altura de referência, distendendo as molas além de um determinado limite.

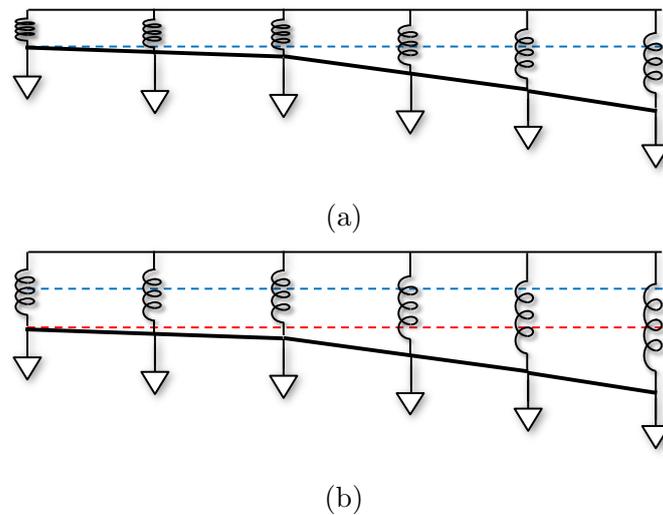


Figura 2.3: Desvios da altura de referência de acordo com cargas acopladas a: (a) um "forte" sistema barra-molas e (b) um "fraco" sistema barra-molas.

Analogamente, sempre que uma determinada rede elétrica apresentar um alto valor de impedância equivalente, ela também vai apresentar um alto valor de queda de tensão através da linha, piorando o desvio de tensão da referência. Segundo a proporção inversa verificada em (2.3), quanto maior a impedância da linha, menor a potência de curto circuito, i.e., mais fraca a rede se torna.

A rede de distribuição da Figura 2.4 ilustra o caso do aumento da impedância de linha e seu impacto no nível de curto circuito da barra de carga. Nesta barra é conectada uma carga fictícia de $13.68\angle 15^\circ \Omega$, com $FP= 0.96$, drenando corrente da rede e produzindo uma queda de tensão em seu ramo alimentador.

Para fins de análise qualitativa do comportamento da tensão da barra de carga segundo os parâmetros da rede, assumiu-se uma impedância de linha de $Z = 1+j1\Omega$, conforme valores tipicamente encontrados em redes reais [31], e aumentadas em 5, e depois em 10 vezes, com o objetivo de enfraquecer a rede, conforme (2.3). O resultado do enfraquecimento da rede é dado na Figura 2.5a. A análise do diagrama fasorial revela o aumento da queda de tensão na linha (v_{drop}), o decréscimo da

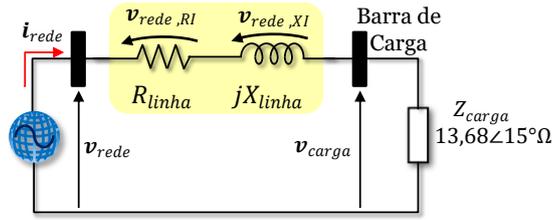


Figura 2.4: Aumento da impedância de linha Z_{linha} .

magnitude da tensão da carga (v_{carga}), vide Figura 2.5b, assim como o aumento do ângulo da barra de carga conforme a rede vai sendo enfraquecida, vide Figura 2.5c.

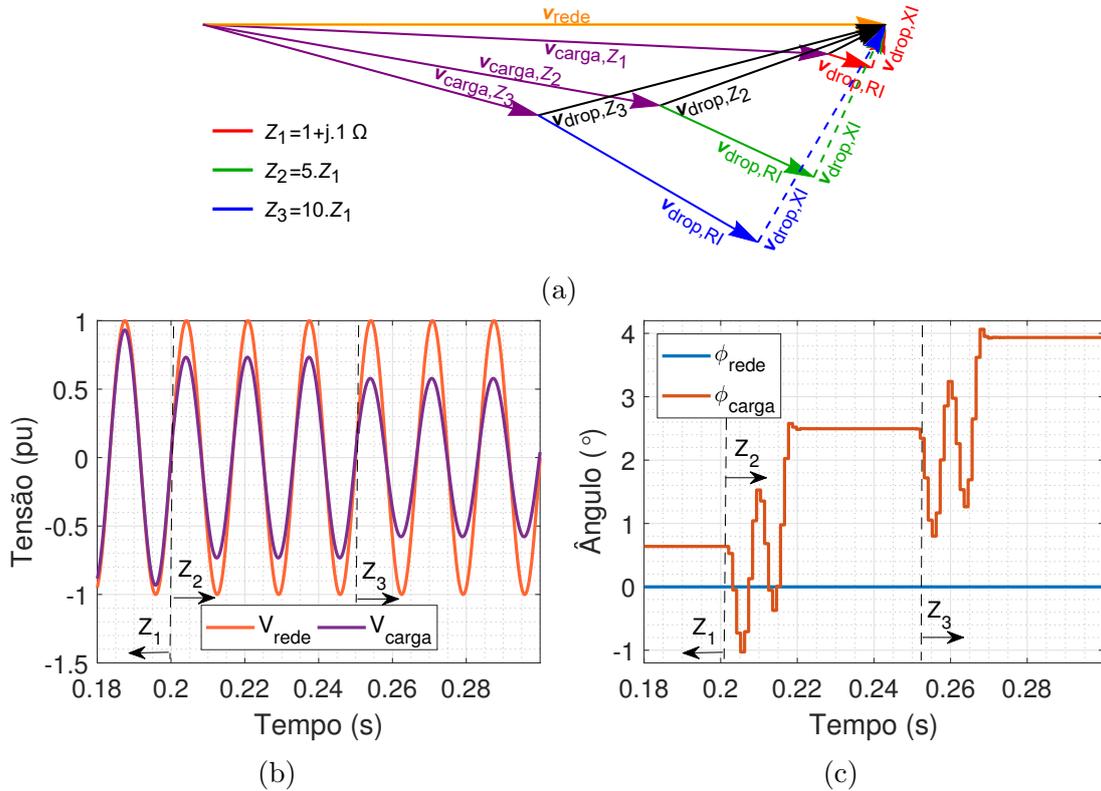


Figura 2.5: Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de Z_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.

O enfraquecimento da barra de carga pode ser representado pela sua potência de curto-circuito, que em termos práticos, indica quão eletricamente próxima esta barra está da fonte geradora, e com isso, quão mais próximas das condições equilibradas as tensões na barra de carga estão. Exatamente por este motivo é que as tensões nos extremos de um sistema de potência estão susceptíveis a desvios de tensão, pois quanto mais distantes os centros de carga estão, maiores serão as impedâncias que separam os dois subsistemas.

Uma das práticas comumente executadas por distribuidoras de energia consiste na redução da contribuição resistiva dos alimentadores por meio do recondutora-

mento das linhas, trocando-as por cabos de maior seção transversal. A consequência imediata é a elevação do fator X/R e também o aumento do nível de curto-circuito da rede. Contudo, nem sempre o recondutoramento dos alimentadores se mostra uma solução factível ou mesmo economicamente viável.

Observa-se ainda que no caso particular do circuito da Figura 2.4 a resistência e a reatância indutiva contribuem igualmente para a queda de tensão (v_{drop}), visto que as três situações têm fator $X/R = 1$, vide Figura 2.5a. Na seção a seguir, ambas as características contributivas são investigadas individualmente, considerando cada diferente tipo de carga conectável à rede.

2.2.2.1 Influência de R_{linha} e jX_{linha}

Ainda analisando o mesmo circuito da Figura 2.4, observa-se que a magnitude da tensão na barra de carga se comporta conforme a superfície mostrada na Figura 2.6, para variações dos parâmetros da rede. Pode-se inferir desta superfície que para uma rede com alto nível de curto-circuito, i.e., $Z_{linha} \approx 0$, a barra de carga permanece apresentando a tensão imposta pela fonte, $V_{rede} = 1.0$ pu, desempenhando o papel de uma barra infinita.

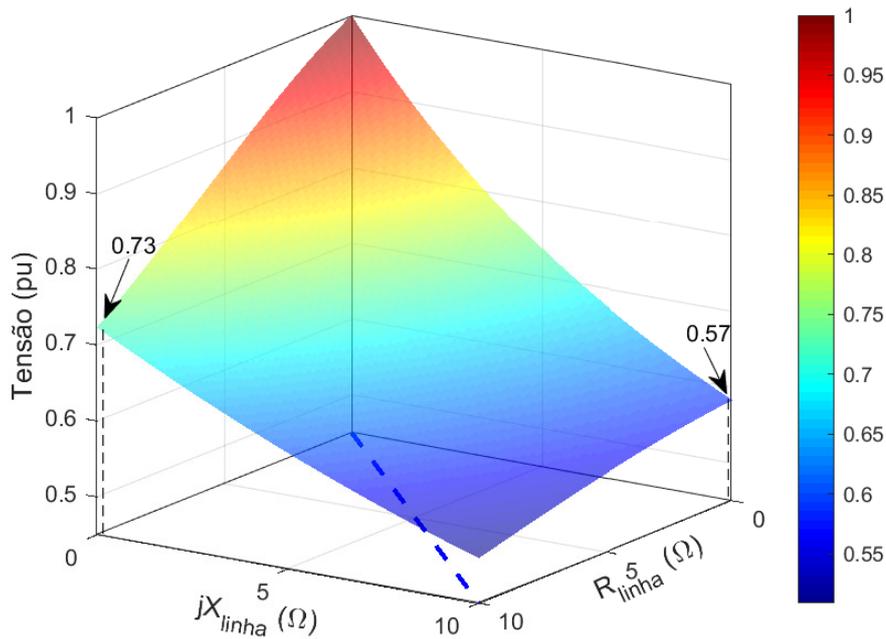


Figura 2.6: Tensão na barra de carga.

Porém, o decréscimo da tensão não ocorre indistintamente perante o aumento da característica resistiva ou indutiva. A linha tracejada azul, projetada no plano RX da Figura 2.6, delimita as regiões da superfície para fatores menores ou maiores que a unidade, da esquerda para a direita da linha. Na região de baixo fator X/R (à

esquerda), a superfície se mantém mais próxima da referência do que na região de alto fator X/R (à direita). Nota-se que nesta região, para $jX_{linha} = 10\Omega$, a tensão chega a alcançar valores menores que 0,6 pu, enquanto na região à esquerda da linha, com menores fatores X/R, a tensão se mantém acima de 0,7 pu para $R_{linha} \leq 10\Omega$.

A superfície de tensão investigada pode ser representada fasorialmente na Figura 2.7, para os casos de aumento de R_{linha} e na Figura 2.8, para o caso do aumento de jX_{linha} . Vê-se na Figura 2.7a, que à medida em que R_{linha} aumenta, a tensão na barra de carga (v_{carga}) se reduz. A simulação deste caso corrobora o comportamento dos fasores, conforme se vê nas formas de onda da Figura 2.7b, e nos módulos das tensões da Figura 2.7a. Além disso, o defasamento angular entre v_{carga} e v_{rede} diminui, vide Figura 2.7c, como consequência do aumento da contribuição da parcela resistiva ($v_{drop,RI}$) na queda de tensão total (v_{drop}). Outro ponto que merece destaque é a baixa contribuição que a parcela indutiva ($v_{drop,XI}$) tem na queda de tensão total (v_{drop}). É precisamente por este motivo que a compensação de potência reativa têm pouca influência em redes predominantemente resistivas.

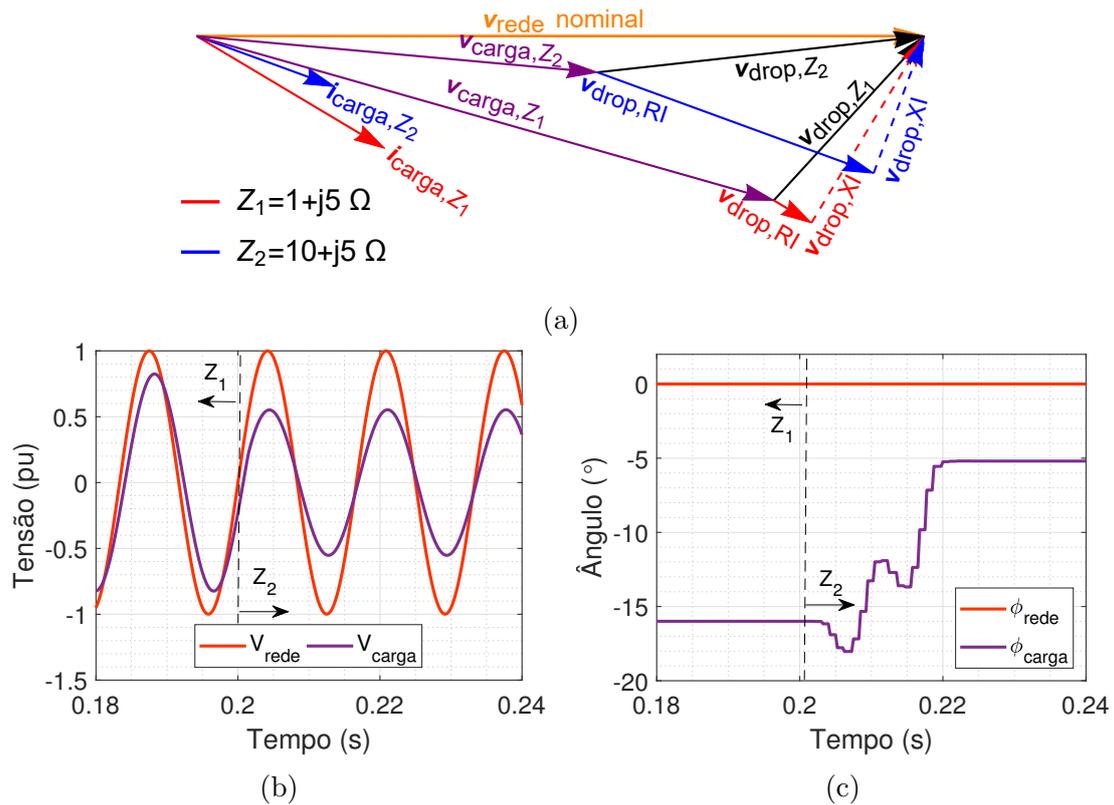


Figura 2.7: Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de R_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.

Por outro lado, a Figura 2.8a mostra o comportamento do desvio de tensão na barra de carga para o aumento da reatância indutiva da rede. Percebe-se primeiramente o impacto no defasamento da tensão, que passa a aumentar ao invés de diminuir, como na Figura 2.7a. Note-se que desta vez é a parcela resistiva ($v_{drop,RI}$)

que deixa de contribuir significativamente para a queda de tensão total (v_{drop}), fortemente associada à parcela indutiva ($v_{drop,XI}$).

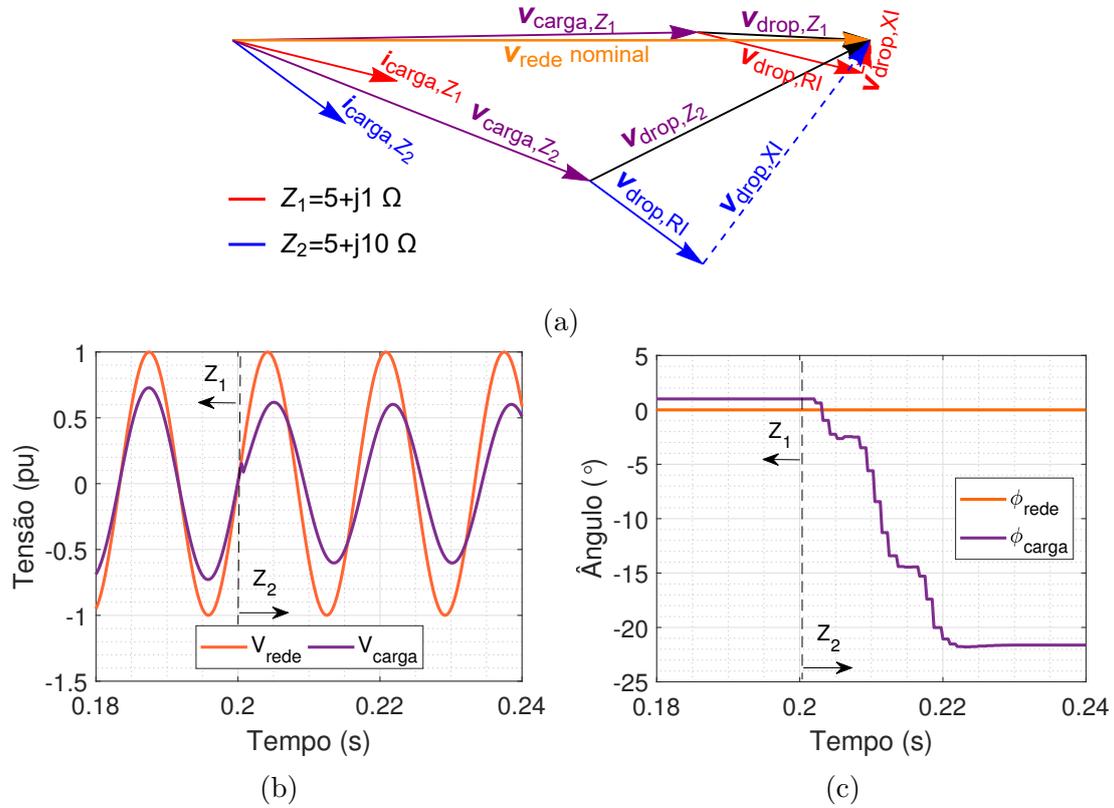


Figura 2.8: Comportamento da tensão na barra de carga para o aumento de jX_{linha} : (a) diagrama fasorial, (b) tensões instantâneas e, (c) ângulo de fase das tensões.

2.2.3 Desequilíbrio da Impedância da Rede

Sendo as impedâncias da linha também responsáveis pela transgressão de tensão nas barras da carga, é de se esperar que quaisquer diferenças entre elas contribuam para desvios em diferentes magnitudes. Em sistemas de transmissão, as impedâncias de linha supramencionadas não representam grandes problemas por conta de soluções bem conhecidas e adotadas em tais sistemas. Como exemplo, as diferenças nas impedâncias de linha devido às configurações geométricas das linhas aéreas podem ser reduzidas mediante a transposição dos cabos ao longo do sistema. Assim sendo, estabelece-se que desequilíbrios de tensão não são um fenômeno naturalmente observado em sistemas de transmissão [3].

Todavia, sistemas de distribuição apresentam desigualdades entre as impedâncias das fases dos alimentadores que não são compensadas. Segundo KERSTING [11], a transposição de linhas não é uma prática comum em redes de distribuição, e desta forma, os espaçamentos desiguais entre as fases do alimentador permanecem gerando acoplamentos distintos entre os condutores. Isso induz o surgimento de

impedâncias próprias e mútuas diferentes para cada fase do alimentador, o que permite concluir que tais redes são inerentemente desequilibradas. Ou seja, ainda que fosse possível manter um padrão equilibrado de cargas conectadas ao longo de todo o alimentador, este, por si só, já seria responsável pelo atendimento às cargas com tensões desequilibradas.

Além disso, típicos sistemas de distribuição geralmente operam alimentando cargas monofásicas, bifásicas, e/ou trifásicas, em diversas combinações possíveis (abc , ab , bc , ca , a , b , c). Deste modo, tais combinações vêm contribuir ainda mais com o cenário já desequilibrado em redes de distribuição.

Em resumo,

1. Baixo fator X/R , inviabiliza a regulação de tensão com métodos baseados em compensação de reativos (derivação);
2. As linhas podem se estender ao longo dos centros consumidores com múltiplas combinações de fases (abc , ab , bc , ca , a , b , c);
3. As conexões de cargas não são necessariamente equilibradas;
4. Linhas comumente radiais, e sem conexões fortemente malhadas, apresentam menores níveis de curto-circuito S_{cc} .

Descritas as características que identificam o problema de tensão em redes de distribuição, a seguir serão apresentadas as características de alguns dos métodos de controle de tensão conhecidos, detalhando a efetividade do método direto em redes de distribuição, em comparação com o método indireto.

2.3 Métodos de Controle de Tensão

Os métodos apresentados nessa seção consistem em soluções que podem reduzir os desvios de tensão ligados tanto a cenários equilibrados quanto desequilibrados. Como exemplo, o recondutoramento de alimentadores, prática comum em redes de distribuição, pode resolver a violação dos quedas de tensão para um determinado ponto de operação da rede. Já em cenários desequilibrados a realocação de cargas ao longo das fases pode reduzir o desequilíbrio de tensão na rede, sem contudo, eliminá-lo. Porém, neste caso, ainda que atenda ao limite máximo de FD dado pelo PRODIST, as redes de distribuição que não podem ser repotenciadas para cabos de seções maiores, permanecem apresentando baixo nível de curto circuito. Assim, compromete-se a adequação de tensão dentro dos limites permitidos, principalmente em alimentadores rurais.

Portanto, recorre-se a métodos que corrijam os desvios de tensão nos sistemas de potência sendo classificados como métodos de controle indiretos e diretos de tensão [12, 32].

2.3.1 Controle Indireto de Tensão (CIT)

A eficácia do controle indireto de tensão (CIT) se verifica quando existe predominância da contribuição da reatância indutiva na impedância da rede, por conta do forte acoplamento existente entre tensão e potência reativa em redes com alto fator X/R. O controle da tensão consiste na compensação de potência reativa na barra da carga através de equipamentos que injetem/drenem corrente reativa, conceitualmente retratada na Figura 2.9.

Dessa forma, diz-se que o controle de tensão é dito indireto pelo fato de ser realizado através de outra grandeza, neste caso, a potência reativa [12].

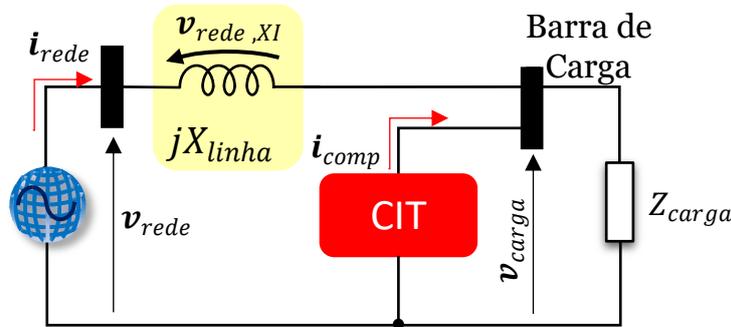


Figura 2.9: Estratégia conceitual do CIT.

Será utilizado o exemplo do capacitor em paralelo da próxima seção para detalhamento do CIT na rede, por ser uma das estratégias mais comuns aplicadas para regulação de tensão [1, 5, 28, 30, 33].

2.3.1.1 Reator ou capacitor em paralelo

Qualitativamente, considere-se o circuito da Figura 2.9 puramente indutivo, cujo comportamento da tensão na barra pode se apresentar de duas diferentes maneiras, representadas na Figura 2.10. Na Figura 2.10a, a corrente atrasada do sistema (i_{atraso}) conduz à queda de tensão ($v_{carga} < v_{rede}$). Por outro lado, a corrente adiantada do sistema (i_{avanco}) produz uma elevação de tensão ($v_{carga} > v_{rede}$), vide Figura 2.10b. Cabe salientar que a modelagem da carga influencia no avanço ou atraso da corrente da rede. Cargas típicas de uma rede de distribuição apresentam alto fator de potência atrasado, e portanto, a ocorrência da Figura 2.10a é mais comum.

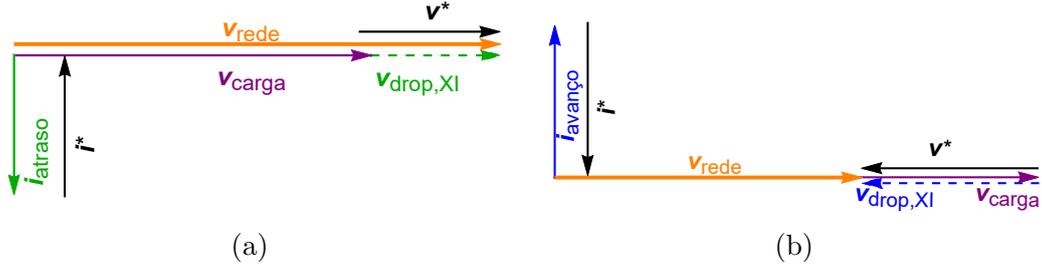


Figura 2.10: Compensação para correntes: (a) em atraso e, (b) em avanço.

Como depreende-se da Figura 2.10a, a injeção da corrente de compensação i^* adiantada se contrapõe à corrente em atraso da rede, fazendo $v^* = v_{drop,XI}$ e, assim, provendo a correção da queda de tensão na barra de carga. Esta corrente pode ser injetada por meio da instalação de capacitores *shunt* na barra de carga. Desse modo, diz-se que o controle de tensão efetuado é indireto por causa da anulação da corrente reativa atrasada do sistema, compensada pela injeção de correntes reativas capacitivas na barra em questão.

De igual maneira, compreende-se que o fenômeno de elevação de tensão também pode ser mitigado pelo mesmo princípio indireto de controle. Note que uma eventual corrente adiantada na rede, vide Figura 2.10b, pode ser compensada pela injeção da corrente reativa indutiva i^* , que faz $v^* = -v_{drop,XI}$. Para tal, um reator seria necessário para produção desta corrente de compensação.

A compensação de tensão via reator ou capacitor *shunt* representa um controle discreto de tensão, que pode ser suavizado por meio da instalação de um banco de capacitores ou reatores, manobrando-os segundo a necessidade de compensação, e obtendo um controle mais preciso. Outra maneira de se controlar a tensão em redes com alto fator X/R é por meio de equipamentos baseados em chaves em estado sólido, como o STATCOM descrito na próxima seção.

2.3.1.2 STATCOM

Um dos equipamentos que permitem a implementação do CIT é o Compensador Estático Síncrono (*Static Synchronous Compensator*, STATCOM), tendo como vantagem em relação a capacitores *shunt* o fato de perfazer um controle contínuo de tensão.

Este equipamento consiste em um conversor de eletrônica de potência capaz de prover suporte de tensão em sistemas com alto fator X/R [34], substituindo em muitos casos o compensador síncrono rotativo [28]. Inicialmente, o STATCOM, representado esquematicamente na Figura 2.11, constitui-se de um conversor fonte de tensão, cujo elo CC é composto por um capacitor que serve para garantir a característica de fonte de tensão CC. Este capacitor detém uma pequena capacidade

de armazenamento de energia, i.e., com pequena constante de inércia H equivalente (geralmente de 100 a 1000 vezes menor que um compensador síncrono tradicional). Os STATCOMs atuais usam Conversores Modulares Multiníveis (*Modular Multilevel Converter*, MMC), não têm um lado CC dispondo de submódulos em ponte completa ligados em delta [34, 35].

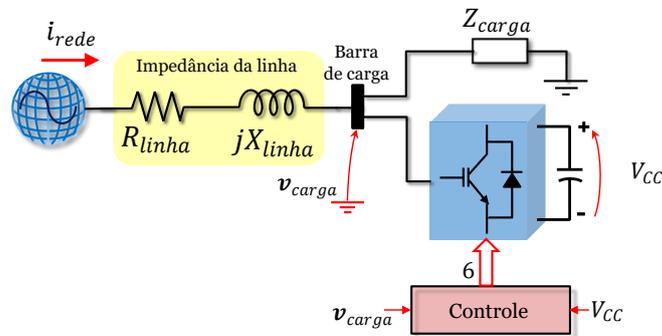


Figura 2.11: STATCOM.

O suporte à tensão utilizando a característica de compensação de reativos com STATCOM tem sido estudado por diversos trabalhos de pesquisa, apresentando uma grande variedade de topologias e controles distintos [14, 16, 20]. Um dos controles típicos, implementado por BARCELOS [24], desenvolve a compensação de reativos no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o sistema elétrico e uma fonte de geração eólica. O esquema de controle implementado em [24] envolve a obtenção das leituras de tensões no PAC, assim como a magnitude das mesmas. A compensação de reativos no PAC é garantida pelo acionamento do conversor trifásico, cujos sinais de chaveamento são sintetizados pelo controle ilustrado na Figura 2.12.

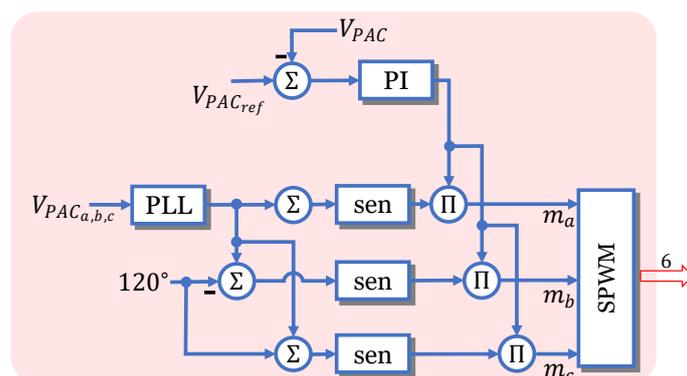


Figura 2.12: Controle do STATCOM.

A magnitude da tensão na barra é comparada com um valor de referência, e o erro da comparação alimenta um controlador PI (proporcional-integral), cuja saída fornece a magnitude de compensação para o sistema. O sincronismo dos sinais enviados ao SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) é garantido pela

implementação de um PLL, rastreando o ângulo de fase da rede. A compensação de reativos é garantida graças ao sincronismo da corrente injetada i^* em quadratura com a tensão da barra controlada, conforme mostrado na Figura 2.10.

Teoricamente, a energia armazenada no capacitor do elo CC pode ser desprezada, dado que o princípio de operação do STATCOM envolve compensação de reativos, sem associar fluxo de potência ativa. Porém, devido às perdas de chaveamento em alta frequência do conversor, faz-se necessário permitir um certo fluxo de potência ativa pelo conversor, carregando o capacitor, de maneira que este possa se comportar como uma fonte de tensão CC.

Assim sendo, compensar a potência reativa na barra de interesse significa regular a magnitude de sua tensão, enquanto que, permitir um certo fluxo de potência ativa da barra para o conversor garante o controle de tensão no elo CC.

2.3.1.3 Controle de potência ativa

Se por um lado a sensibilidade da tensão em redes predominantemente indutivas está mais ligada à potência reativa, por outro, em redes predominantemente resistivas a tensão se torna mais fortemente acoplada à potência ativa fluindo na rede. Com efeito, esse é um dos problemas mais atuais no tocante à penetração de recursos distribuídos na rede de distribuição: a origem de flutuações de tensão no ponto de acoplamento comum devido à injeção intermitente de potência ativa, conforme aponta PERERA [36].

A Figura 2.13 mostra o circuito de uma rede de distribuição com uma fonte de geração distribuída (GD) tipicamente representada como uma fonte de corrente [24]. Para efeitos de simplificação, considerou-se uma carga puramente resistiva, drenando potência da rede.

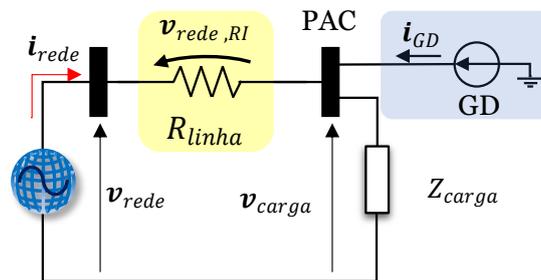


Figura 2.13: Rede predominantemente resistiva com GD.

Sem a atuação da GD no sistema, a corrente i_{rede} que passa pelo alimentador causa a queda de tensão $v_{drop,RI}$ observada no diagrama da Figura 2.14, ocasionando $v_{carga} < v_{rede}$. A partir do momento em que a GD injeta potência ativa no ponto de acoplamento comum (PAC), representada pela corrente i_{GD} , e supre a potência

requerida pela carga, a queda de tensão $v_{drop,RI}$ no alimentador deixa de ser observada, elevando o perfil de tensão do PAC de volta ao valor nominal da rede, i.e., $v_{carga}^* = v_{rede}$, para o caso ideal em que $i_{carga} = i_{GD}$.



Figura 2.14: Diagrama fasorial de compensação de potência ativa.

Ainda que não seja de interesse econômico para fins de faturamento do prossuidor, considera-se a manutenção da tensão na barra como sendo um método de controle indireto, visto ser regulada por meio da injeção de potência ativa. Conforme aponta BARCELOS [24], mesmo que a regulação da tensão não seja o alvo primário da GD, o número de unidades geradoras pode ser restringido para evitar grandes variações da tensão. Alguns autores destacam que esta medida se enquadra como um controle secundário, a princípio conhecida como *power curtailment* [37], visando a manutenção da frequência elétrica dentro dos limites dados pelo PRODIST. Porém outros trabalhos [2, 17] abordam o assunto dentro do contexto de controle de tensão.

Portanto, posto que existem redes para as quais o método indireto pode ser ineficaz, aborda-se na seção a seguir o conceito do CDT.

2.3.2 Controle Direto de Tensão (CDT)

Enquanto equipamentos baseados no CIT são conectados em paralelo, o CDT requer a instalação dos equipamentos em série na rede elétrica, conceitualmente representados na Figura 2.15. Distingue-se o termo “*direto*” neste método de controle pelo fato de que o CDT perfaz a regulação de tensão utilizando-se desta mesma grandeza elétrica, adicionando tensões de compensação em série na rede.

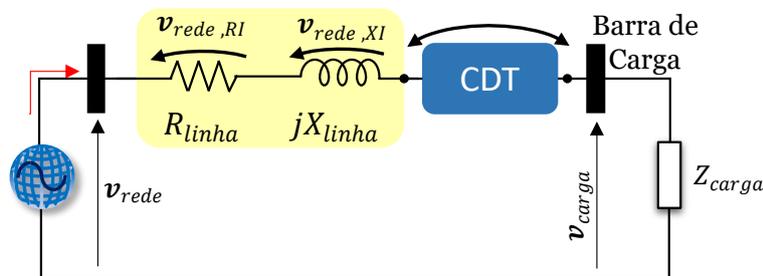


Figura 2.15: Estratégia conceitual do CDT.

Como se nota da Figura 2.15, a compensação pode ser feita somando ou subtraindo tensões na linha, o que pode ser realizado de maneira discreta, através de

transformadores com tapes variáveis, ou de modo contínuo, mediante o uso de equipamentos baseados em chaves de estado sólido.

Nas seções a seguir serão apresentados os principais equipamentos baseados no CDT, mais usualmente aplicados a sistemas de distribuição.

2.3.2.1 Transformador com comutação de tape sob carga e Regulador de Tensão por Degraus

O transformador com comutação de tape sob carga, aqui referenciado pela sua sigla inglesa OLTC, nada mais é do que um transformador, cujos enrolamentos do secundário podem ser ajustados sob carga, conforme mostra a Figura 2.16a, o que possibilita ininterruptibilidade do fornecimento de energia. Ainda baseado na transformação de tensão, pode-se regular a tensão no alimentador por meio de um auto-transformador com tapes ajustáveis, conhecidos como Reguladores de Tensão por Degraus, como mostra a Figura 2.16b.

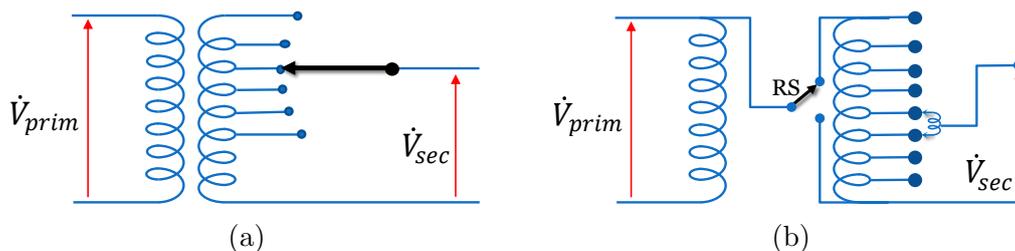


Figura 2.16: Circuito básico do: (a) OLTC e do (b) SVR.

Analisando o OLTC da Figura 2.16a, percebe-se que por meio do ajuste dos tapes, a tensão de secundário pode assumir magnitudes maiores ou menores que a tensão do primário. Isso torna o OLTC aplicável tanto para corrigir situações de queda quanto de elevação de tensão no alimentador.

O mesmo pode ser inferido da operação do SVR, com a principal diferença de que por ser um auto-transformador, não há desacoplamento elétrico entre o primário e o secundário. Segundo KERSTING [11], os SVRs mais comuns detêm uma chave reversora RS (*Reversal Switch*), como a ilustrada na Figura 2.16b, capacitando o equipamento a fornecer tensões em uma faixa de $\pm 10\%$, usualmente em 32 degraus.

A manobra dos tapes em tais dispositivos geralmente é comandada por um circuito de controle, como o da Figura 2.17, conhecido como *Line Drop Compensator*, que, através de medições de corrente e tensão no alimentador, é capaz de estimar a queda de tensão no alimentador. A estimativa da queda de tensão previne que o consumidor no fim do alimentador seja atendido com tensões fora dos limites aceitáveis. Tendo sido feita tal estimativa, um relé automático regulador de tensão comanda o eixo de um motor que altera os tapes para a posição necessária à regulação.

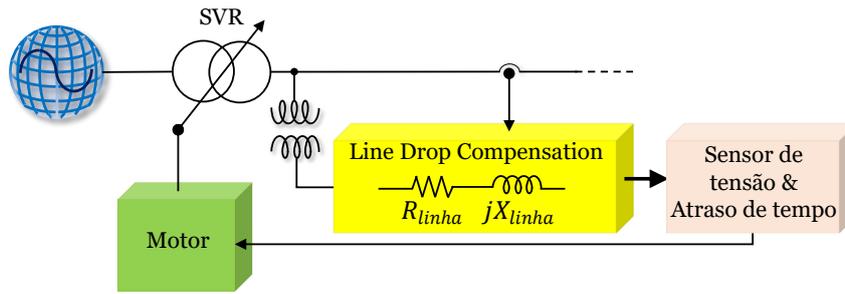


Figura 2.17: Circuito de comando de tapas.

Qualitativamente, a Figura 2.18 ilustra a aplicação de equipamentos reguladores de tensão como o OLTC/SVR no ramo alimentador de um sistema de distribuição. Como se verifica na situação hipotética da Figura 2.18a, o fornecimento de energia ao longo de uma rede com baixo nível de curto-circuito ocasionaria a transgressão de tensão antes mesmo da metade do ramo. A infração de tensão pode ser remediada mediante a instalação de OLTCs/SVRs na barra da subestação e/ou ao longo da linha, corrigindo o perfil de tensão na rede, vide Figura 2.18b. Inclusive, a tensão pode ser elevada além do limite superior sem prejuízos, desde que já se situe dentro dos limites aceitáveis na primeira carga do alimentador. Esta prática possibilita que a maior parte do alimentador se encontre dentro da faixa permissível até que seja necessária a instalação de mais um regulador de tensão na rede.

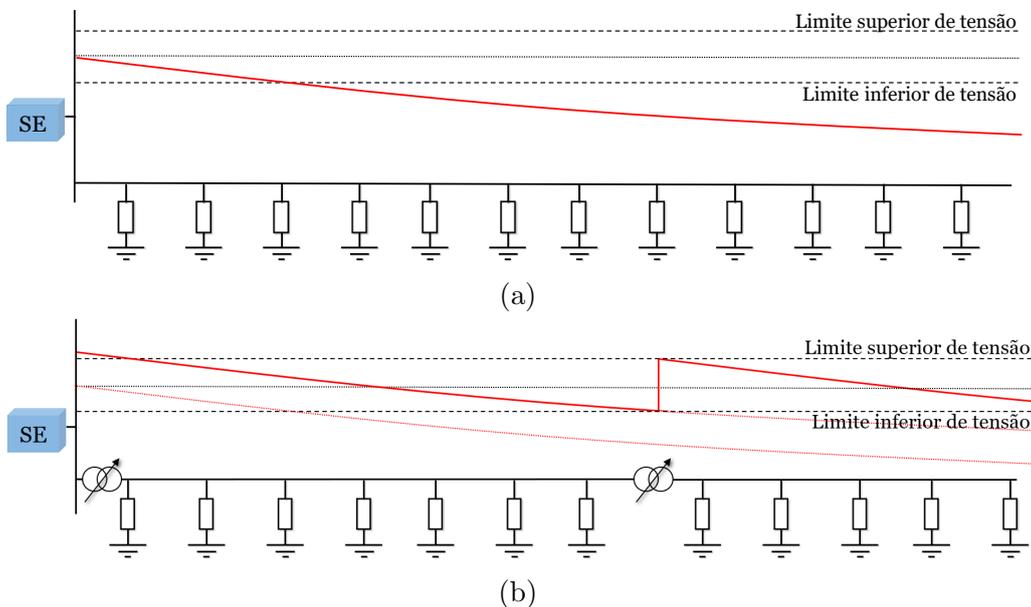


Figura 2.18: Perfil tensão no alimentador (a) sem regulação, (b) controlado com uso do OLTC.

A principal desvantagem na utilização do OLTC ou do SVR como estratégias de regulação de tensão está ligada com a quantidade limitada de manobras que tais equipamentos são capazes de realizar em relação ao sua vida útil. Em segundo lugar,

vale salientar também que tais manobras não são rapidamente realizáveis, podendo levar até vários segundos para serem completadas.

Esta demora incorre diretamente no tempo em que o alimentador fica submetido a tensões inadmissíveis até o fim do processo de comutação. Além deste tempo, os relés que comandam o acionamento do motor geralmente possuem um retardo de tempo associado, incluído justamente para evitar que os tapes sejam comutados desnecessariamente para VTCDs. Ou seja, um retardo de tempo longo pode otimizar o número de manobras do OLTC, evitando que comandos de manobra sejam dados desnecessariamente pelo controle para VTCDs. Em contrapartida, aumenta-se o tempo para dar a ordem da mudança do tape e a efetiva mitigação do distúrbio de tensão.

Em terceira instância, cabe mencionar que normalmente OLTCs são construídos para perfazerem transformações do tipo *step-down*, ou seja, transformadores MT/BT instalados em redes passivas. Neste ponto, o problema se constitui na tendência já mencionada do aumento de prosumidores na rede de distribuição que, dada certas condições de geração, podem incorrer na reversão do fluxo de potência ativa na rede. Nestas situações, o OLTC deverá ser capaz de perfazer regulações de tensão para as quais normalmente não é concebido. Em [38] destaca-se que a alta penetração de GD pode levar o OLTC ao último tape disponível, causando a subsequente perda do controle de tensão. Desta forma, alguns OLTCs podem não ser capazes de operar com redes ativas nas quais o fluxo de potência pode se inverter [39].

Assumindo portanto que o cenário de distribuição de energia se direciona a apresentar redes cada vez mais ativas, outras soluções serão apresentadas nas seções a seguir, visando a correção de sub/sobretensões.

2.3.2.2 Restaurador Dinâmico de Tensão

O Restaurador Dinâmico de Tensão (*Dynamic Voltage Restorer*, DVR) tem sido utilizado como um dos principais equipamentos baseados no CDT [13, 21, 40, 41]. A Figura 2.19 mostra a topologia básica do DVR, consistindo em um conversor fonte de tensão conectado em série com a rede elétrica através de um transformador. O papel da fonte de tensão do elo CC pode ser representado classicamente por elementos armazenadores de energia [21, 42], como baterias, ultracapacitores, ou *flywheels*.

Além desta topologia clássica, existem também outras formas de sintetização de tensão CC, empregando um retificador a diodos conectado no lado CC do DVR, vide Figura 2.20. O conversor fonte de tensão da Figura 2.20a permanece desempenhando seu papel de adicionar tensões na rede, enquanto um retificador conectado em *shunt* à montante do transformador série mantém tensão contínua no elo CC. Já na segunda topologia possível, vide Figura 2.20b, a alimentação do retificador é feita diretamente

na barra de carga.

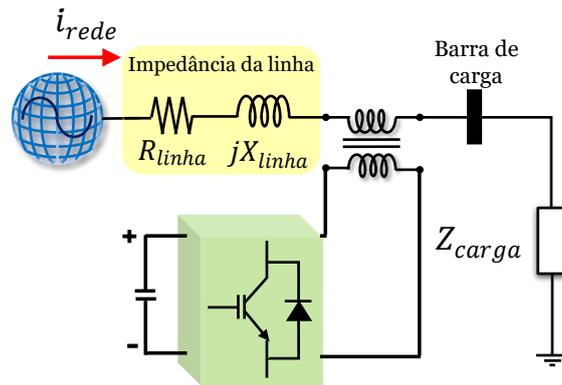


Figura 2.19: DVR.

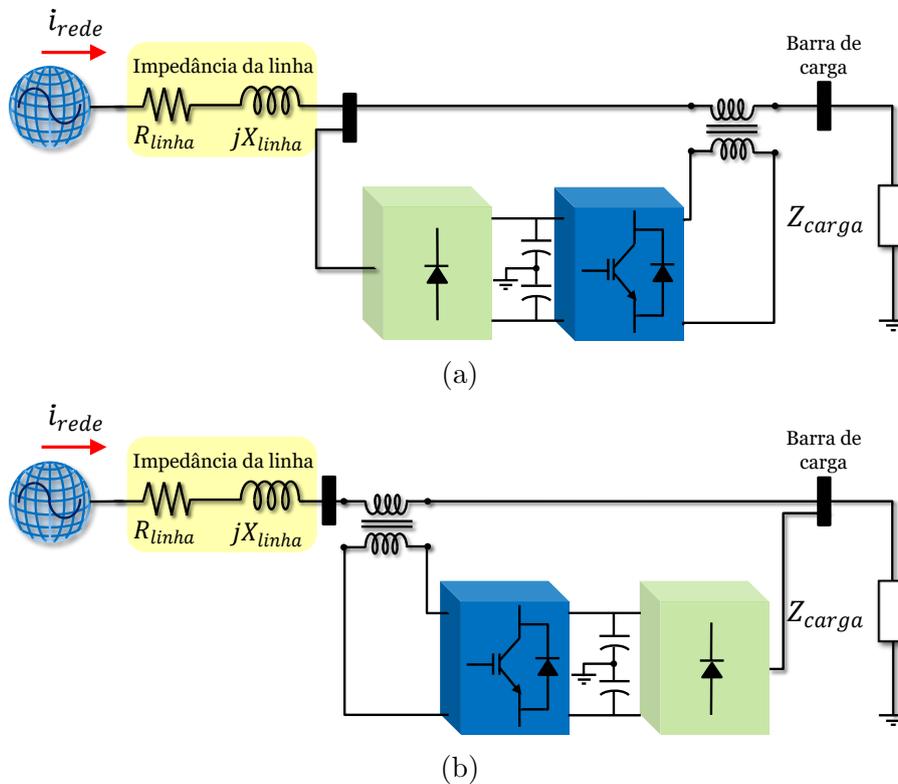


Figura 2.20: Topologias possíveis: (a) retificador *shunt* conectado à montante e (b) retificador *shunt* conectado à jusante do transformador série.

A instalação do retificador como supridor de tensão CC para o DVR constitui-se uma solução substitutiva aos elementos armazenadores de energia da topologia clássica. Ambas as estruturas da Figura 2.20 apresentam vantagens e desvantagens, frente aos eventuais quedas de tensão da rede. Tome-se, por exemplo, a estrutura do retificador não-controlável conectado à montante do transformador série, na Figura 2.20a. Segundo NIELSEN e BLAABJERG [43], para casos de queda de tensão na rede, o elo CC também estará submetido às reduções da tensão retificada, o que

incorrerá necessariamente na qualidade da tensão da rede, caso tal redução no elo CC leve o DVR a operar na região de sobremodulação [44].

Em contraponto, a instalação *shunt* do retificador junto à barra de carga, a jusante do transformador série, sugere uma melhor eficiência da operação do DVR. Dado que a tensão da barra na qual o retificador está conectado já se encontra controlada, por causa da adição de tensões de compensação à montante da mesma, a tensão de entrada do retificador não está mais susceptível a distúrbios. Dessa maneira, os quedas de tensão na rede não são percebidos pelo elo CC, mantendo o seu valor nominal de tensão, e evitando comprometimentos no esquema de chaveamento do DVR [43].

Diversos esquemas de controle têm sido implementados no DVR, todos objetivando o controle da tensão em magnitude e em fase, basicamente. A Figura 2.21 mostra a estratégia adotada em [45], que compensa os quedas de tensão utilizando controle vetorial associado a um PLL.

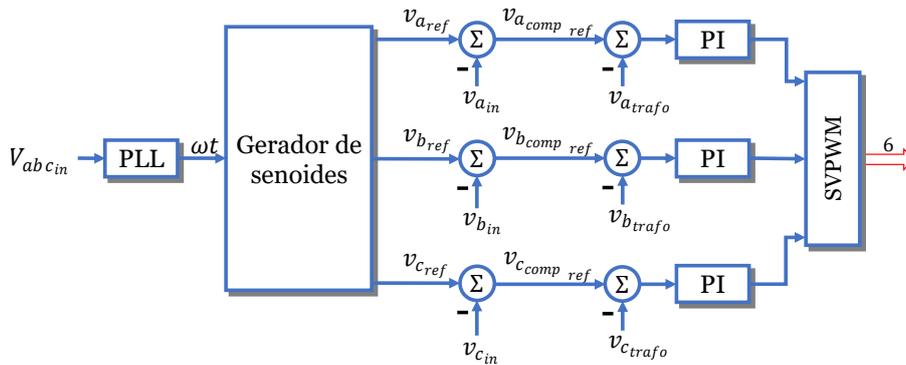


Figura 2.21: Controle do DVR implementado em [45].

O bloco *Gerador de Senóides* da Figura 2.21 produz as tensões trifásicas de referência $v_{abc_{ref}}$ utilizando a topologia de DVR à montante da Figura 2.20a. Após a comparação com as tensões na barra de carga $v_{abc_{in}}$, gera-se as tensões ideais de referência de compensação $v_{abc_{comp_{ref}}}$.

Devido às não-idealidades do circuito de potência, compara-se as tensões $v_{abc_{comp_{ref}}}$ confeccionadas pelo controle com as efetivamente injetadas em cada fase do transformador $v_{abc_{trafo}}$, gerando a entrada do controlador PI, e por conseguinte, anulando o erro em regime permanente. Por fim, as saídas de cada PI são dadas como entrada do esquema SVPWM, que efetivamente aciona as chaves do DVR.

2.3.2.3 Compensador Eletromagnético de Tensão

O compensador eletromagnético de tensão (*Voltage Electromagnetic Compensator*, VEC), também representa um equipamento que utiliza o princípio do CDT [24]. Este equipamento realiza o reforço de tensão na rede da mesma maneira que o DVR,

com o mesmo conceito de conexão *shunt* para sintetização da tensão série. Dessa maneira, o equipamento dispensa qualquer elemento armazenador de energia, como se vê na Figura 2.22.

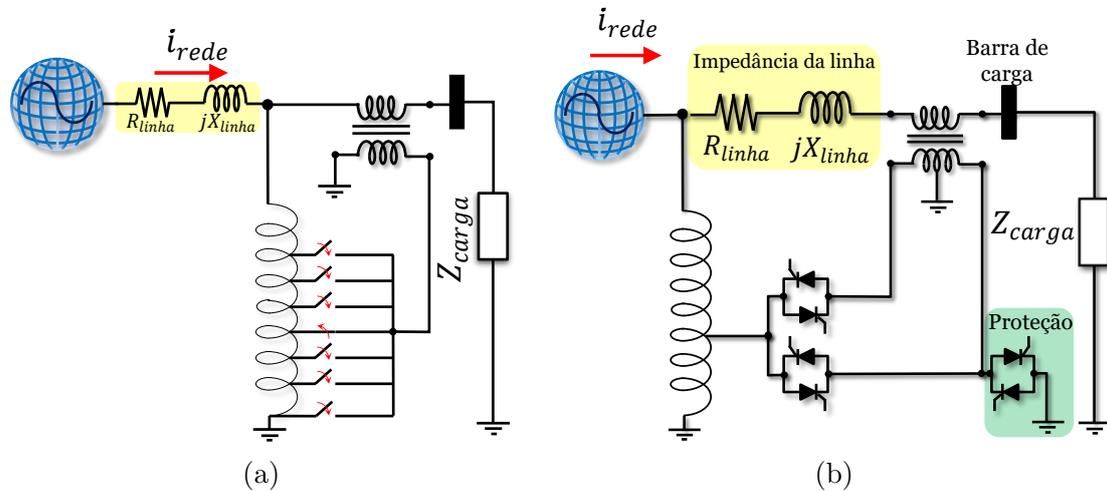


Figura 2.22: VEC com: (a) comutador e, (b) chaves de estado sólido.

O princípio de atuação consiste na manobra mecânica de chaves nos tapes do autotransformador, sintetizando tensões ajustáveis em série para regular a tensão na barra de carga. Com vistas à maior flexibilidade de geração de tensão em série na rede, múltiplos tapes dos enrolamentos do autotransformador proveem uma suavização do controle discreto de tensão. Neste sentido, a Figura 2.22b revela o alcance de um controle discreto mediante uso de chaves de estado sólido, como tiristores em anti-paralelo, substituindo as comutações mecânicas da versão anterior do VEC. Nota-se também um par de tiristores em anti-paralelo, acionados conforme necessidade de escoamento de corrente para o terra visando a proteção do transformador série em casos de sobretensão.

As vantagens do uso do VEC como equipamento regulador de tensão se revelam na viabilidade técnica e no custo relativamente baixo de aquisição de autotransformadores. No entanto, devido à frequência de chaveamento próxima à fundamental, o conteúdo de distorção harmônica pode resultar em índices elevados [24, 46].

2.3.2.4 Condicionador Universal de Potência Ativa

O Condicionador Universal de Potência Ativa (*Universal Active Power Line Conditioner*, UPLC), apresentado na Figura 2.23, é um equipamento baseado na combinação de várias funcionalidades de compensação de fluxo de potência ativa, controle de potência reativa, regulação de tensões, e eliminação de conteúdos harmônicos de tensões e correntes, sendo caracterizado como um dos equipamentos mais versáteis de FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) [34]. A estrutura em *back-to-back*

dos conversores, ambos baseados em chaves auto-comutadas, permite a bidirecionalidade de fluxo de potência pelos conversores.

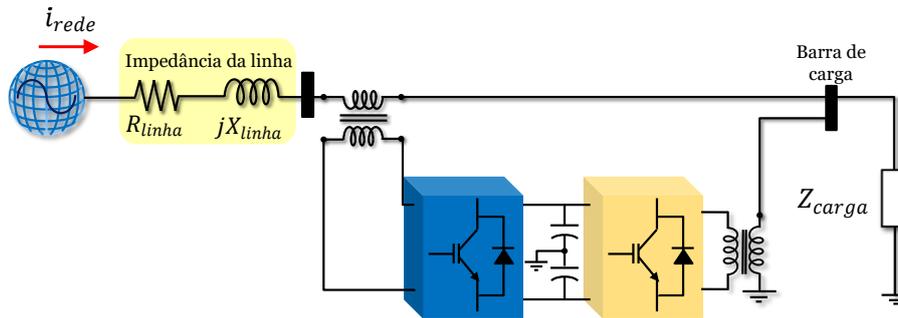


Figura 2.23: UPLC.

Diversas funcionalidades podem ser desempenhadas pelo UPLC. Como exemplo, o conversor *shunt* da estrutura mostrada pode operar como um filtro ativo para a barra na qual está conectada, onde as correntes harmônicas a serem produzidas pelo conversor são injetadas na barra com a mesma magnitude das correntes harmônicas do sistema, porém em oposição de fase. Desta forma, o conversor se comporta na rede como um sorvedouro de correntes harmônicas, de modo que a corrente no sistema elétrico contenha apenas a componente fundamental. Enquanto o conversor *shunt* se comporta como fonte de corrente, o outro conversor funciona como um filtro série, focando na produção de tensões harmônicas com a mesma magnitude daquelas presentes na rede, porém em oposição de fase, eliminando todo o conteúdo de tensão diferente da fundamental. A combinação das duas funcionalidades de filtragem na estrutura física da Figura 2.23 o converte num UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*).

Concernente ao fluxo de potência em sistemas de transmissão, o UPLC passa a operar como Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller*, UPFC). Segundo proposta originalmente feita por GYUGYI *et al.* [25], o UPFC é capaz de realizar compensações de potência na frequência fundamental da rede com versatilidade, combinando características do STATCOM com o Compensador Série Síncrono Estático (*Static Synchronous Series Compensator*, SSSC).

Além disso, o UPFC também pode controlar outras grandezas, como a impedância equivalente vista do ponto de conexão, a defasagem angular, ou a tensão. Isto posto, a aplicação do UPFC para controle de tensão realizado por BARCELOS [24] permitiu o emprego do CDT pela sintetização de tensões de compensação em série com o transformador. Como a Figura 2.24 ilustra, o conversor *shunt* é conectado à montante do transformador série, regulando o fluxo de potência ativa para o elo CC para controlar a tensão retificada. Na proposta de uso do UPFC como equipamento baseado no CDT, BARCELOS [24] comprova a eficácia da mitigação de flutuações de tensão ocasionadas pela intermitência de geração de potência ativa

no PAC, conforme Figura 2.24.

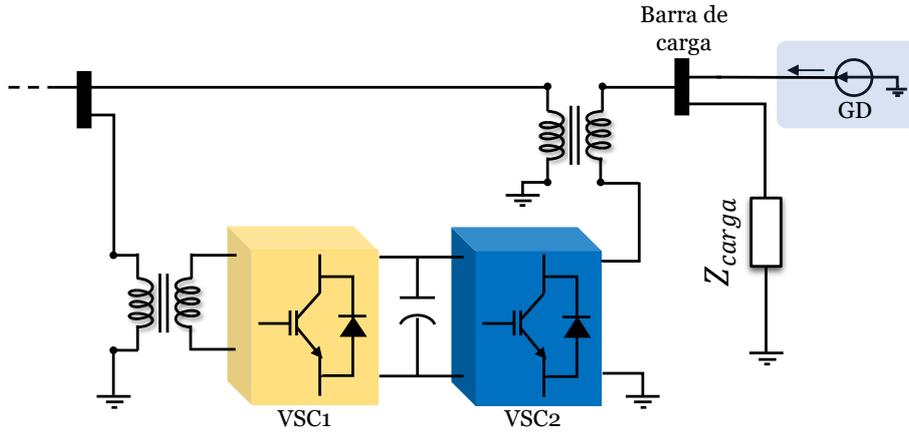


Figura 2.24: Esquemático do UPFC para controle de tensão em redes com GD.

O controle do conversor *shunt* garante a tensão no elo CC através de um algoritmo que manipula o balanço de energia no elo CC. Uma das propostas dada por BARCELOS [24] consiste no controle da tensão CC usando o clássico controle de corrente por banda de histerese da Figura 2.25. A ação deste algoritmo consiste na comparação da tensão do elo CC (V_{CC}) com uma dada referência (V_{CCref}), gerando o erro de entrada do controlador PI. A saída deste controlador é a amplitude da corrente de referência (I_m), convertida na corrente i_{ref} por meio da multiplicação pela senoide de amplitude unitária, em sincronia com a tensão de entrada (V_{VSC1}). Mais adiante compara-se a corrente i_{ref} com a efetivamente circulante na entrada do VSC₁, i.e., i_{VSC1} . O erro obtido é dado como entrada para o controle por banda de histerese, gerando os sinais de disparo do VSC₁.

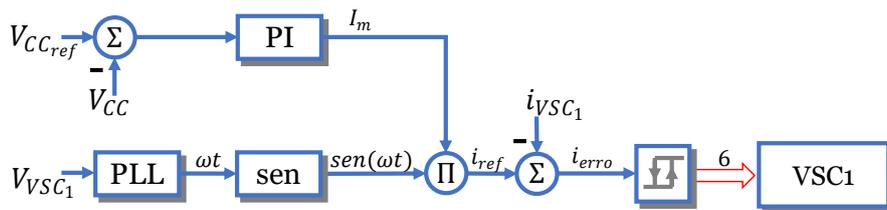


Figura 2.25: Controle de tensão no elo CC.

O conversor VSC₂, por sua vez, é implementado em [24] com dois princípios de controle de tensão: controle apenas da magnitude de tensão, e controle combinado de magnitude e fase, este último retratado na Figura 2.26. Este controle conta com o uso de um UTSP para o cálculo instantâneo das componentes de sequência da tensão no PAC, gerando senoides de amplitudes unitárias de sequência positiva, negativa e zero ($S_{3\phi}^+$, $S_{3\phi}^-$, $S_{3\phi}^0$). O controle da amplitude da tensão no PAC é feito por meio da comparação das componentes de sequência com suas referências, i.e., 1pu para a sequência positiva e 0 para as demais componentes. Os erros das comparações

são dados como entradas para os controladores PI, cujas saídas, multiplicadas pelas senoides $S_{3\phi}^+$, $S_{3\phi}^-$, $S_{3\phi}^0$, representam as tensões de referência de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente. Mais adiante estas tensões são reconstituídas em $v_{ref3\phi}$, e entregues à lógica SPWM do VSC₂.

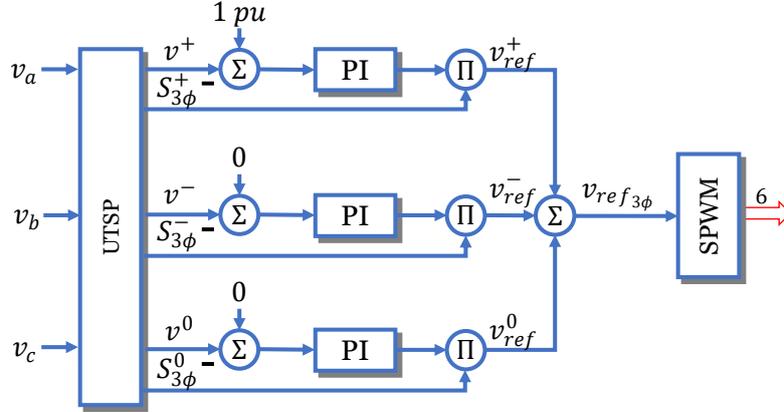


Figura 2.26: Controle de tensão no PAC em magnitude e fase.

Recentemente, a compensação de tensões baseada no UPFC contribuiu para o desenvolvimento de um equipamento especificamente destinado ao controle de tensões em redes elétricas, a saber, o D²VC. Seu princípio de operação se encontra fortemente alicerçado na estrutura de um UPFC, se conectando ao secundário de um transformador previamente existente na rede de distribuição para perfazer a adição de tensões de compensação, controláveis em magnitude e em fase.

A validação do D²VC já foi comprovada experimentalmente por BARCELOS *et al.* [26], fazendo uso do controle por banda de histerese para regulação da tensão CC, e utilizando a estratégia de cálculos de componentes de sequência da tensão por meio do UTSP para controle da tensão no PAC. No Capítulo 3 serão expostos em detalhes o princípio de funcionamento do D²VC, apresentando o algoritmo de controle proposto nesse trabalho como uma alternativa viável para o CDT em redes de distribuição.

2.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram discutidas as origens de desvios de tensão em redes de transmissão e distribuição. Foram apresentadas características relevantes de ambos os sistemas para a investigação dos distúrbios de tensão, como por exemplo: a relação X/R dos circuitos de transmissão e distribuição, e o nível de curto-circuito das barras, como indicador da susceptibilidade da rede a desvios de tensão.

Verificou-se que os desvios de tensão nas barras de carga de um determinado sistema têm diferentes parcelas contributivas, ligadas aos efeitos resistivos e indutivos da rede, o que conduziu à formalização dos métodos de controle direto e

indireto de tensão. Estabelecidas as diferenças entre estes métodos, procedeu-se à apresentação dos principais equipamentos baseados no CIT, como os capacitores *shunt* e o STATCOM, descrevendo sucintamente seus modos de operação e controles. Mencionou-se também a possibilidade de manutenção de tensão através do gerenciamento de potência ativa por parte das unidades de geração distribuída, que apesar de não ser desejável, se constitui como uma regulação indireta da tensão na rede de distribuição.

Em sequência foi dado maior enfoque aos equipamentos baseados no CDT, descrevendo os equipamentos mais usuais, vantagens e desvantagens envolvidas na operação dos mesmos para regulação de tensão em redes de distribuição, sendo o OLTC e o SVR equipamentos mais vastamente empregados para regulação de tensão em alimentadores urbanos e rurais, atualmente. Devido às desvantagens das manobras associadas, apresentou-se também o DVR como alternativa para realização de controle contínuo de tensão na rede. Tanto a configuração clássica baseada em elementos armazenadores de energia quanto às baseadas em retificadores *shunt* foram apresentadas, descrevendo as possibilidades de conexão à montante ou à jusante do transformador série instalado e seus benefícios. Em sequência, demonstrou-se que de maneira similar pode-se regular tensões com o uso do VEC, perfazendo tensões discretamente ajustáveis com a sua versão mecanicamente chaveada, assim como também por meio de sua versão tiristorizada.

Por fim, apresentou-se a estrutura *back-to-back* de conversores UPLC, que possibilita uma vasta gama de funcionalidades para a rede elétrica. Descreveu-se algumas destas funcionalidades, como o controle do fluxo de potência, caracterizando-o como UPFC e a viabilidade técnica de sua implantação para controle de tensão em redes de distribuição com geração intermitente [24]. Os avanços nesta área culminaram recentemente no desenvolvimento do D²VC, equipamento de interesse neste presente trabalho.

No capítulo seguinte, o D²VC é apresentado em detalhes, focando em cenários de equilíbrio e desequilíbrio de tensão, assim como as diferentes topologias que pode assumir em uma rede de distribuição a 3 fios. Em seguida, são dados detalhes do algoritmo de controle proposto neste trabalho.

Capítulo 3

Controlador Direto Dinâmico de Tensão

A regulação de tensão em redes de distribuição, conforme exposto no Capítulo 2, pode ser mais eficientemente alcançada utilizando equipamentos baseados no CDT, em detrimento dos ligados ao CIT. Dessa forma, procura-se neste capítulo descrever a regulação da tensão na rede por meio do Controlador Direto Dinâmico de Tensão, doravante referenciado pela sua sigla inglesa D²VC, oferecendo suporte de tensão à rede, em substituição ao CIT.

Este capítulo traz enfoque sobre o princípio de operação do D²VC, não requerendo aquisições de equipamentos adicionais por utilizar o mesmo transformador de potência disponível nos alimentadores de uma rede de distribuição. Para a realização da regulação da tensão em tais sistemas, o algoritmo de controle desenvolvido nesta pesquisa emprega a teoria de componentes simétricas, cujos conteúdos de sequência retratam os desvios das tensões nominais em cenários equilibrados e desequilibrados. São dados detalhamentos do D²VC quanto às suas possíveis topologias de conexão à rede, expondo a compensação realizada pelo algoritmo desenvolvido.

3.1 Principais Topologias

O esquemático básico do D²VC é mostrado na representação unifilar da Figura 3.1. O equipamento compreende a conexão de dois Conversores Fonte de Tensão (*Voltage Source Converter, VSC*) em *back-to-back*, com uma estrutura muito similar ao do UPFC da Figura 2.24, apresentado no capítulo anterior, porém trifásico. Representa-se aqui neste trabalho conversores baseados em IGBTs por serem as chaves utilizadas nas etapas de simulação e testes experimentais, podendo ser MOSFETs ou outras chaves que permitam a auto-comutação, viabilizando o fluxo de potência ativa em ambos os sentidos na configuração do D²VC quando

necessário [34, 37].

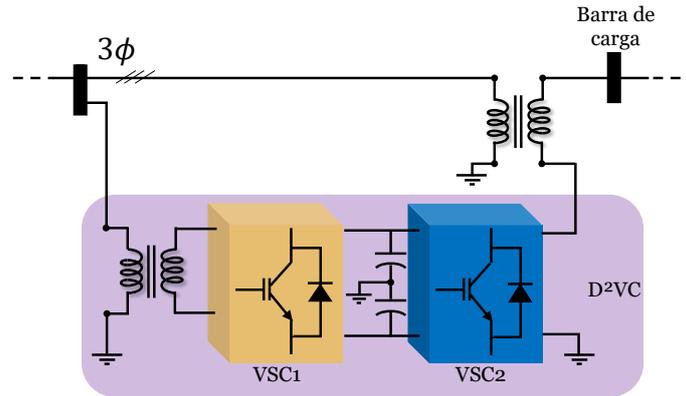


Figura 3.1: Diagrama unifilar do D²VC.

Na estrutura do D²VC, o VSC₁ é conectado em *shunt* na rede, incluindo um transformador de acoplamento, como visto na Figura 3.1. Este transformador se justifica com o objetivo de reduzir a tensão a níveis compatíveis na entrada do dispositivo.

O VSC₁ é responsável por gerenciar o fluxo de potência ativa e, assim, controlar a tensão contínua no elo CC. O capacitor é empregado para garantir que o elo apresente a característica de uma fonte CC, sendo representada na Figura 3.1 na configuração em *split*, para permitir eventual intercâmbio de potência instantânea de sequência zero (p_0) [34] em sistemas a 4 fios. A partir da emulação desta característica de fonte CC, a conversão CC-CA exercida pelo VSC₂ permite que sejam sintetizadas tensões alternadas a serem somadas às da rede.

Uma das características que distinguem o D²VC da aplicação clássica do UPFC, é a dispensa de transformadores extras a serem instalados em série com a rede. A abordagem do D²VC traz o aspecto positivo do aproveitamento dos usuais transformadores de potência que a rede de distribuição tipicamente possui.

Outras topologias realizáveis do D²VC são mostradas na Figura 3.2 e podem perfazer a mesma regulação de tensão nas barras do alimentador. A Figura 3.2a mostra o D²VC $1\phi-1\phi$ com dois conversores monofásicos em *back-to-back* instalados em cada uma das fases de uma rede trifásica a 4 fios. Esta configuração permite que cada VSC *shunt* controle o fluxo de potência ativa para o seu respectivo capacitor e que cada VSC série realize a regulação de tensão na fase no qual se encontra conectado. Já na versão baseada em conversores $3\phi-1\phi$ da Figura 3.2b apenas um VSC *shunt* trifásico é necessário para a manutenção da tensão no capacitor do elo, servindo como fonte CC compartilhada para os VSCs série monofásicos que se conectam a cada fase da rede.

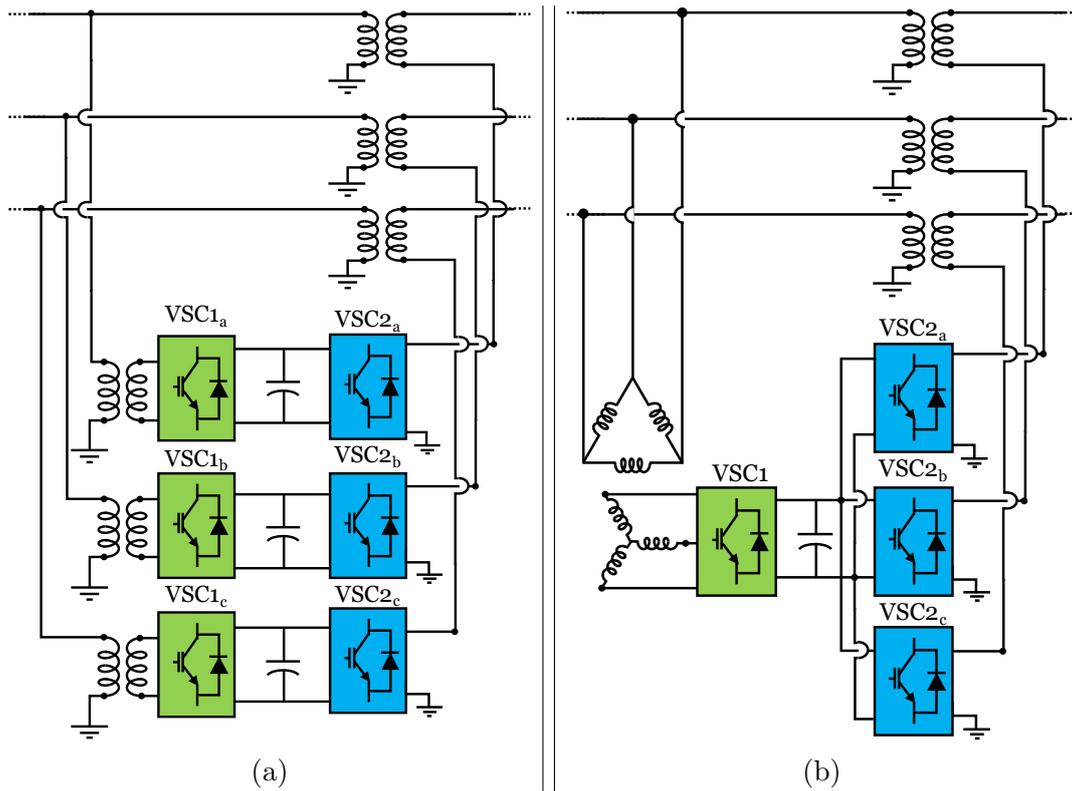


Figura 3.2: Topologias de conexão do D²VC: (a) com conversores 1 ϕ e, (b) com 1 VSC₁-3 ϕ *shunt* e 3 VSC₂-1 ϕ série.

Em ambos os arranjos apresentados, cada VSC série pode regular as tensões em sua respectiva fase, sendo comandados por seus esquemas de controle com estratégias tanto monofásicas quanto trifásicas. Ambas as topologias apresentam a grande vantagem da compensação de tensões, mesmo em cenários desequilibrados. Porém, no tocante à versão do D²VC 1 ϕ – 1 ϕ da Figura 3.2a, os desequilíbrios presentes na rede podem ocasionar divergências entre as tensões de cada um dos três elos CC por causa das variações nas magnitudes de tensão de entrada dos VSCs *shunt*. Desta forma, cada VSC *shunt* necessitará receber ordens de corrente diferentes do controle, drenando potências diferentes em cada fase, de modo a regular a tensão no elo.

Neste sentido, evidencia-se a vantagem da versão baseada em conversores 3 ϕ –1 ϕ , visto que nesta topologia, a energia requerida para manter o controle de tensão no capacitor advém das três fases do sistema, diferentemente da topologia 1 ϕ – 1 ϕ , conduzindo à melhora do desempenho do D²VC. Inclusive, referente ao projeto do elo CC, pode-se empregar um capacitor com menor capacitância, já que a flutuação de tensão é menor na topologia trifásica [34, 47].

A terceira topologia possível, representada na Figura 3.3, utiliza a configuração 3 ϕ – 3 ϕ . O VSC₁ permanece desempenhando o papel de manutenção da tensão no capacitor, pelo controle de fluxo de potência ativa no elo, e o VSC₂ permanece

sintetizando as tensões de compensação.

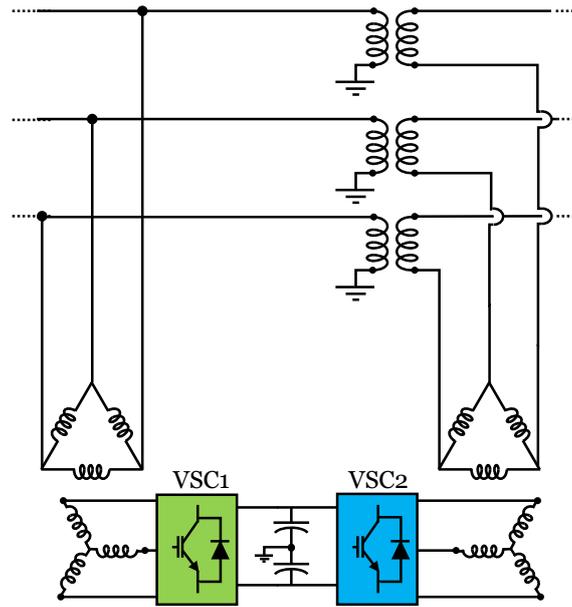


Figura 3.3: D²VC baseado em conversores 3 ϕ .

Contudo, uma aparente desvantagem desta topologia se deve a um desempenho insatisfatório do D²VC em cenários desequilibrados. Segundo AKAGI *et al.* [34], fazendo referência ao UPFC, as estratégias de controle empregadas geralmente levam em consideração apenas a componente de sequência positiva da tensão. Entretanto, em cenários desequilibrados de tensão, a rede pode abarcar também conteúdos de sequência negativa e de sequência zero, caso seja uma rede a 4 fios. Nestes casos, o desempenho de tais esquemas de controle se torna insuficiente e compromete a total eliminação do desequilíbrio [24].

Dessarte, se a topologia do D²VC da Figura 3.3 é considerada como solução para desequilíbrios, faz-se necessário o desenvolvimento de algoritmos que levem em consideração as demais componentes de sequência.

3.2 Princípio de Operação

Deste ponto em diante uma rede trifásica a 3 fios será considerada, vide Figura 3.4, levando em conta o D²VC baseado em conversores trifásicos. O transformador de potência da rede se encontra com as ligações $\Delta - Y$, de maneira que não há caminho de circulação para correntes de sequência zero no sistema.

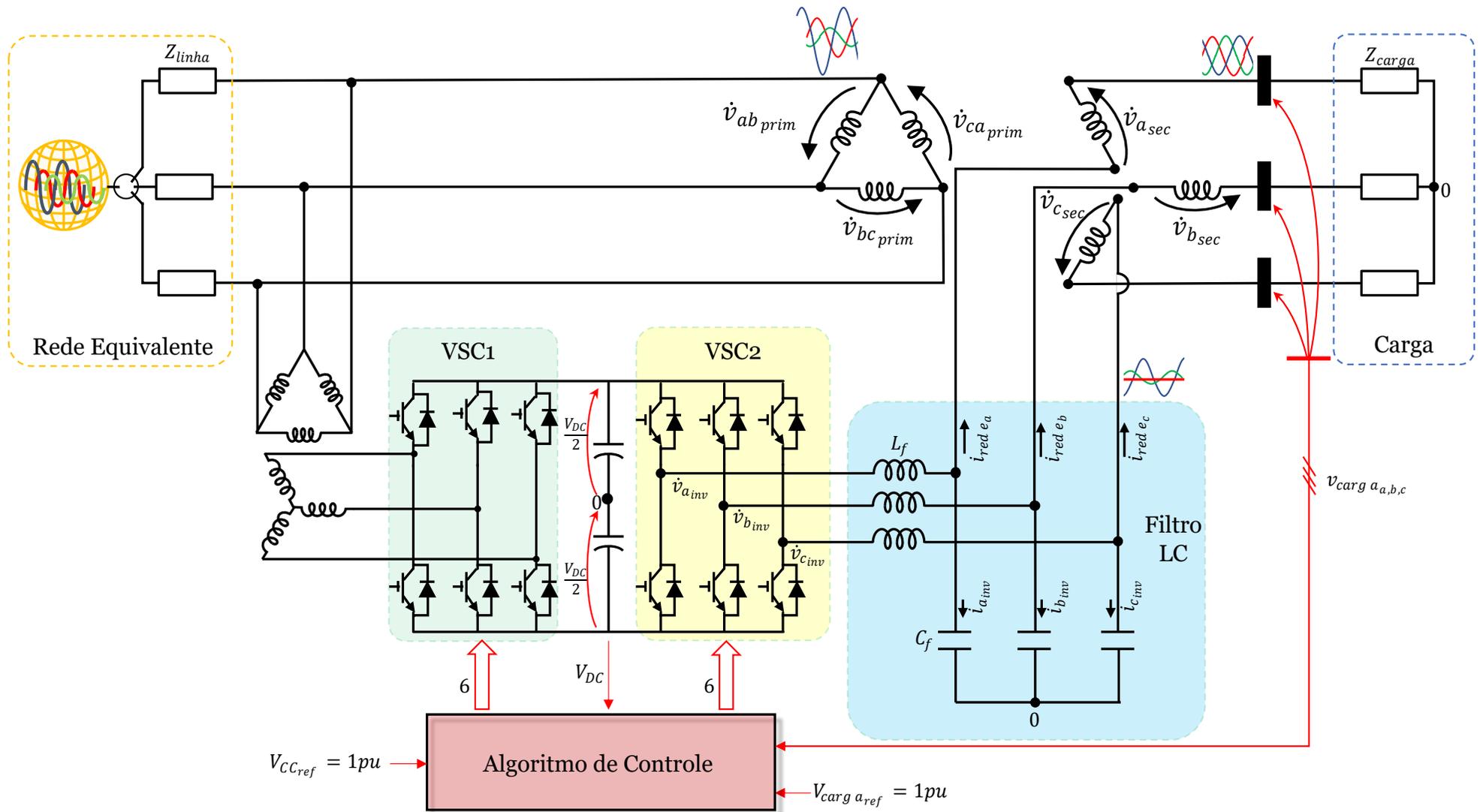


Figura 3.4: Esquemático da ligação do D²VC para síntese de tensões em série com a rede.

Conceitualmente, o D²VC pode ser interpretado como uma fonte de tensão (\mathbf{v}_{comp}) conectada em série com o transformador disponível na rede (\mathbf{v}_{sec}). Infere-se a partir disso que a tensão na carga (\mathbf{v}_{carga}) pode ser mantida não apenas na tensão nominal do sistema, como também pode ser regulada em diferentes níveis, como (3.1) determina:

$$\mathbf{v}_{carga} = \mathbf{v}_{sec} + \mathbf{v}_{comp}. \quad (3.1)$$

A operação do D²VC consiste no monitoramento da tensão da barra de carga (\mathbf{v}_{carga}), de modo que, caso a tensão suprida pelo transformador (\mathbf{v}_{sec}) divirja de uma dada referência, o D²VC compense o desvio somando tensões de compensação (\mathbf{v}_{comp}). Por valor de referência entenda-se a tensão nominal da rede ou outro valor arbitrário, como por exemplo os limites inferiores ou superiores da adequação de tensão dados pelo PRODIST [8]. Neste sentido, a barra de carga torna-se controlada não mais pela rede em si, mas pela geração de tensões do D²VC, enquanto este possuir capacidade suficiente para isso.

Outra característica da operação do D²VC é a viabilidade de manutenção do fluxo de potência no alimentador variando a tensão na barra de carga na medida da necessidade [24, 25, 33, 48]. Também é possível controlar a tensão da barra de carga em diferentes níveis, de modo a equalizar a corrente entre as fases. Embora tais funcionalidades tenham sido verificadas nos estágios de simulação desta pesquisa, elas não são o propósito da mesma, mas sim o desenvolvimento de um algoritmo de controle usando o D²VC, com vistas ao suporte de tensão em cenários de distúrbios equilibrados e desequilibrados.

A Figura 3.5 mostra graficamente a concepção da soma de tensões na rede, regulando a tensão na carga (\mathbf{v}_{carga}). Conceitualmente, o VSC₁ recebe uma ordem de corrente, gerindo a potência ativa através do elo CC, e o VSC₂ recebe ordens de tensão, compensando distúrbios no sistema. A capacidade de mitigação é provida pelo intercâmbio de potência ativa entre as duas representações ideais da Figura 3.5.

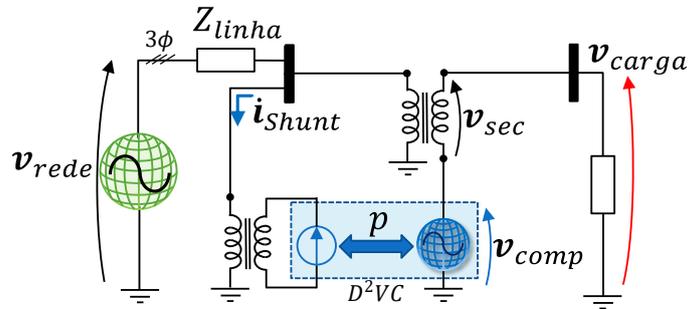


Figura 3.5: Representação conceitual dos conversores do D²VC.

A adição da tensão de compensação (\mathbf{v}_{comp}) pode se dar realizando dois modos de

controle diferentes: *i*) controle de magnitude e, *ii*) controle de fase. Como definido em (3.2), \mathbf{v}_{comp} pode ser adicionada em fase com o secundário do transformador, regulando apenas a magnitude de \mathbf{v}_{carga} , com a variação de $k_n \geq 0$, onde n indica a atuação nas três fases do sistema, i.e., $n = a, b, c$. Altos valores de k não fariam sentido no suporte de desvios de tensão, visto que indicariam a ocorrência de um problema maior na rede, como perda de uma ou mais fases, ou a ocorrência de defeitos na linha. A escalonabilidade da tensão de compensação pode ser vista na Figura 3.6a regulando a magnitude da tensão da barra de carga:

$$\mathbf{v}_{comp} = k_n \mathbf{v}_{sec}. \quad (3.2)$$

A segunda possibilidade é controlar a fase σ das tensões da barra de carga nos casos em que tiverem mesma magnitude porém assimétricas, i.e., com defasagens diferentes de 120° entre si. O D²VC pode agir, portanto, como um transformador defasador, atrasando ou adiantando a tensão da barra com a tensão de compensação gerada em (3.3). O atraso ou avanço da tensão da barra de carga pode ser visto na Figura 3.6b.

$$\mathbf{v}_{comp} = 2 \mathbf{v}_{sec} \sin\left(\frac{\sigma_n}{2}\right) e^{\pm j \frac{\pi - \sigma_n}{2}}. \quad (3.3)$$

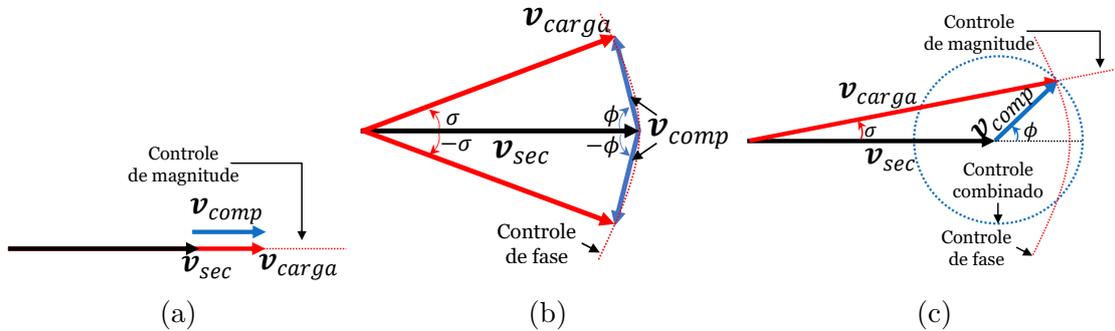


Figura 3.6: Modos de controle do D²VC: (a) controle de magnitude, (b) controle de fase e, (c) controle combinado.

Os dois graus de liberdade do controle da tensão, i.e., *i*) regulação da magnitude e, *ii*) ajuste de fase podem ser combinados provendo controle total sobre a tensão da carga, conforme ilustrado na Figura 3.6c. Diversos trabalhos de pesquisa vêm sido desenvolvidos sobre estes modos de controle, tanto de forma individual quanto combinada [19, 20, 24, 26].

Assim, a combinação das duas funcionalidades em (3.4) oferece dois graus de liberdade para o controle da tensão na carga, sendo k um fator com valores maiores ou iguais a zero e, ϕ o ângulo da tensão de compensação. Assim, compreendendo \mathbf{v}_{comp} como uma função de duas variáveis, dá-se origem a uma superfície de tensão

controlada na barra de carga. A Figura 3.7 ilustra esta superfície de tensão para ajustes de fase e magnitude da tensão na barra de carga.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{carga} &= k_n \mathbf{v}_{sec} e^{j\phi_n} \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \\ D(\mathbf{v}_{comp}) &= \{(k, \phi) \in \mathbb{R}^2 | k \geq 0\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

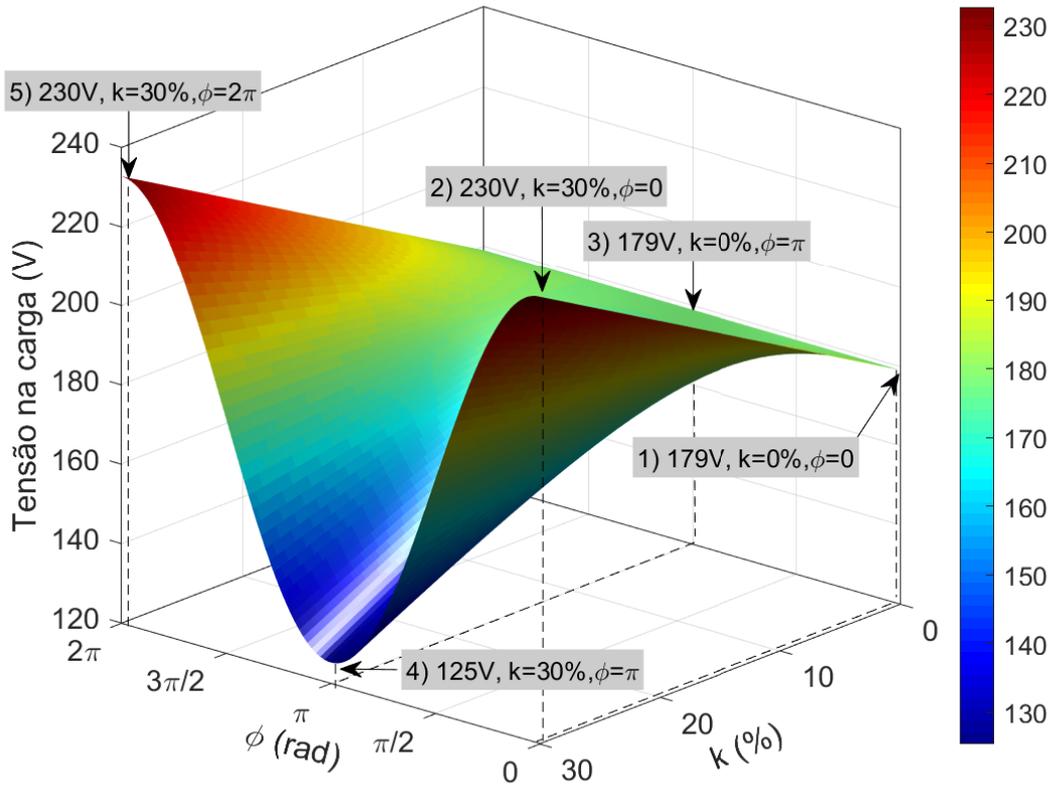


Figura 3.7: Modos de controle de magnitude e fase regulando a tensão da carga.

Dessa forma, para uma determinada condição de controle (k, ϕ) , a tensão na carga pode ser encontrada abaixo ou acima da tensão nominal do sistema. Alguns pontos notáveis da superfície, numerados de 1 à 5, retratam essa variedade. Por exemplo, fixando $\phi = 0$ como referência e variando $k \in [0, 30\%]$, aumenta-se monotonicamente a tensão na barra de carga, vide crescimento do ponto 1 ao ponto 2. Este ajuste de k pode ser alvo de interesse em cenários equilibrados de tensão, nas quais não há assimetria entre as tensões trifásicas. Por outro lado, com a mesma variação de k e, para $\phi = \pi$, proporciona-se a redução de tensão na barra de carga, vide decréscimo do 3 ao ponto 4.

A superfície ainda demonstra a variação da tensão da carga por meio da variação do ângulo ϕ da tensão de compensação. Por exemplo, para $k = 30\%$, os pontos 2, 4 e 5 revelam tensões acima ou abaixo da nominal, segundo a livre variação de

$\phi \in [0, 2\pi]$.

A próxima seção visa examinar o sistema de distribuição da Figura 3.4, no qual será instalado o D²VC e, apresentar o comportamento da tensão de compensação no domínio da frequência.

3.3 Modelagem da rede

3.3.1 Transformação dos eixos de referência

A modelagem do sistema da Figura 3.4 é desenvolvida no referencial estático de Clarke, vide Figura 3.8, dada por:

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta 0} = K \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \hline 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

onde, $K = \sqrt{2}/\sqrt{3}$, faz a transformação invariante em potência por causa da equivalência entre $p = \mathbf{v}_{abc}\mathbf{i}_{abc} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}\mathbf{i}_{\alpha\beta 0}$. Considerando $K = 2/3$, a transformação é dita invariante em amplitude, visto que em uma rede trifásica equilibrada, a amplitude das tensões nos eixos $\alpha\beta$ se equivalem ao valor de pico das tensões no referencial abc . Com vistas à regulação da barra de carga na tensão nominal do sistema, optou-se nesta transformação a versão invariável em amplitude, facilitando a avaliação das amplitudes em ambos os referenciais.

A representação espacial do vetor de tensão é mostrada na Figura 3.8a. Nesta ilustração, o plano $\alpha\beta$ contém os vetores ortogonais de tensão sem sequência 0, enquanto o eixo 0 alinha-se com a diagonal espacial do referencial abc [37]. A projeção do vetor de tensão no plano $\alpha\beta$ da Figura 3.8b revela a excursão do *locus* circular do fasor de tensão, com frequência constante, devido ao equilíbrio de tensões. Entretanto, para desequilíbrios de tensão na rede, o *locus* descrito se distorce em uma trajetória elíptica com conteúdo oscilante de frequência angular, devido à presença de componentes de sequência negativa.

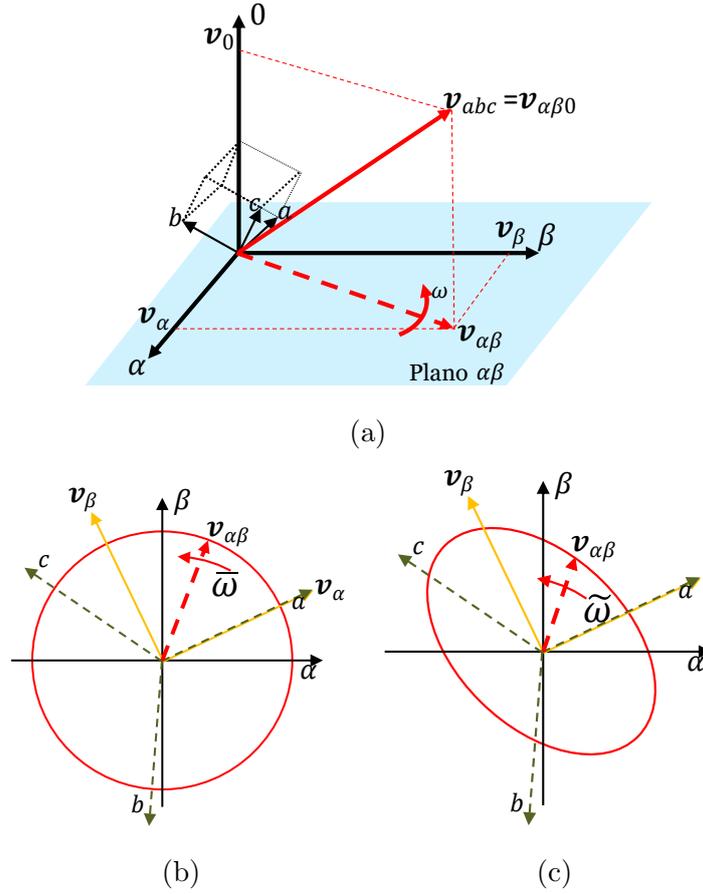


Figura 3.8: Transformação $abc \rightarrow \alpha\beta$: (a) Representação espacial, (b) *locus* de tensão em redes equilibradas e, (c) *locus* de tensão em redes desequilibradas.

O retorno das tensões em $\alpha\beta$ para o referencial abc pode ser feito com a transformação inversa de Clarke dada por:

$$\mathbf{v}_{abc} = K \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Desenvolvendo-se o controle desta pesquisa no referencial $\alpha\beta$, procede-se à modelagem da rede da Figura 3.4 identificando as grandezas pertinentes neste mesmo referencial.

3.3.2 Descrição do modelo da rede

Posto que no referencial estático de Clarke não há acoplamentos entre os eixos $\alpha\beta$, simplifica-se o circuito equivalente omitindo as variáveis do eixo β . A Figura 3.9 mostra a representação do inversor, dada por uma fonte de tensão sintetizando $v_{inv\alpha}$, que após a filtragem representada, gera a tensão de compensação $v_{comp\alpha}$. A tensão do lado primário do transformador é refletida para o lado secundário, sendo indicada por

$v'_{1\alpha}$, assim também como a impedância equivalente total do primário, representando a impedância da linha à montante do transformador mais a impedância de dispersão do mesmo, sendo indicada como Z'_1 .

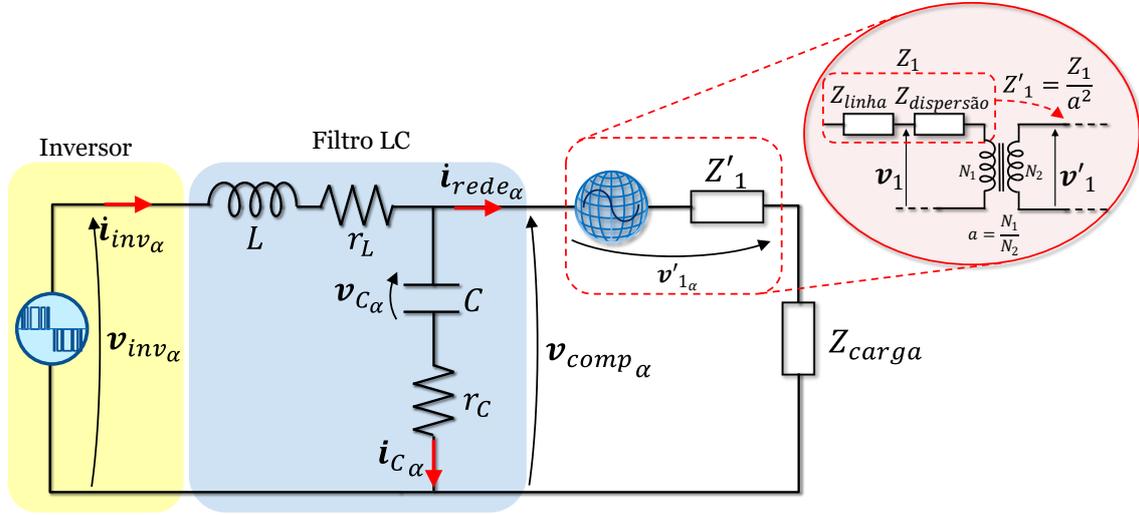


Figura 3.9: Modelagem do sistema no referencial estático.

O modelo dinâmico do sistema pode ser obtido por meio das leis de Kirchoff, como definido em:

$$v_{inv\alpha} = L \frac{di_{inv\alpha}}{dt} + r_L i_{inv\alpha} + v_{comp\alpha}. \quad (3.7)$$

$$i_{C\alpha} = i_{inv\alpha} - i_{rede\alpha}. \quad (3.8)$$

$$v_{comp\alpha} = v_{C\alpha} + r_C i_{C\alpha}. \quad (3.9)$$

Para explicitar o modelo dinâmico do sistema no espaço de estados, define-se as variáveis de estado como sendo: i) a corrente de saída no indutor ($i_{inv\alpha}$), ii) e a tensão no capacitor ($v_{C\alpha}$). A entrada do sistema é considerada como i) a tensão do inversor ($v_{inv\alpha}$) e, ii) a corrente da rede ($i_{rede\alpha}$). Substituindo (3.9) em (3.7), e explicitando $di_{inv\alpha}/dt$:

$$\frac{di_{inv\alpha}}{dt} = \frac{v_{inv\alpha}}{L} - \frac{r_L}{L} i_{inv\alpha} - \frac{v_{C\alpha}}{L} - \frac{r_C}{L} i_{C\alpha}. \quad (3.10)$$

Substituindo (3.8) em (3.10), obtêm-se \dot{x}_1 :

$$\dot{x}_1 = \frac{di_{inv\alpha}}{dt} = \frac{v_{inv\alpha}}{L} - \frac{r_L}{L} i_{inv\alpha} - \frac{v_{C\alpha}}{L} - \frac{r_C}{L} i_{inv\alpha} - \frac{r_C}{L} i_{rede\alpha}. \quad (3.11)$$

Pela definição de x_2 , explicita-se a a corrente no capacitor:

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dv_{C\alpha}}{dt} \therefore i_{C\alpha} = C \frac{dv_{C\alpha}}{dt}.$$

$$\frac{i_{C_\alpha}}{C} = \frac{dv_{C_\alpha}}{dt} = \dot{x}_2. \quad (3.12)$$

Substituindo (3.8) em 3.12, vem que:

$$\dot{x}_2 = \frac{i_{inv_\alpha}}{C} - \frac{i_{rede_\alpha}}{C}. \quad (3.13)$$

Escrevendo as variáveis de estado x_1 e x_2 na forma $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L + r_C}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{inv_\alpha} \\ v_{C_\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{r_C}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{inv_\alpha} \\ i_{rede_\alpha} \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Definindo a saída do sistema como sendo a corrente do inversor, (i_{inv_α}) e a tensão de compensação desejada, (v_{comp_α}), vem que:

$$\begin{aligned} v_{comp_\alpha} &= v_{C_\alpha} + r_C i_{C_\alpha} \\ &= v_{C_\alpha} + r_C (i_{inv_\alpha} - i_{rede_\alpha}) \\ &= v_{C_\alpha} + r_C i_{inv_\alpha} - r_C i_{rede_\alpha}. \end{aligned}$$

A saída do sistema $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$ pode ser escrita matricialmente:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{inv_\alpha} \\ v_{C_\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -r_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{inv_\alpha} \\ i_{rede_\alpha} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

A matriz de transferência saída-entrada do sistema pode ser expressa de acordo com [49, 50] como $\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$, resultando em:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{in}(s) & \mathbf{T}_{oi}(s) \\ \mathbf{G}_{io}(s) & -\mathbf{Z}_o(s) \end{bmatrix},$$

onde, de acordo com LOH *et al.* [51], $\mathbf{Y}_{in}(s)$ representa a admitância de entrada, $\mathbf{T}_{oi}(s)$ a função de transferência saída-entrada, $\mathbf{G}_{io}(s)$ a função de transferência entrada-saída, e $\mathbf{Z}_o(s)$ a impedância de saída.

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{Cs}{CLs^2 + C(r_c + r_L)s + 1} & \frac{Cs r_C + 1}{CLs^2 + C(r_c + r_L)s + 1} \\ \frac{Cs r_C + 1}{CLs^2 + C(r_c + r_L)s + 1} & -\frac{(Cs r_C + 1)(Ls + r_L)}{CLs^2 + C(r_c + r_L)s + 1} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Portanto, a dinâmica da tensão de compensação no eixo α pode ser determinada em:

$$v_{comp_\alpha} = \mathbf{G}_{io}(s)v_{inv_\alpha} - \mathbf{Z}_o(s)i_{rede_\alpha}$$

$$V_{comp_\alpha}(s) = \frac{V_{inv_\alpha}(R_c C s + 1) - I_{rede_\alpha}(R_c C s + 1)(L s + R_L)}{L C s^2 + (R_c + R_L) C s + 1}. \quad (3.17)$$

A partir de (3.17) percebe-se que a tensão de compensação do D²VC depende da tensão de saída do inversor (v_{inv_α}) e também da corrente da rede (i_{rede_α}), que pode ser interpretada aqui como um tipo de perturbação à dinâmica de (v_{comp_α}).

Os detalhes do controle desenvolvido para sintetização desta tensão de compensação (v_{comp}) serão exibidos nas seções seguintes.

3.4 Algoritmo de Controle do D²VC

O algoritmo de controle desenvolvido pode ser separado em dois principais segmentos, destinados ao: *i*) controle do VSC *shunt*, voltado à regulação da tensão no elo CC e, *ii*) controle do VSC série, responsável direto pela regulação da tensão na barra de carga. A seguir são dados maiores detalhes de tais sub-funcionalidades do controle desenvolvido.

3.4.1 Controle do VSC₁

A eficácia da compensação de tensão realizada pelo D²VC depende fortemente de uma tensão contínua controlada no elo CC. Desta forma, o conversor *shunt* precisa ser capaz de gerenciar o fluxo de potência ativa de maneira a manter o capacitor carregado e também evitando variações da tensão CC.

Uma das estratégias de controle possíveis e implementáveis consiste na teoria das potências reais e imaginárias instantâneas [34]. A Figura 3.10 exhibe o controle da tensão no elo (V_{CC}), cuja medição é comparada com um valor de referência (V_{CC}^*). O erro de tensão é tratado por um controlador PI, cuja saída corresponde à potência de referência (p^*) que deve entrar ou sair do elo CC para mantê-lo carregado. A potência imaginária de referência (q^*) é mantida em zero neste estudo, podendo assumir outros valores para alcançar outras funcionalidades fora do escopo deste trabalho, como por exemplo, a compensação de fator de potência do alimentador.

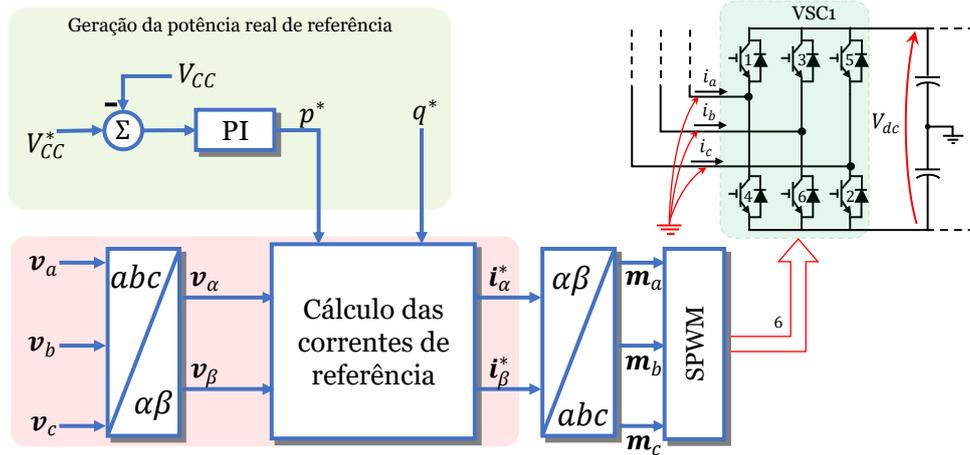


Figura 3.10: Controle da tensão no elo CC.

As tensões v_{abc} na entrada do VSC_1 são medidas e transformadas para o referencial estático de Clarke, servindo para o cálculo das correntes de referência dadas em:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* = 0 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Obtidas as correntes de referência em $\alpha\beta$ necessárias para regular a injeção de potência ativa pelo conversor, transforma-se tais correntes para o referencial abc , que serão interpretadas como sinais modulantes para a lógica SPWM, utilizada para o chaveamento do VSC_1 .

3.4.2 Controle do VSC_2

A Figura 3.11 mostra a conexão do VSC série sintetizando as tensões de compensação para a barra de carga. Note-se o aproveitamento do transformador já disponível na rede, onde as ligações dos enrolamentos são separadas do ponto comum e conectadas às respectivas saídas do VSC, estabelecendo a conexão série baseada no CDT.

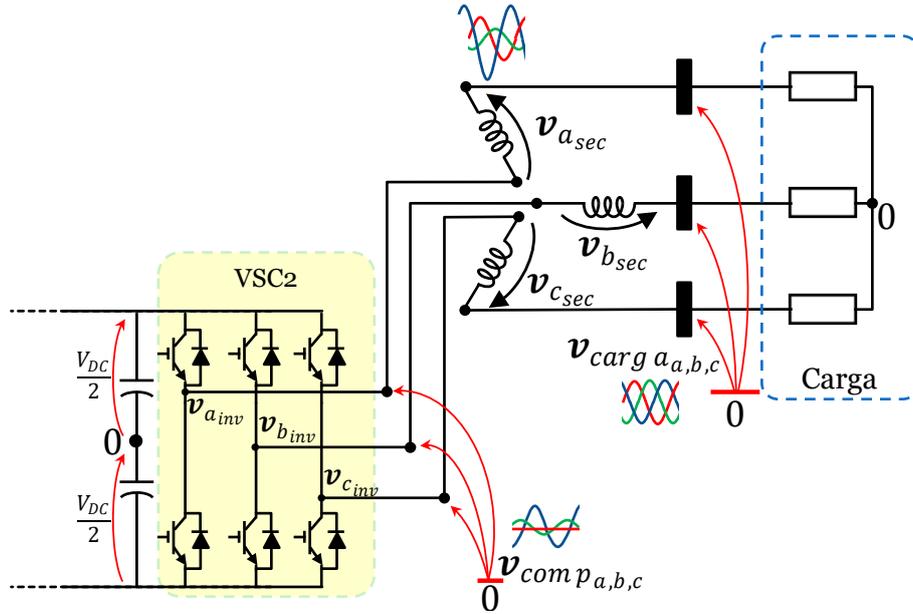


Figura 3.11: Conexão s3rie do VSC₂.

Visualiza-se na Figura 3.12 o controle do VSC₂, cujas entradas s3o as tens3es da barra de carga, no referencial *abc*. O tratamento das grandezas medidas do sistema, a saber, as tens3es na barra de carga, s3o feitas por meio da transforma33o de Clarke reduzida, que n3o leva em considera33o a sequ3ncia θ , posto que o circuito n3o envolve o terra:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a_{carga}} \\ v_{b_{carga}} \\ v_{c_{carga}} \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

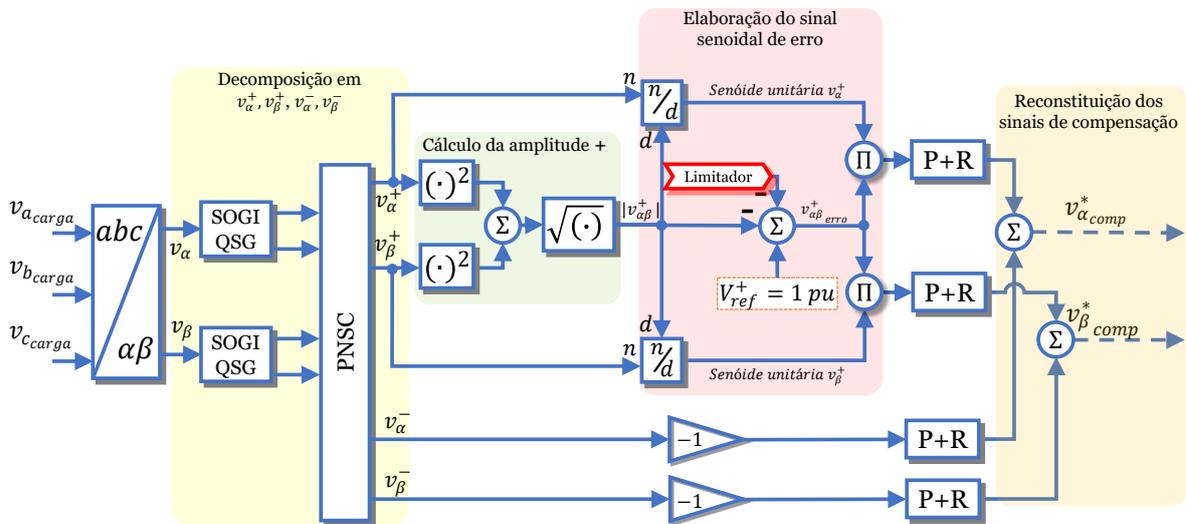


Figura 3.12: Controle do VSC₂ em $\alpha\beta$.

O sinal *limitador*, representado no controle da Figura 3.12, é produzido pela lógica limitadora da Figura 3.13, a ser explanada com mais detalhes na seção 3.4.6.

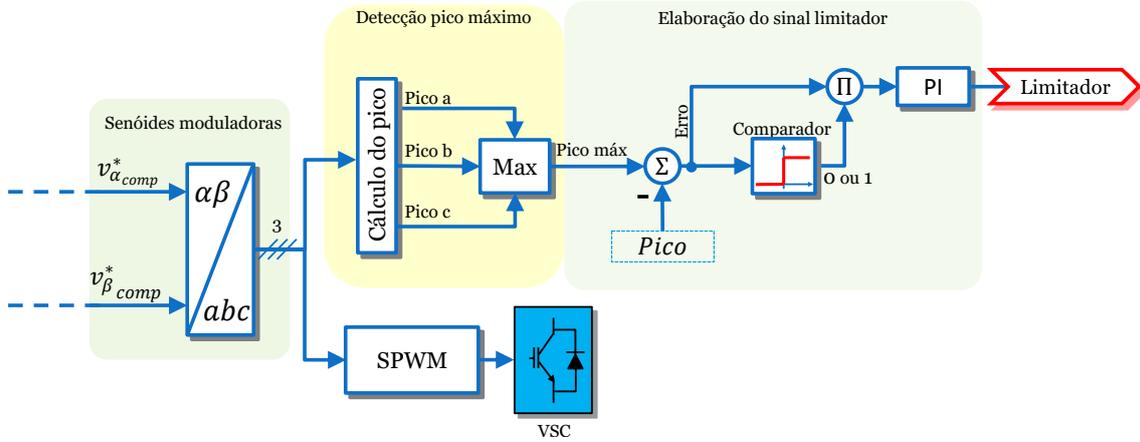


Figura 3.13: Lógica da limitadora senoidal.

Como introduzido no Capítulo 1, tensões de fase com magnitudes diferentes ou assimétricas refletem desequilíbrios nas tensões de linha, sendo a recíproca também verdadeira. Assim sendo, é indiferente para o controle se as grandezas medidas são tensões de linha ou de fase.

Destaca-se também que a medição de 3 formas de onda distintas é redundante em sistemas a 3 fios, bastando apenas duas leituras, i.e., $v_a = -v_b - v_c$. Inclusive, a obtenção das mesmas tensões de fase são possíveis via duas leituras de tensões de linha, conforme (3.20), sem que o arranjo ou defasamento do transformador altere esta característica. Este princípio de aquisição de medidas é vantajoso do ponto de vista experimental reduzindo custos, já que demanda-se um sensor a menos na bancada.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ab} \\ \mathbf{v}_{bc} \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Na sequência, os blocos da Figura 3.12 que controlam o VSC₂ serão detalhadamente explanados.

3.4.2.1 Duplo Integrador Generalizado de Segunda Ordem

Após a transformação das tensões do referencial *abc* para o referencial $\alpha\beta$, o primeiro bloco que se segue é o Duplo Integrador Generalizado de Segunda Ordem (*Double Second Order Generalized Integrator*, DSOGI), visto na Figura 3.14. Este duplo integrador tem a função de realizar a decomposição das tensões $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$ do sistema em suas componentes de sequência. O método de decomposição consiste no uso de

filtros adaptativos em frequência, baseados no Integrador Generalizado de Segunda Ordem (*Second Order Generalized Integrator*, SOGI), rastreando a frequência de interesse (ω'), dada como variável de entrada da estrutura.

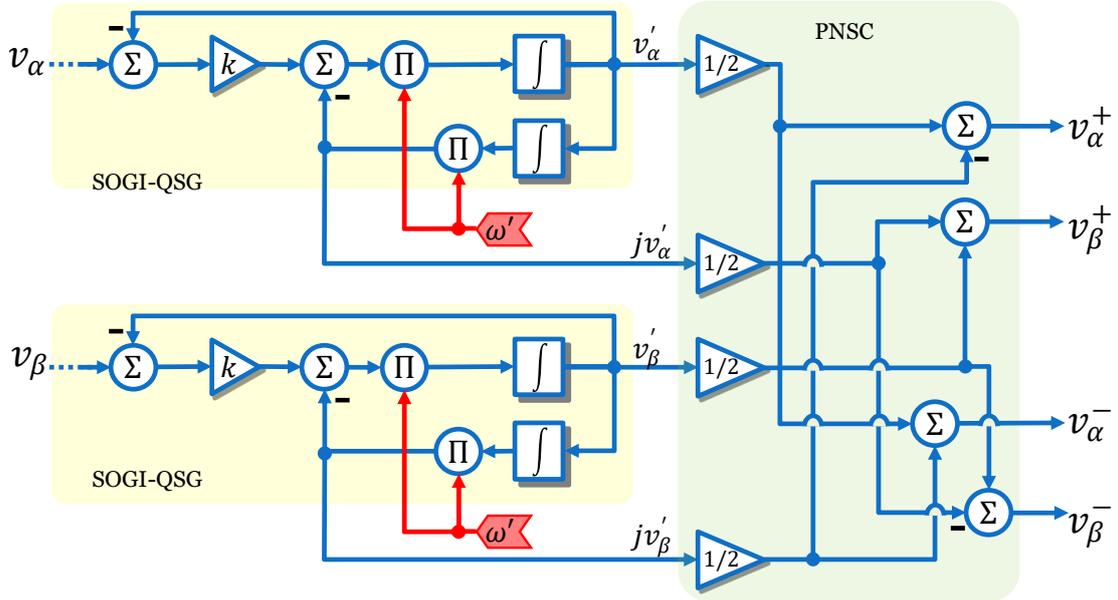


Figura 3.14: Diagrama de blocos do DSOGI.

A característica de filtragem do DSOGI garante que as parcelas de alta frequência contidas na entrada v_α sejam filtradas, produzindo a saída v'_α ajustada à frequência de sintonia do DSOGI. Esta saída novamente integrada e multiplicada pela frequência de interesse resulta no sinal jv'_α , em quadratura com v'_α . Por este motivo, comumente refere-se a esta estrutura como um Gerador de Sinais em Quadratura (*Quadrature Signal Generator*, QSG) [37].

As funções de transferência dos dois sinais em quadratura $v'_{\alpha,\beta}$ e $jv'_{\alpha,\beta}$, em relação às entradas $v_{\alpha,\beta}$, são definidas em:

$$\frac{V'_{\alpha,\beta}(s)}{V_{\alpha,\beta}(s)} = \frac{k\omega' s}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2}, \quad (3.21)$$

$$\frac{jV'_{\alpha,\beta}(s)}{V_{\alpha,\beta}(s)} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2}. \quad (3.22)$$

As respostas em frequência de (3.21) e (3.22) são vistas na Figura 3.15 e na Figura 3.16, sendo respectivamente interpretadas como filtro passa-banda e filtro passa-baixa. O ganho k em (3.21) e em (3.22) pode alterar o perfil da resposta em frequência destes filtros, melhorando a seletividade para a frequência de interesse ω' [32].

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram o refinamento da resposta em frequência pelo aumento de k em (3.21) e (3.22). Se por um lado tal refinamento contribui para um aumento da velocidade de resposta do filtro, por outro lado compromete-se a

sua seletividade na frequência de corte, ou seja, o aumento deliberado de k pode levar o SOGI-QSG a amplificar ruídos presentes na tensão de entrada [32]. Em contrapartida, valores baixos de k podem garantir a seletividade a custo de uma resposta muito lenta. Dessarte, convém estabelecer um valor para k que garanta a filtragem do sinal de entrada sem causar instabilidades de sintonia da frequência de corte do SOGI-QSG.

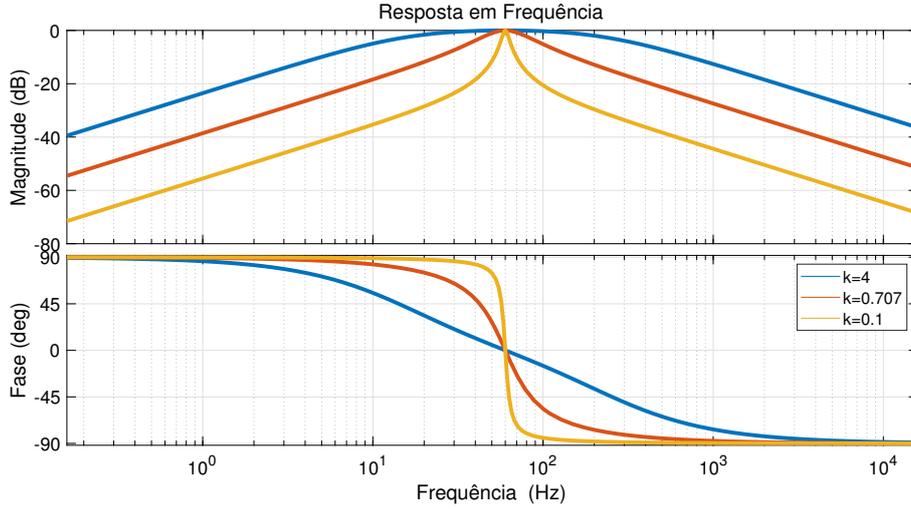


Figura 3.15: Filtro passa-banda do sinal direto v' .

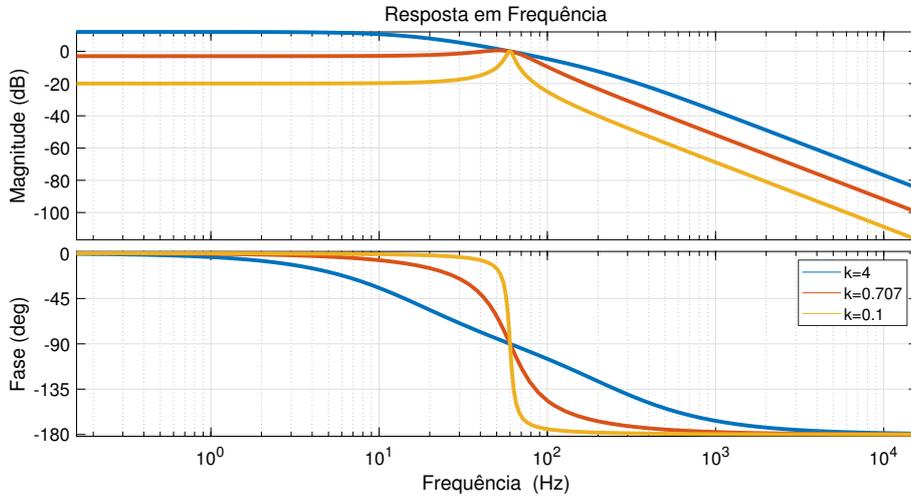


Figura 3.16: Filtro passa-baixas do sinal em quadratura jev' .

De posse dos sinais v'_α , jev'_α , v'_β , e jev'_β , separa-se as componentes de sequência das tensões em $\alpha\beta$ através do Cálculo de Componentes de Sequência Positiva e Negativa Instantâneas (*Positive and Negative Sequence Calculation*, PNSC), conforme (3.23) e (3.24), respectivamente:

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ j & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta}. \quad (3.23)$$

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta}. \quad (3.24)$$

Uma vez calculadas as componentes de sequência da tensão da rede, torna-se possível realizar a regulação do conteúdo de sequência positiva para se ajustar à referência do sistema, corrigindo eventuais afundamentos ou elevações de tensão na rede. Em relação ao conteúdo de sequência negativa, objetiva-se suprimir esta componente na rede, eliminando o desequilíbrio de tensões, corrigindo o *locus* elíptico descrito na Figura 3.8c. A próxima seção tratará da regulação destes conteúdos.

3.4.3 Regulação da componente de sequência positiva

Sendo o D²VC visualizado como uma fonte de tensão sincronizada com a rede [48], poderia vir a ser necessária a implementação de um PLL para garantir sincronização com a rede. Porém, o uso de tal circuito de sincronismo incorreria em impactos no desempenho do controle, vindo a adicionar um tempo de resposta indesejável para ocorrências de distúrbios na rede. Além disso, o PLL pode ser sensível à medições de tensões desequilibradas, o que desfavorece a aplicação do mesmo no que concerne à eliminação do desequilíbrio de tensões.

Em contrapartida, pela característica de filtro adaptativo em frequência, o DSOGI produz saídas senoidais sincronizadas com as medições, a saber, as tensões na barra de carga. Além da sincronização, garante-se que os sinais de saída são livres de conteúdos de alta frequência, pela atenuação apresentada nas respostas em frequência das Figuras 3.15 e 3.16. Para realizar a regulação das tensões equilibradas do sistema, obtém-se a amplitude instantânea das tensões de sequência positiva $|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+|$ por meio de:

$$|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+| = \sqrt{(v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2}. \quad (3.25)$$

Deste modo, redes equilibradas submetidas a afundamentos de tensão revelarão $|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+| < 1.0$ pu, enquanto em casos de elevação, $|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+| > 1.0$ pu.

O valor da amplitude de tensão de sequência positiva $|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+|$ é comparado com dois sinais: *i*) o valor de referência $\mathbf{v}_{\alpha\beta ref}^+ = 1.0$ pu, que indica condição operativa normal de atendimento à carga e, *ii*) com um sinal chamado de *limitador*, que nada mais é que um escalar a ser incluído na comparação da tensão de sequência positiva com a referência, objetivando a atenuação da ordem de tensão de sequência positiva para o controle. Maiores detalhes sobre o funcionamento do limitador são dados na seção 3.4.6.

A entrada de cada controlador P+R da Figura 3.12 é calculada pelo erro de amplitude $\mathbf{v}_{\alpha\beta erro}^+$, que é um valor escalar, multiplicado pelas senoides unitárias or-

togonais $\frac{\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+}{|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+|}$. Desta forma, garante-se a sincronização com a rede, dispensando o uso de PLLs, pelo fato de as senoides unitárias serem produzidas pelas próprias senoides de sequência positiva $\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+$ rastreadas pelo DSOGI. Isto posto, as entradas senoidais de cada controlador P+R para regulação da componente de sequência positiva são dadas em:

$$v_{\alpha\text{ erro}}^+ = (1 - |\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+| - \text{limitador}) \frac{\mathbf{v}_{\alpha}^+}{|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+|}, \quad (3.26)$$

$$v_{\beta\text{ erro}}^+ = (1 - |\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+| - \text{limitador}) \frac{\mathbf{v}_{\beta}^+}{|\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+|}. \quad (3.27)$$

3.4.4 Regulação da componente de sequência negativa

Em se tratando das tensões de sequência negativa, uma análise ligeiramente diferente pode ser feita para os casos de compensação de tensões desequilibradas. Visto que o objetivo da implementação do D²VC visa a eliminação do desequilíbrio presente na rede, importa suprimir o conteúdo de sequência negativa, o que significa fornecer ao controlador P+R as tensões de sequência negativa em oposição de fase, i.e., o conteúdo de sequência negativa multiplicado por -1 .

Esta estratégia se equivale a comparar a amplitude da componente de sequência negativa a uma referência escalar nula. Os erros de entrada dos controladores P+R para compensação de componentes de sequência negativa são dados em:

$$v_{\alpha\text{ erro}}^- = -v_{\alpha}^-, \quad (3.28)$$

$$v_{\beta\text{ erro}}^- = -v_{\beta}^-. \quad (3.29)$$

3.4.5 Controlador P+R

Os controladores P+R produzem as tensões de compensação a serem sintetizadas pelo VSC₂, ou seja, *i*) as tensões $\mathbf{v}'_{\alpha\beta}^+$ que corrigirão o afundamento ou elevação de tensão, e *ii*) as tensões $\mathbf{v}'_{\alpha\beta}^-$, que eliminarão o desequilíbrio de tensões em magnitude e fase. O acionamento das chaves do VSC₂ é feito pela lógica SPWM, cujas senoides moduladoras são as tensões $\mathbf{v}_{\alpha\text{comp}}^{*+}$ e $\mathbf{v}_{\beta\text{comp}}^{*-}$ novamente transformadas para o referencial *abc* através da Transformação Inversa de Clarke.

A escolha pelo controlador P+R se justifica pela possibilidade de sintonização na exata frequência de ressonância desejada, na qual o ganho da saída é infinito, rejeitando todas as demais frequências que a entrada possa possuir, além de garantir erro nulo em regime permanente [37]. Nesta pesquisa, fixa-se a frequência de ressonância como a frequência da rede elétrica, i.e., 60 Hz.

Em se tratando dos modelos de controladores P+R, existem dois tipos, definidos como modelo ideal e não-ideal [51]¹, caracterizados respectivamente por:

$$G_{PR_{ideal}}(s) = K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2}, \quad (3.30)$$

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}. \quad (3.31)$$

Nestas formulações, ω_0 representa a frequência de interesse, na qual o controlador deverá ressonar, e ω_c indica a faixa de frequência que delimita a largura de banda em torno de ω_0 , sendo uma função que não apresenta problemas numéricos em implementações práticas, como ocorre com a função do P+R ideal. Apesar da redução a perturbações de frequência, passíveis de ocorrerem nos estágios experimentais, a consideração do modelo não-ideal dado em (3.31) incorre no aumento do erro de rastreamento da frequência de ressonância [51]. Esta é a razão pela qual deve-se estabelecer um compromisso entre a sensibilidade a pequenos desvios de frequência e o erro do rastreamento da mesma [52].

A Figura 3.17 mostra a resposta em frequência do controlador P+R para os modelos ideal e não-ideal. Observa-se que apesar da notória redução do pico de ressonância do modelo não-ideal no diagrama de magnitude, ainda obtém-se um pico de quase 50 dB, que é mais que suficiente para rejeição de outras frequências que não a de interesse, i.e., ω_0 .

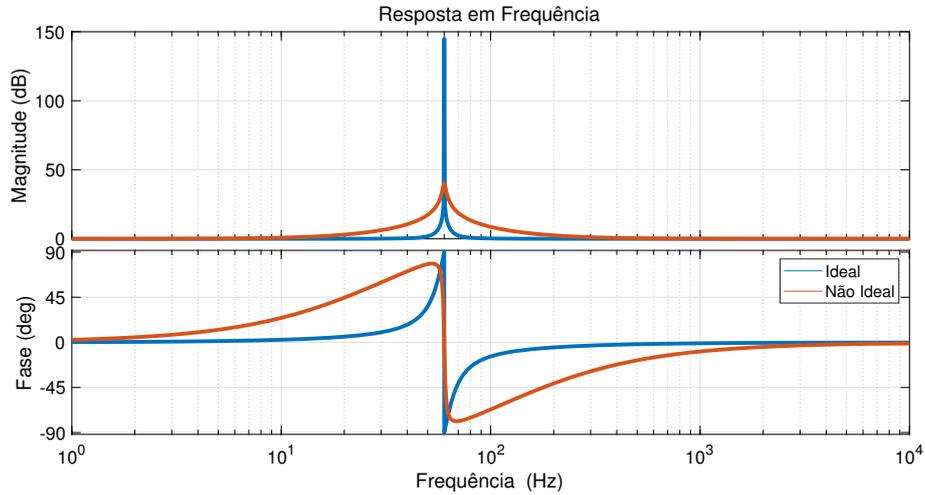


Figura 3.17: Resposta em frequência dos controladores ideal e não-ideal para $\omega_0 = 377 \text{ rad/s}$, $\omega_c = 5 \text{ rad/s}$, $K_p = 1$ e $K_i = 100$.

Os sinais $\mathbf{v}'_{\alpha\beta}^+$ e $\mathbf{v}'_{\alpha\beta}^-$ produzidos pelos controladores P+R são recompostos em tensões de compensação $\mathbf{v}^*_{\alpha comp}$ e $\mathbf{v}^*_{\beta comp}$ e em seguida transformados para o referencial abc , onde a priori, seriam as senoides moduladoras da estratégia SPWM.

¹Visto que o modelo não-ideal do P+R é utilizado nas simulações e na validação experimental desta pesquisa, o subscrito será omitido.

Contudo, em última análise, é preciso que sejam tomadas medidas de precaução com relação aos sinais de referência, de modo a garantir a operação segura do VSC₂ dentro das suas características operativas e assegurar o atendimento dos requisitos de QEE do sistema. Para este fim, elabora-se a estratégia de limitadora senoidal da seção 3.4.6 a seguir.

3.4.6 Limitadora Senoidal

Eventualmente, certos pontos de operação da rede de distribuição podem expor o D²VC a riscos, por ser demandado além de sua capacidade. Esta situação pode se verificar nas senoides moduladoras produzidas pelo controle, que podem exceder a amplitude da portadora triangular da lógica SPWM, i.e., o índice de modulação de amplitude pode ser maior que a unidade ($m_{a,b,c} > 1$), significando que a conhecida região de sobremodulação foi alcançada.

A Figura 3.18a mostra a componente fundamental da tensão para o caso em que $m_a < 1$, e a Figura 3.18b ilustra a componente fundamental da tensão correspondente ao caso de $m_a > 1$.

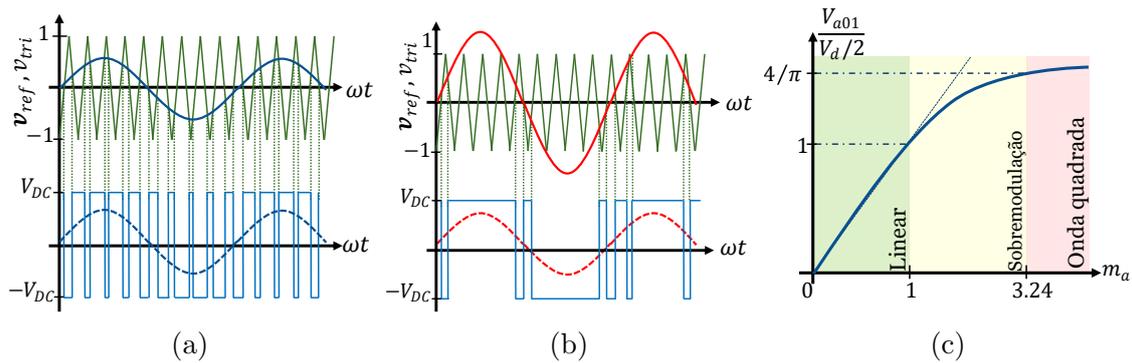


Figura 3.18: Chaveamento bipolar e: (a) Condição normal, (b) condição anormal, (c) regiões de não-linearidade do conversor para $m_f = 15$ [23].

Esta situação pode ser consequência de um severo distúrbio de tensão na rede, por exemplo, um grave afundamento de tensão ocorrido no sistema devido a um defeito ou perda de fases. Este cenário requereria a compensação de tensões por parte do D²VC além da sua capacidade ou das condições seguras de operação. Seja qual for a razão de tal severidade, o controle desenvolvido deve ser capaz de proteger o D²VC contra as consequências danosas de tais demandas.

Os efeitos da ultrapassagem do índice de modulação de amplitude produzem distorções harmônicas na tensão produzida pelo conversor, além do fato da componente fundamental da tensão não crescer mais com a mesma proporcionalidade que na região linear da Figura 3.18c. De acordo com MOHAN *et al.* [23], para índices de modulação de frequência $m_f = 15$, o inversor deixa a região de sobremodulação

a partir de $m_a > 3.24$, alcançando a região na qual a tensão produzida passa a ser considerada quadrada, dificultando a sintonia do filtro do inversor. Deste modo, é prática comum do projeto de inversores evitar a região de sobremodulação a todo o custo, com vistas à produção de tensões senoidais com o mínimo de THD possível [53].

Visto que os sinais de referência são senoidais, a estratégia de limitação que garante $m_{a,b,c} \leq 1$ não pode se basear na lógica de saturação via referências constantes. Tal abordagem induziria os controladores P+R à crescente compensação dos erros de entrada, além da adição de conteúdos harmônicos, visto que a saturação escalar descaracterizaria a natureza senoidal da moduladora.

Desta forma, a abordagem adotada neste controle, vide Figura 3.19, consiste no cálculo dos valores de pico das senoides de referência e detecção do maior valor dentre as três amplitudes. O maior valor de pico detectado é comparado com o pico máximo, definido como 1.0 para garantir a contenção das senoides de referência dentro da região linear, ou mesmo outro valor arbitrário. Em sequência, estipula-se a lógica de avaliação do erro resultante, permitindo que o erro seja dado como entrada para o controlador PI nas situações em que a região de sobremodulação for atingida. Quando o comparador retorna ao valor zero, a saída do controlador PI deve ser resetada. Tal condição é levada em consideração nas etapas de verificação do algoritmo desenvolvido no Capítulo 4.

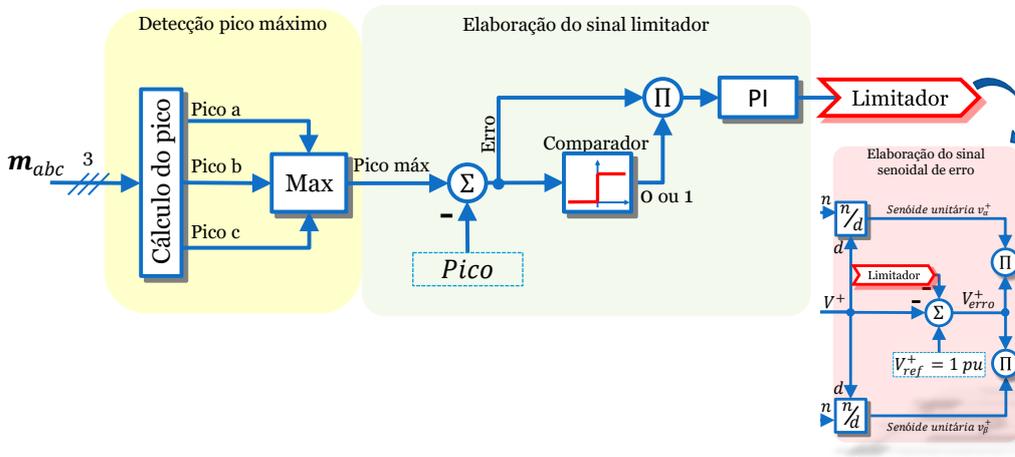


Figura 3.19: Estratégia limitadora.

Para os casos em que houver de fato ultrapassagem do valor permitido, o erro produzido será uma diferença positiva. Do contrário, estando as senoides de referência ainda na região linear, a diferença será negativa. A transmissão do erro ao controlador PI se dá pelo uso do bloco comparador da Figura 3.19, cuja saída é 0 ou 1, segundo o sinal do erro: Se $erro < 0.0$, então o conversor ainda se encontra na região linear, e a saída do comparador é 0, anulando a entrada do controlador PI. Se $erro > 0.0$, então o conversor deixou a região linear, tornando a saída do

comparador igual a 1 e permitindo que o PI trate o erro resultante. O sinal *limitador* produzido terá um efeito atenuante no sinal senoidal de erro, representada na Figura 3.12, protegendo o conversor da sintetização de tensões de compensação além da sua capacidade.

3.5 Sumário do Capítulo e Conclusões

Neste capítulo foi explicado o princípio de operação do método investigado, detalhando o D²VC como equipamento baseado no CDT para o suporte de tensão à rede de distribuição. Apresentou-se as topologias do D²VC viáveis para a aplicação, elegendo a versão D²VC $3\phi - 3\phi$ como sendo a responsável de executar a compensação de tensões nesta pesquisa.

Destacou-se também as vantagens do D²VC como sendo um equipamento que utiliza a própria estrutura da rede para manutenção da tensão do elo CC, dada a disponibilidade de transformadores de potência para a sintetização das tensões de compensação. Após a apresentação conceitual do D²VC, foram explicadas as designações individuais de cada conversor, estabelecendo as especificidades dos seus controles separadamente.

Em primeiro lugar, destacou-se a função do VSC₁ quanto ao gerenciamento da potência ativa, necessária para garantir que os capacitores apresentem características de fonte de tensão CC para o VSC₂. Por outro lado, o VSC₂ responsabiliza-se por sintetizar as tensões de compensação trifásicas que se somam com as tensões da rede de distribuição, mitigando desvios de tensão tanto em cenários equilibrados quanto desequilibrados. Ademais, o algoritmo desenvolvido leva em consideração apenas as leituras de tensão na barra de carga, dispensando as medições de corrente de saída do inversor, apontada na modelagem da rede como perturbação à geração de tensões de compensação.

Em conclusão, adotou-se uma estratégia de proteção do conversor contra demandas excessivas de compensação, que poderiam danificar o D²VC, além de comprometer a qualidade da compensação. Também, pelo desenvolvimento no referencial estático, considerou-se o uso de controladores P+R não-ideais para os próximos capítulos, onde serão exibidos os resultados de simulação e validação experimental do protótipo desenvolvido em bancada.

Capítulo 4

Resultados de Simulação

Neste capítulo, investiga-se o comportamento dinâmico do D²VC em situações em que sua atuação é requerida para a regulação da tensão em um sistema de distribuição. Para esta finalidade, são realizadas simulações computacionais usando a ferramenta computacional PSCAD/EMTDC a fim de averiguar a efetividade do CDT utilizando a versão D²VC 3 ϕ -3 ϕ apresentada no Capítulo 3.

Avalia-se o desempenho do controle desenvolvido em ambas as funcionalidades de compensação i.e., *i*) regulação da amplitude de tensão através da componente de sequência positiva em cenários equilibrados e, *ii*) eliminação do desequilíbrio de tensões mediante a supressão das componentes de sequência negativa presentes no sistema. Também verifica-se a ação da lógica limitadora senoidal inclusa no controle concernente à proteção do equipamento em situações de sobrecarga da rede. A ação desta lógica é esperada para situações em que a capacidade de compensação do D²VC for atingida.

4.1 Parâmetros do sistema de teste

A avaliação do desempenho da proposta do D²VC é realizada através de simulações do sistema da Figura 4.1. Os parâmetros da rede estão relacionados na Tabela 4.1. Como o lado primário da rede apresenta uma relação X/R igual a 0.38 e, sendo menor que a unidade, o CDT mostra-se como a opção mais viável de compensação de tensões do que o CIT. Ainda decorrente das peculiaridades do CDT, mostra-se destacada na Figura 4.1 a abertura do secundário do transformador da concessionária para a conexão série do VSC₂. A capacidade da rede é medida em termos de potência trifásica, sendo calculada através de (4.1). A Tabela 4.2 mostra as cargas consideradas na rede e os desvios de tensão da barra de carga. As cargas são consideradas como modelo de impedância constante, e por este motivo, a queda de tensão causada na rede reduz a potência efetivamente consumida pela carga, vide Tabela 4.2:

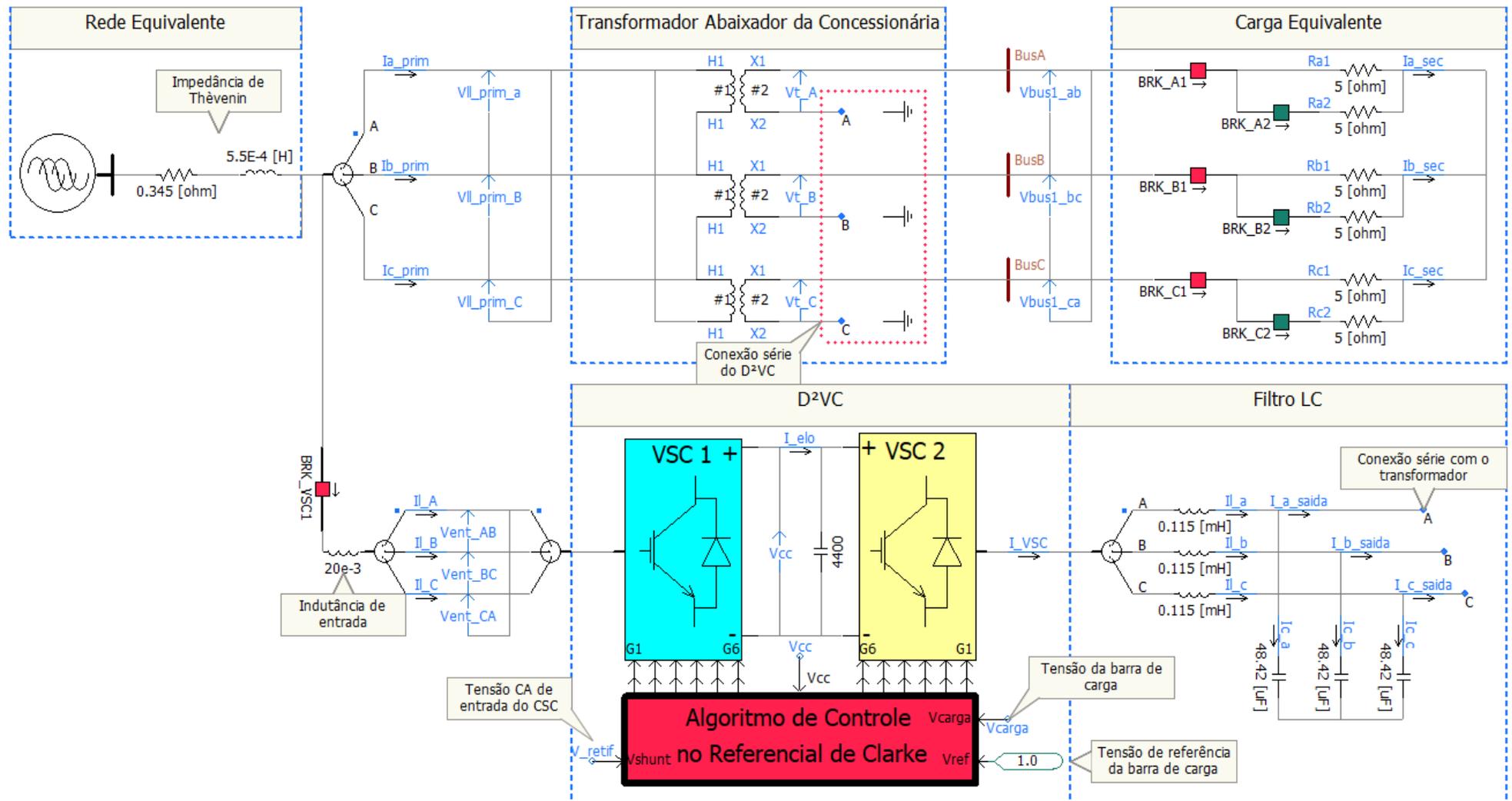


Figura 4.1: Sistema simulado no PSCAD/EMTDC.

$$S_{3\phi} = 3 \times \frac{127^2}{\sqrt{0.345^2 + (2 * \pi * 60 * 0.55 * 10^{-3})^2}} = 120kVA. \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Parâmetros elétricos da simulação.

Parâmetros		Valor	Unidade
Rede Equivalente	Tensão de fonte	220	V_{rms}
	Impedância da linha	$1.0+j0.377$	Ω
Transformador	Potência	25.0	kVA (ΔY)
	N1/N2	220/127	V_{rms} (ΔY)
	Reatância	0.1	pu
Carga Equilibrada	$R_{A,B,C}$	5.0	Ω
Carga Desequilibrada	$R_{A1,2}$	30.0	Ω
	$R_{B1,2}$	10.0	Ω
	$R_{C1,2}$	4.0	Ω
VSC ₁	Indutores de Comutação	20.0	mH
	Tensão CC	320.0	V
	Capacitância do Elo CC	4400	μF
VSC ₂	Frequência de Chaveamento	12.0	kHz
Filtro LC	Indutor	0.115	mH
	Capacitor	48.42	μF

Tabela 4.2: Dados de carga da simulação.

Nº	Impedância (Ω)	Tensão (pu)	Potência 3 ϕ (kW)	
			Consumida	Nominal
1	2	0.840	17.07	24.19
2	2.25	0.860	15.91	21.51
3	2.5	0.871	14.67	19.35
4	3.5	0.909	11.42	13.82
5	4.5	0.928	9.25	10.75
6	5	0.933	8.43	9.68
7	5.5	0.940	7.77	8.80
8	6.5	0.949	6.70	7.44
9	7.5	0.955	5.88	6.45
10	8.5	0.961	5.25	5.69
11	9.5	0.965	4.74	5.09
12	10.5	0.968	4.32	4.61

4.1.1 Projeto do Filtro LC

A implementação de um VSC conectado à rede exige a instalação de um filtro que atenuie as componentes em alta frequência causados pelo chaveamento do inversor. Neste projeto será considerado um filtro passivo do tipo LC para o funcionamento do VSC₂ no sistema.

Para o projeto do filtro LC, adotam-se as especificações do VSC₂ da Tabela 4.3, considerando como critérios de projeto a *i*) ondulação máxima de corrente no indutor e a *ii*) ondulação máxima de tensão no capacitor. Uma vez que o VSC₂ é acionado com esquema SPWM unipolar, as primeiras componentes harmônicas surgem na ordem $2m_f$ ¹, e convém que a frequência de corte do filtro LC se situe em uma faixa de frequência inferior às mesmas. O limite máximo de THD_I definido pela norma IEEE 1547 e de THD_V definido pelo PRODIST estão elencados também na Tabela 4.3 como critérios a serem atendidos, considerando tensão de atendimento abaixo de 1kV².

Tabela 4.3: Especificações do VSC₂.

Parâmetro	Valor	Símbolo
Tensão do elo CC	320V	V_{cc}
Tensão da rede	220V	V_0
Potência nominal	30.0kW	P_0
Frequência nominal	60Hz	f_0
Frequência de chaveamento	12.0kHz	f_s
Máxima ondulação de corrente no indutor	15.0%	Δi_L
Máxima ondulação de tensão do capacitor	1.0%	Δv_c
Distorção harmônica total de tensão	10,0%	THD _V
Distorção harmônica total de corrente	5,0%	THD _I

4.2 Avaliação dos controles dos VSCs

4.2.1 Chaveamento do VSC₂

A simulação ilustrada na Figura 4.2 tem o objetivo de demonstrar a influência do filtro LC em série com a rede e o impacto que traz nas tensões na barra de carga. O comportamento esperado do sistema, em sua configuração normal, é representado na Figura 4.2a, onde exhibe-se o perfil das tensões de linha na barra de carga. As simulações da Figura 4.2 consideram a seguinte sequência de eventos:

¹ $m_f = f_s/f_0$.

²Os requisitos de THD_v e THD_I são cumpridos, e o desenvolvimento do filtro é mostrado no Apêndice A.

1. Até $t = 0.6s$: Sistema em vazio;
2. Em $t = 0.6s$: Entrada de carga, e;
3. Em $t = 0.9s$: Aumento de carga.

Uma vez que instala-se um filtro passa-baixas associado à operação do VSC_2 , o valor da tensão na barra de carga decresce consideravelmente se o conversor estiver desconectado do filtro ou em estado de repouso, como se vê na Figura 4.2b. Entende-se por estado de repouso do conversor o não-acionamento de suas chaves controladas, ou seja, todos os *gates* dos IGBTs da Figura 4.1 com estado lógico zero, o que reduz a topologia do VSC_2 a uma ponte trifásica a diodos. Deste modo, a corrente da rede é forçada a percorrer o ramo *shunt* do filtro, constituído por um caminho de alta impedância na frequência fundamental. Assim, a queda de tensão no ramo *shunt* se torna significativa, como mostra o resultado da simulação na Figura 4.2b, onde a diferença percentual durante a conexão da carga é de 73,82%, e de 76,73% durante o aumento de carga.

Uma das opções que evitam este afundamento de tensão na barra da carga é a consideração da conexão original do transformador da rede antes que seja exigida a operação do D²VC. Ou seja, transformador na configuração $\Delta - Y$ aterrado, com um esquema de aterramento manobrável por disjuntor. Quando a operação do D²VC for requerida pode-se desconectar o aterramento manobrando o conjunto VSC_2 +filtro em série com os terminais X2 de cada transformador.

Contudo, uma alternativa mais simples, e adotada neste projeto, consiste na conexão continuada do D²VC em série com o transformador, mantendo sinal modulante nulo na lógica SPWM de acionamento do VSC_2 . A adoção de uma referência de tensão nula permite que os IGBTs sejam acionados de maneira que a corrente possa percorrer os braços do VSC_2 pelos IGBTs e diodos alternadamente.

O que resulta desse acionamento das chaves é a criação de um caminho de baixa impedância na frequência fundamental para a corrente do sistema, o que incorre em uma queda de tensão praticamente desprezível através do filtro. Observa-se que a diferença percentual durante a conexão da carga é de 0,21%, e de 0.46% durante o aumento de carga. Este esquema permite que o D²VC permaneça conectado à rede continuamente, contribuindo significativamente menos para o afundamento de tensão que a conexão da carga impõe no sistema, conforme se vê na Figura 4.2c³.

³Todos os perfis de tensão deste capítulo são calculados através de um bloco digital de medição RMS do PSCAD/EMTDC, com 64 amostras por ciclo

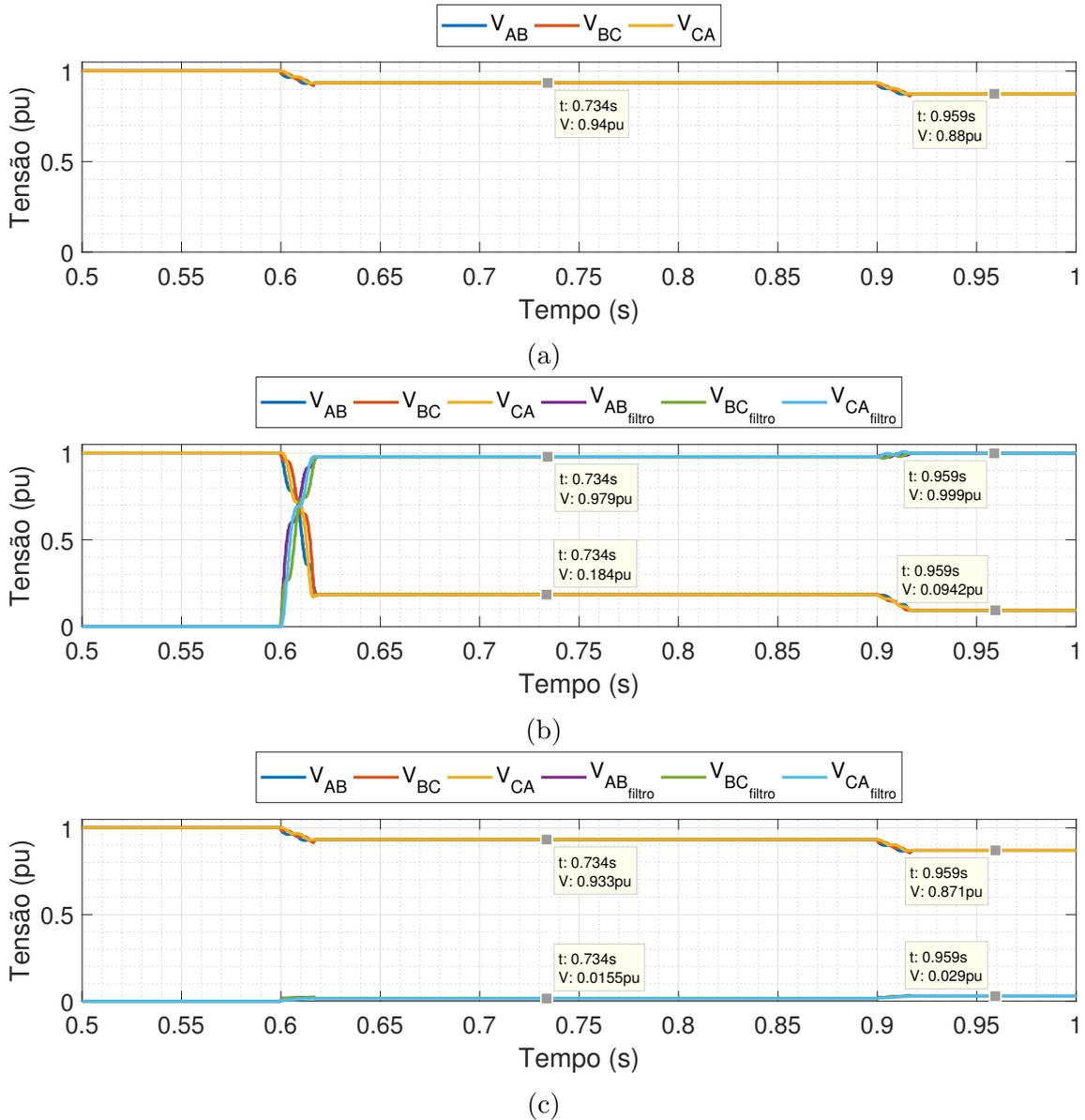


Figura 4.2: Comportamento da tensão na barra de carga e no filtro para: (a) Configuração inicial do sistema (sem D²VC), (b) configuração com VSC₂ em estado de repouso e, (c) configuração com VSC₂ com sinal modulante nulo.

A Figura 4.3 mostra o comportamento das correntes do sistema na adoção do acionamento do VSC₂ com sinal de referência nulo. As Figuras 4.3a e 4.3b mostram, respectivamente, a troca das correntes durante a polarização direta dos diodos e acionamento dos IGBTs. A complementariedade da circulação de corrente pelas chaves e diodos propicia um caminho de baixa impedância pelos braços do VSC₂. Escolheu-se representar as correntes referentes apenas às chaves superiores do VSC₂, dada a completividade com as inferiores. Em sequência, na Figura 4.3c vê-se as correntes da carga percorrendo os indutores, iguais às correntes nos terminais do filtro na Figura 4.3e, dado que não há passagem de corrente pelo capacitor.

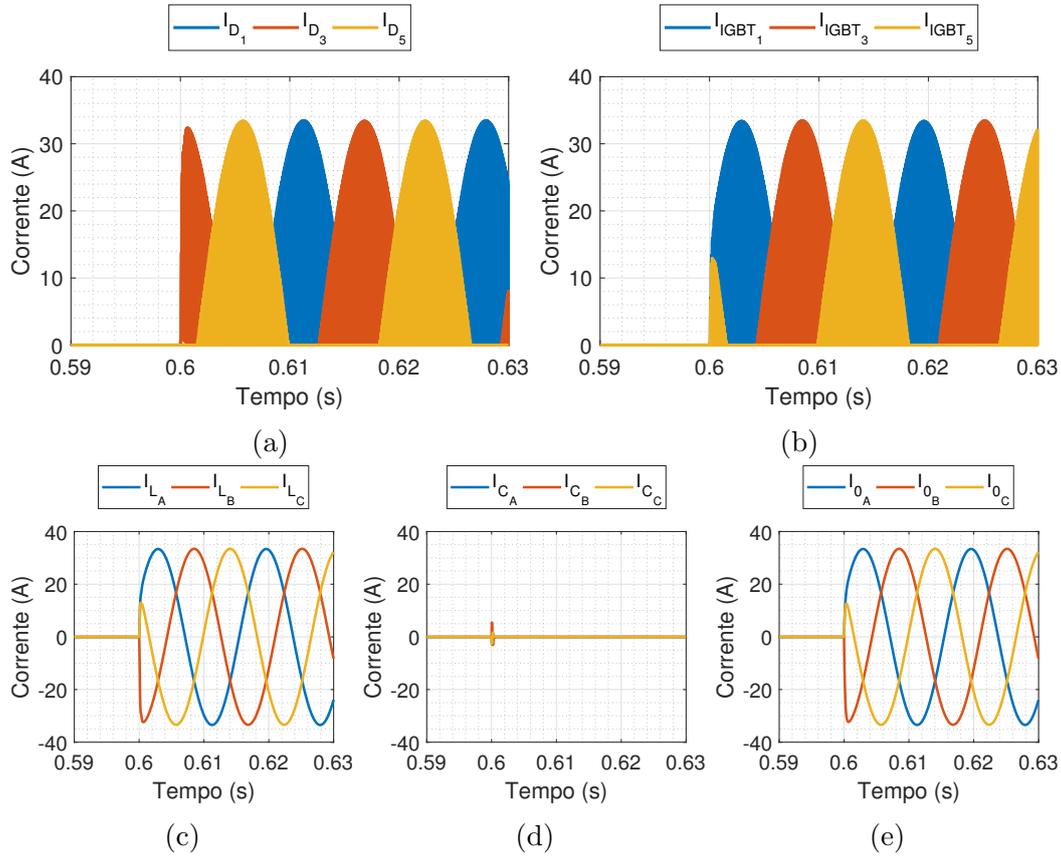


Figura 4.3: VSC₂ chaveando com sinal modulante nulo: (a) Correntes nos diodos, (b) correntes nos IGBTs, (c) correntes através do indutor, (d) correntes no capacitor e, (e) correntes de saída.

Outra estratégia que pode ser adotada é curto-circuitar as fases de entrada do filtro LC, seja pelo acionamento das chaves superiores ou inferiores do VSC₂. O resultado desta ação pode ser visto na Figura 4.4, onde mais uma vez a corrente da carga percorre os indutores por representarem uma impedância menor que o ramo capacitivo do filtro.

Esta estratégia pode ser mais interessante do que a primeira considerando que não há chaveamento em alta frequência do VSC₂, o que contribui para o tempo de vida útil das chaves, por exemplo. Por consequência, a corrente que circula pelos diodos, na Figura 4.4a e pelas chaves, na Figura 4.4b contém apenas a componente fundamental do sistema, conduzindo de maneira complementar a cada meio ciclo elétrico. Vê-se na corrente do indutor da Figura 4.4c uma oscilação em alta frequência de curta duração, aproximadamente 5ms, diferindo do resultado observado da primeira estratégia. Contudo, tal efeito é filtrado pelo capacitor na Figura 4.4d, sem causar nenhuma perturbação na corrente de saída, vide Figura 4.4e, sendo igual a corrente de saída da primeira estratégia. A partir das estratégias supramencionadas, destaca-se que será adotado o chaveamento com moduladora nula nas fases de ensaios experimentais do Capítulo 5.

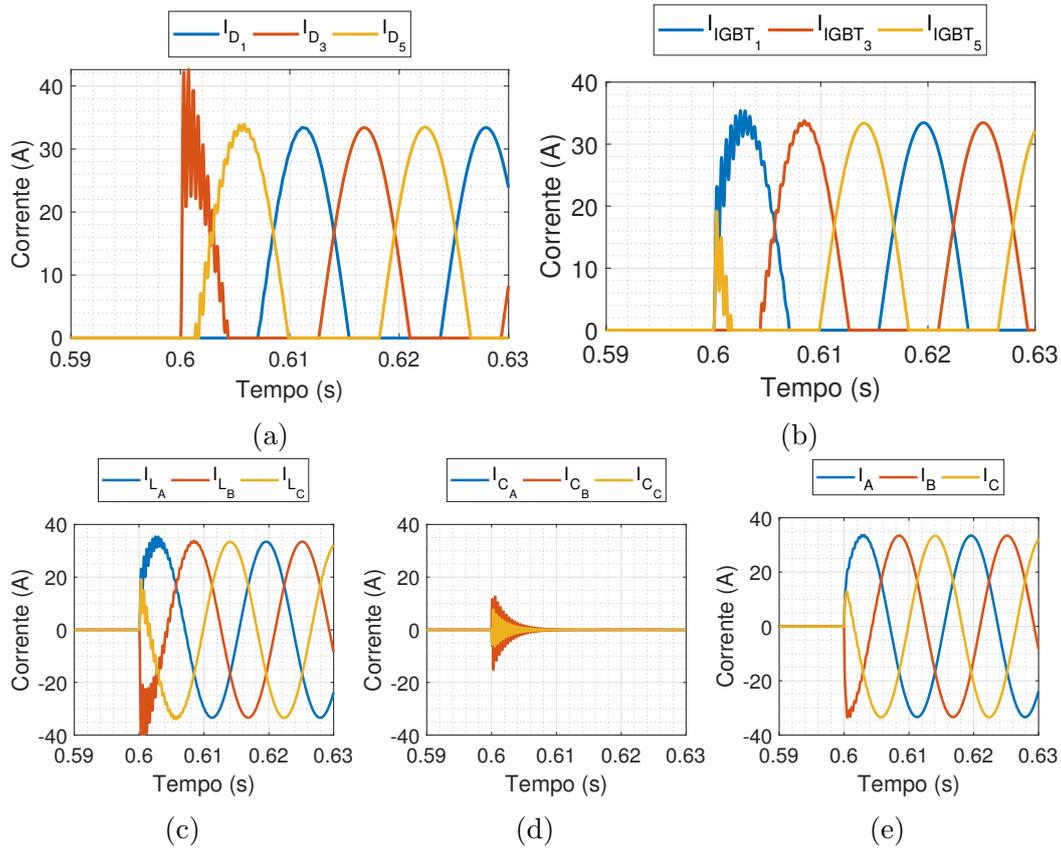


Figura 4.4: VSC₂ com chaves superiores acionadas: (a) Correntes nos diodos, (b) correntes nos IGBTs, (c) correntes através do indutor, (d) correntes no capacitor e, (e) correntes de saída.

4.2.1.1 Carregamento do elo CC

Conforme descrito na seção 3.4.1 do Capítulo 3, o VSC₁ do D²VC desempenha o papel da regulação da tensão no elo CC, controlando a corrente de entrada de acordo com a energia necessária que entra ou sai do conversor para que seja mantida a tensão CC nominal. O esquema de controle do elo CC implementado no PSCAD/EMTDC pode ser visualizado na Figura 4.5, com tensões trifásicas de fase como entrada, assim como a tensão CC do elo.

Após a normalização das grandezas de entrada, a tensão do elo CC é comparada com a referência em pu. A comparação gera um erro que é a entrada de um controlador PI, cuja saída é interpretada no controle como a potência ativa de referência. A partir desta potência e das tensões de entrada do VSC₁ é que são sintetizadas as correntes de referência nas coordenadas $\alpha\beta$ por meio da teoria de potências instantâneas. Estas correntes são transformadas para o referencial natural abc e utilizadas na lógica SPWM de acionamento do VSC₁.

Contudo, a atuação individualizada do controle do VSC₁ pode agravar problemas naturais da rede, conforme mostra a Figura 4.6, uma vez que, no propósito de gerar correntes controladas para regulação do elo CC, produz-se inevitavelmente quedas

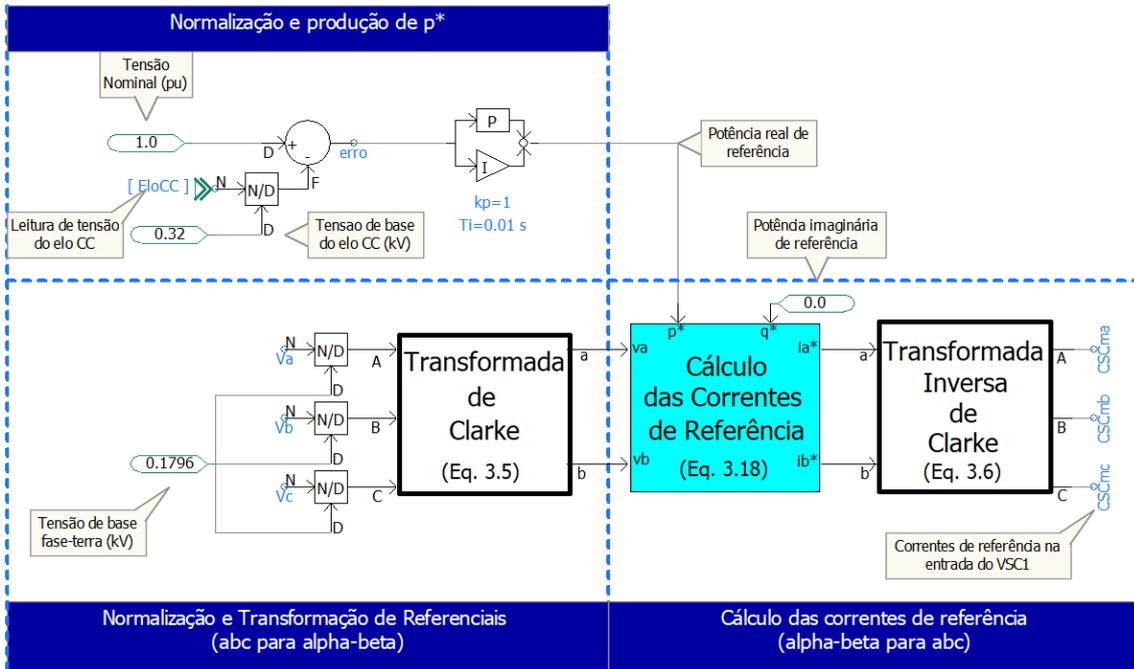


Figura 4.5: Controle do elo CC implementado no PSCAD/EMTDC.

de tensão na rede à montante do ponto de conexão *shunt* do D²VC. O que sucede disso é um afundamento da tensão na barra de carga, tão mais severo quanto mais fraca for a rede. Emulando esta situação, a simulação da Figura 4.6 considera a seguinte sequência de eventos:

1. Até $t = 1,5s$: Rede alimentando carga;
2. Em $t = 1,5s$: Conexão do VSC₁ ao alimentador do sistema, e;
3. Em $t = 2,1s$: Atuação do controle do VSC₁.

Assim, a Figura 4.6a mostra o controle do VSC₁ sobre a potência ativa entrando no D²VC. Em primeira análise, desconsiderou-se a implementação de medidas de pré-carregamento do elo em $t = 1.5s$, influenciando no momentâneo afundamento de tensão observado durante o período transitório do carregamento do capacitor do elo CC, vide Figura 4.6c. A Figura 4.6b mostra a efetividade do controle sobre a tensão do elo CC, regulando-a para ajustar-se ao valor da referência de 320V.

Após o regime permanente da tensão no elo CC ter sido alcançado, observa-se que a potência ativa cessa de ser injetada no VSC₁, conforme se vê na Figura 4.6a, tendo um valor não-nulo praticamente desprezível em regime permanente. Esta pequena parcela de potência deve-se aos elementos não-ideais do VSC₁, como por exemplo, as perdas pelo chaveamento do conversor e resistência das chaves. Devido ao pico de potência de 4 kW (aproximadamente 3,33% da $S_{cc,3\phi}$), a sintetização de tais correntes impacta o sistema asseverando em 2.15% o afundamento causado pela

própria carga, como visto na Figura 4.6c, demonstrando ser indesejável considerar a ação individualizada do carregamento do elo CC em uma rede fraca.

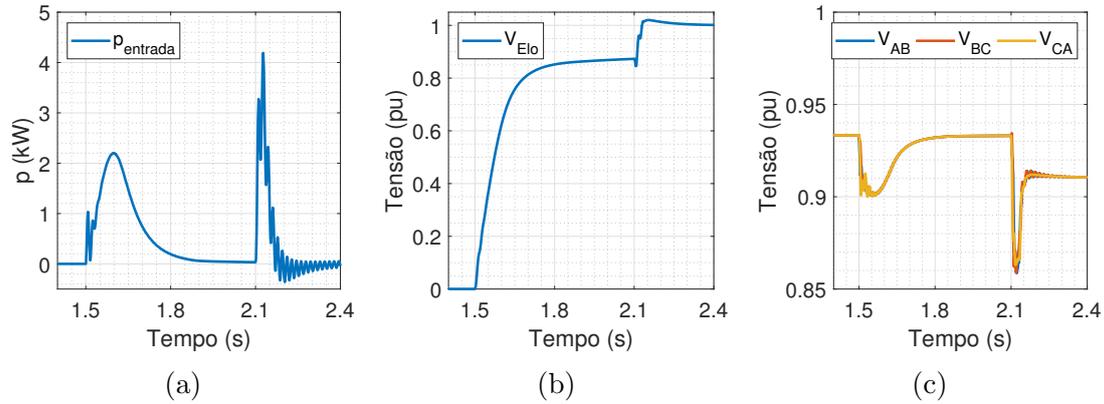


Figura 4.6: Controle do VSC₁: (a) Potência ativa instantânea entrando no conversor, (b) regulação da tensão CC e, (c) afundamento de tensão na barra de carga.

Cabe destacar que o valor da tensão nominal adotado neste projeto foi de 320V e que apesar do controle do VSC₁ possibilitar o ajuste em valores maiores que o adotado, objetiva-se estudar a validade do controle na fase experimental, à qual o Capítulo 5 se dedica. No ensaio em bancada, os sensores de tensão limitam-se a 350V, e para evitar a queima dos mesmos, a tensão máxima observável do elo é de 320V. Neste sentido, adotou-se este valor de tensão, mantendo a coerência entre os resultados de simulação e os ensaios experimentais.

Evidenciada a queda de tensão na rede, em parte devido a derivação do VSC₁ do D²VC, mostra-se imperativo associar o controle do VSC₂ concomitante com o controle do VSC₁ regulando a tensão no elo. A ação conjunta dos dois controles configura, portanto, a atuação completa do D²VC na rede, mitigando o afundamento de tensão que o próprio equipamento pode ocasionar se os controles dos conversores forem inicializados separadamente.

Isto posto, três possibilidades de inicialização do equipamento podem ser elencadas: *i*) D²VC atuando com rede em vazio, *ii*) D²VC atuando concomitante com a entrada da carga e, *iii*) D²VC atuando com as cargas sendo conectadas em instantes aleatórios. Neste primeiro momento serão consideradas as duas primeiras situações de inicialização, reservando a terceira para a comprovação da eficácia do controle a posteriori.

4.2.2 D²VC operando com rede em vazio

A primeira situação, considerando a desconexão de todas as cargas, é apresentada na simulação da Figura 4.7, considerando a seguinte sequência de eventos:

1. Até $t = 0.6s$: Rede em vazio;

2. Em $t = 0.6s$: Conexão do VSC₁ ao alimentador do sistema, e;
3. Em $t = 1.2s$: Atuação do controle do VSC₁ e do VSC₂.

Em $t = 0.6s$ habilita-se o controle do VSC₁, como mostra o gerenciamento de potência ativa da Figura 4.7a, permitindo entrada de energia no conversor. A energia provida conduz a tensão no elo CC rapidamente ao valor de referência, como mostra a Figura 4.7b. A atuação completa do D²VC na rede a vazio permite que a tensão na barra de carga retorne ao valor de referência dentro de 25ms, como mostra a Figura 4.7c.

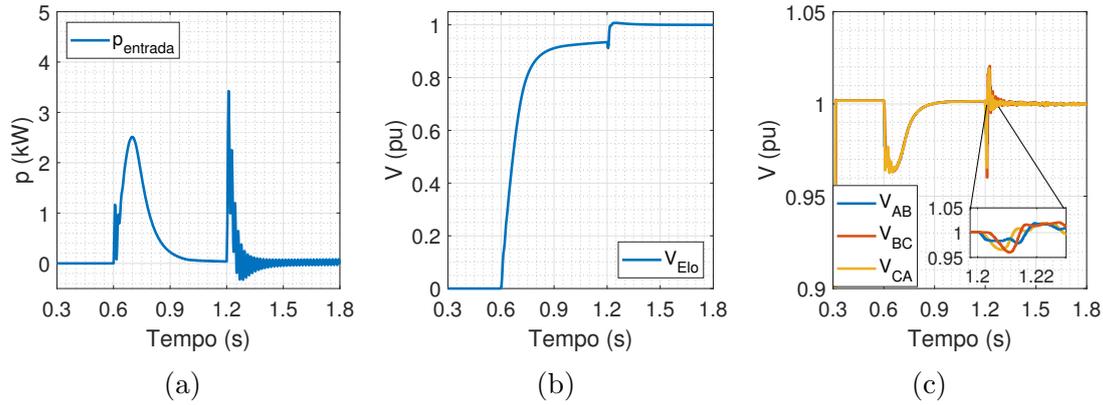


Figura 4.7: Controle do VSC₁ com rede em vazio: (a) Potência de entrada do VSC₁, (b) tensão controlada do elo CC e, (c) tensão controlada na barra de carga.

4.2.3 D²VC operando concomitante com a carga

A segunda situação, considerando a atuação completa do D²VC concomitante com a carga, é apresentada na Figura 4.8, considerando a seguinte seqüência de eventos:

1. Até $t = 1,8s$: Rede em vazio, e;
2. Em $t = 1,8s$: Conexão da carga e atuação dos controles dos VSCs 1 e 2:

Em $t = 1,8s$, o controle do VSC₁ permite a entrada de energia no conversor, conforme se vê na Figura 4.8a. Percebe-se que a potência ativa em regime permanente é maior que na situação anterior que considerava a rede a vazio, correspondendo ao comportamento esperado. Isto decorre do fato de que com a rede a vazio a potência ativa drenada pelo VSC₁, em regime permanente, supre apenas as perdas associadas ao seu funcionamento. Porém, na segunda situação, estabelece-se um compartilhamento de energia entre a rede e o D²VC, i.e., há potência para a carga fluindo através dos conversores.

Em relação a tensão do elo CC mostrada na Figura 4.8a, a tensão de referência foi alcançada com um tempo de assentamento maior que a situação anterior já que considera-se que a atuação completa do D²VC corrige o afundamento causado por ambos os eventos: *i*) efeito de afundamento causado pelo próprio equipamento e, *ii*) o afundamento causado pela entrada da carga na rede. A atuação do D²VC na barra de carga é destacada na Figura 4.8c, tendo valores instantâneos representados na Figura 4.9, onde se constata um afundamento temporário de aproximadamente 2 ciclos elétricos.

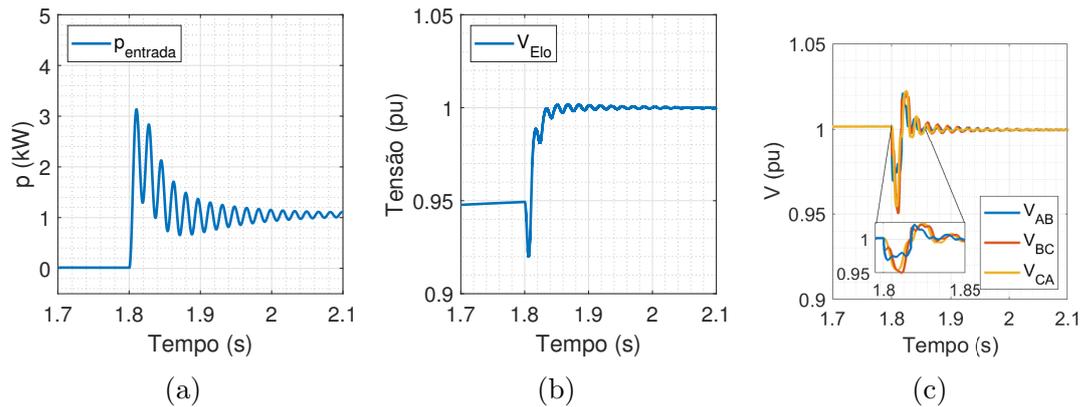


Figura 4.8: Controle do VSC₁ concomitante com a entrada da carga: (a) Potência de entrada do VSC₁, (a) tensão controlada do elo CC e, (a) tensão controlada na barra de carga.

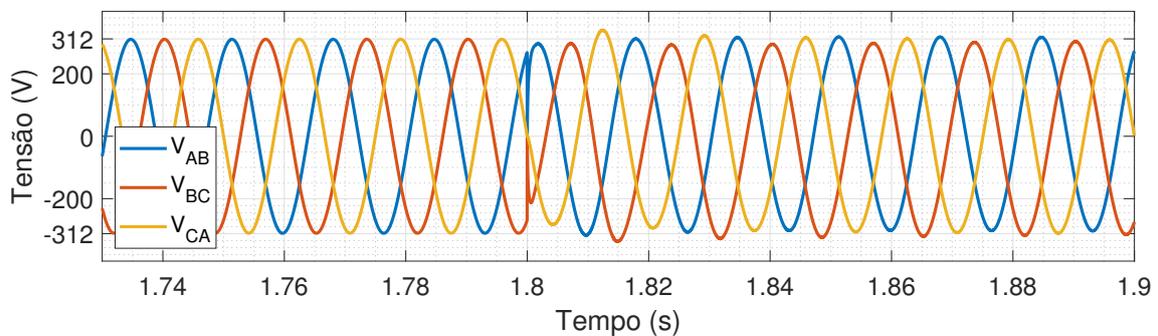


Figura 4.9: Tensões instantâneas da barra de carga.

A partir das simulações dos dois cenários apresentados, espera-se observar que a melhor opção de funcionamento do D²VC seja aquela na qual ele opere na rede de maneira continuada, independente do padrão de conexão das cargas, protegendo a rede dos desvios de tensão que a mesma possa sofrer. Porém, para avaliar o desempenho do controle do VSC₂, é considerada a terceira situação de atuação do controle, na qual permite-se que a carga cause o desvio de tensão no sistema, altere as componentes de sequência até o instante de atuação do D²VC, corrigido estas componentes de volta a seus valores de referência, tornando clara a sua ação mitigatória.

4.2.4 Correção das componentes de seqüência

4.2.4.1 Carga equilibrada

Segundo a Tabela 4.2, a entrada da carga n^o6 na rede de distribuição simulada da Figura 4.1 ocasiona o afundamento da tensão na barra de carga para $V = 0.933\text{pu}$, dada a diminuição da componente de seqüência positiva. O princípio de regulação da tensão nesta barra se inicia com a obtenção da amplitude de seqüência positiva da tensão e comparação com seu valor de referência. Os eventos a serem observados nos resultados de simulação são ordenados da seguinte maneira:

1. Até $t = 0.9\text{s}$: Rede em vazio;
2. Em $t = 0.9\text{s}$: Entrada da carga n^o 6 equilibrada na rede;
3. Em $t = 1.2\text{s}$: Atuação do D²VC.

A obtenção das componentes de seqüências é realizada conforme a Figura 4.10 ilustra, onde após as tensões da barra de carga terem sido transformadas para o referencial $\alpha\beta$, o DSOGI encarrega-se de gerar os sinais de eixo direto e em quadratura das tensões de entrada, i.e., $v'_{\alpha\beta}$ e $jv'_{\alpha\beta}$. Tais sinais são dados como entrada do bloco PNSC, que os decompõe em componentes de seqüência positiva e negativa.

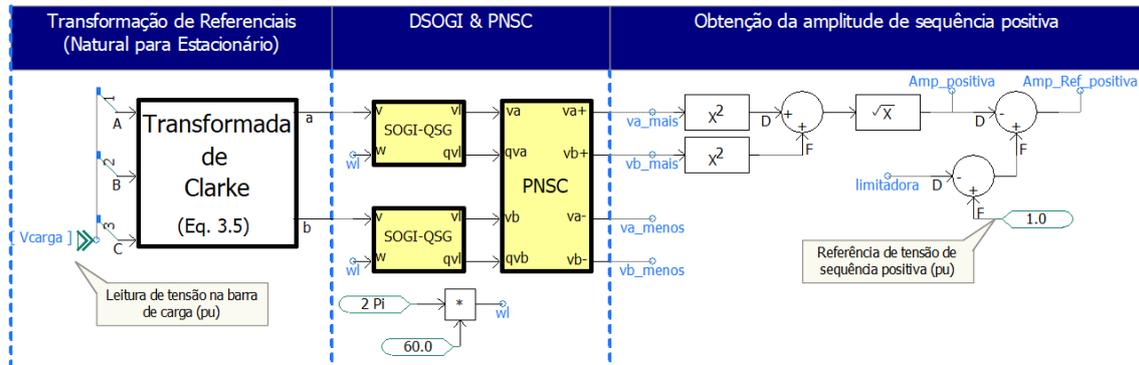


Figura 4.10: Obtenção das amplitudes de seqüência positiva e negativa no PS-CAD/EMTDC.

A Figura 4.11 mostra o impacto que a carga equilibrada exerce em $t = 1.5\text{s}$ nas formas de onda das tensões da barra de carga, vide Figura 4.11a. Detalha-se o perfil RMS na Figura 4.11b, constatando a redução da amplitude de seqüência positiva ilustrada na Figura 4.11c.

A carga conectada ao sistema foi determinada de modo a ocasionar um afundamento tal que o D²VC atuasse ainda dentro da região linear do SPWM do conversor. Desta maneira, a limitadora senoidal explicada no Capítulo 3 não entra em operação neste momento, e o sinal atenuante que a limitadora produz, vista como “limitadora” na etapa de comparação da Figura 4.10, se mantém em zero.

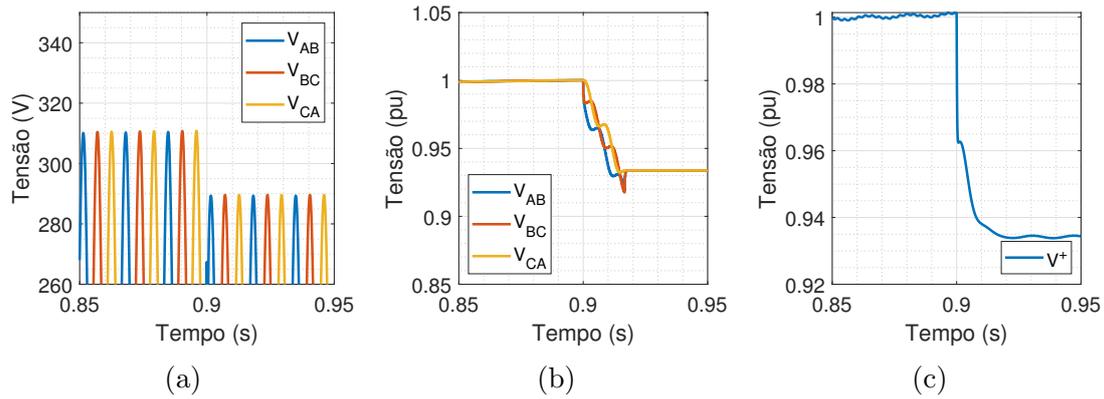


Figura 4.11: Entrada da carga equilibrada: (a) Tensões instantâneas, (b) tensões RMS e, (c) amplitude da sequência positiva.

Os sinais senoidais de entrada dos controladores P+R da Figura 4.12 podem ser vistos na Figura 4.13c. Tais senoides são obtidas pelas senoides unitárias da Figura 4.13b, multiplicadas pelo resultado da comparação entre a amplitude das tensões de sequência positiva com a referência, i.e., 1 pu, vide 4.13a. A supressão das componentes de sequência negativa também é garantida no controle da Figura 4.12 pela multiplicação por -1, que garante a soma das tensões de sequência negativa em $\alpha\beta$ com as suas respectivas senoides em oposição de fase. Convém destacar que as tensões de entrada dos controladores P+R têm sincronismo garantido com a rede pela geração das senoides unitárias em $\alpha\beta$, vistas na Figura 4.13a, geradas pelas próprias saídas do DSOGI, razão pela qual dispensa-se o uso de PLLs.

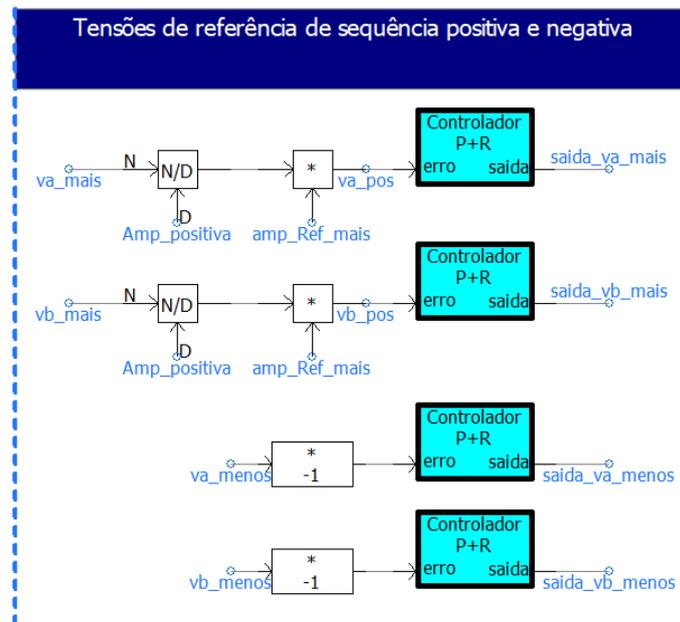


Figura 4.12: Senoides de erro de sequência positiva e negativa no PSCAD/EMTDC.

Após o cálculo dos erros de tensão de sequência positiva, que são entradas dos controladores P+R, reconstitui-se as saídas destes controladores no referencial na-

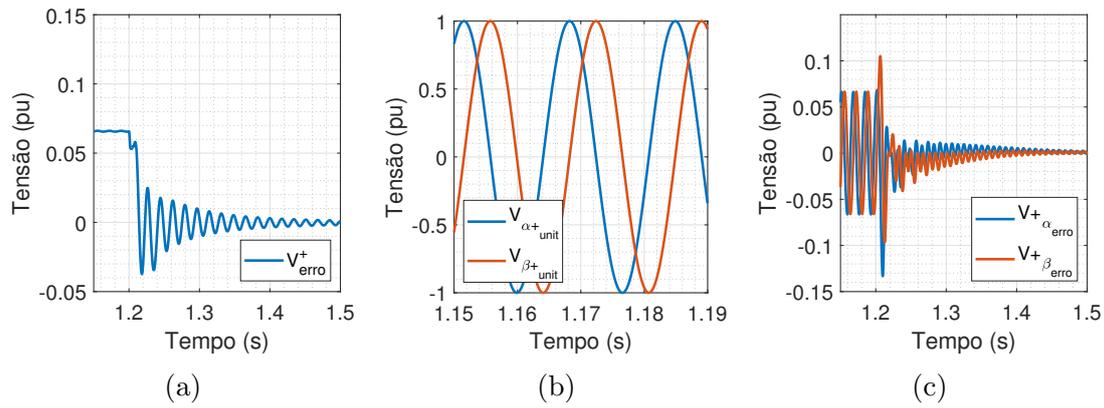


Figura 4.13: Controle de seqüência positiva: (a) Erro de amplitude da componente de seqüência positiva, (b) senoides unitárias sincronizadas com a rede e, (c) tensões de entrada dos controladores P+R.

tural. Estas senoides são os sinais de controle que o D^2VC deve sintetizar na saída para regulação da barra de carga. Por já se encontrarem normalizadas com relação à tensão de base do sistema, são utilizadas na lógica de acionamento SPWM do VSC_2 em $t = 1.2$ s, e assim, efetua-se a correção da tensão na barra de carga, como ilustra a regulação mostrada na Figura 4.14.

Verifica-se da Figura 4.14a que após um curto período transitório, o perfil de tensões é trazido de volta à valores nominais em torno de 80ms. Além disso, a compensação da tensão é acompanhada de um pequeno desequilíbrio associado até o regime permanente, sem que os limites de FD sejam infringidos.

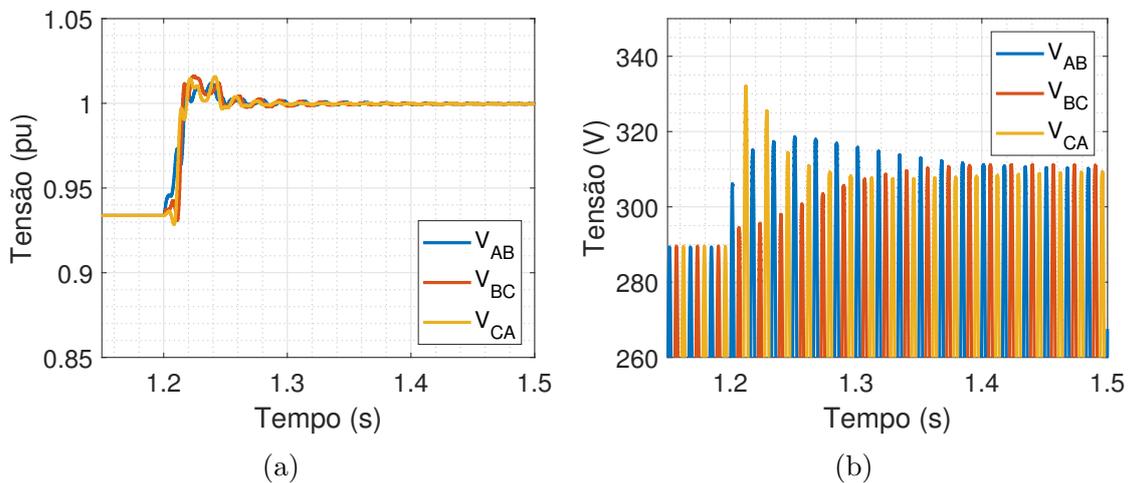


Figura 4.14: Atuação do D^2VC na barra de carga: (a) Perfil de tensão corrigida e, (b) tensões instantâneas corrigidas.

4.2.4.2 Carga desequilibrada

Comumente, as redes de distribuição sofrem desequilíbrios oriundos de carregamentos desequilibrados nas fases dos alimentadores. De modo a replicar este

fenômeno, a simulação do cenário desequilibrado considerou a mesma configuração da Figura 4.1, porém com impedâncias $R_A = 30.0\Omega$, $R_B = 10.0\Omega$ e $R_C = 4.0\Omega$ conectadas em Y. Analisa-se a correção de ambas as componentes de sequência separadamente, considerando a seguinte sequência de eventos:

1. Até $t = 1,2s$: Rede a vazia;
2. Em $t = 1,2s$: Conexão da carga desequilibrada;
3. Em $t = 1,5s$: Correção de uma componente de sequência.

Com cargas diferentes conectadas em cada uma das três fases do alimentador, ocorre o afundamento das tensões na barra de carga em diferentes níveis. Com isso, espera-se observar o decréscimo da amplitude de sequência positiva e o aumento do conteúdo de sequência negativa.

A Figura 4.15 mostra a compensação apenas do conteúdo de sequência positiva em $t = 1,5s$, como evidenciado na Figura 4.15c. Logicamente, o que sucede desta compensação é que as tensões instantâneas permanecem infringindo os índices de QEE no sistema, vide Figura 4.15a e Figura 4.15b.

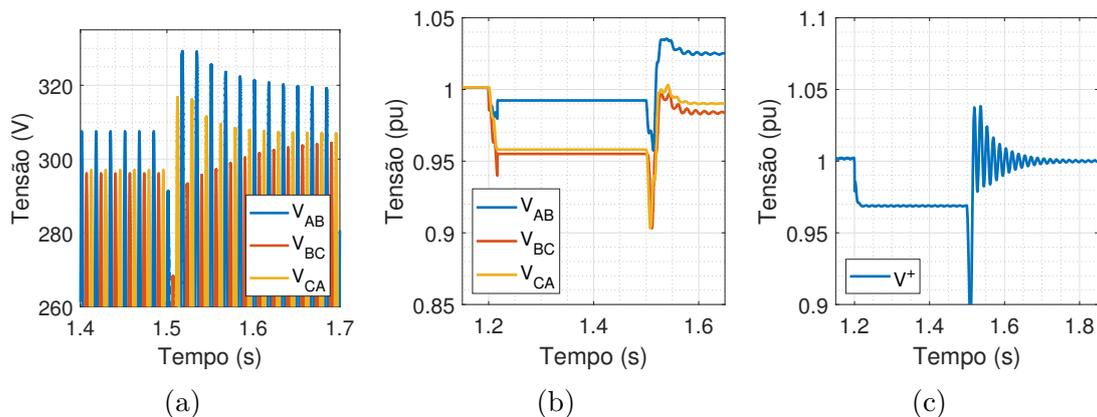


Figura 4.15: Atuação da compensação apenas de componentes de sequência positiva: (a) Tensões instantâneas desequilibradas, (b) perfil do desequilíbrio em pu e, (c) correção do valor nominal de sequência positiva.

Em contrapartida, como mostra a Figura 4.16a, a simples compensação do conteúdo de sequência negativa em $t = 1,5s$ suprime o desequilíbrio de tensões instantâneas, vide Figura 4.16b. Porém, a permanência do afundamento de tensão continua impactando a barra de carga, vide Figura 4.16b. Por esta razão é que o controle desenvolvido monitora o surgimento de ambas as componentes de sequência presentes no sistema, provendo a compensação conjunta das mesmas.

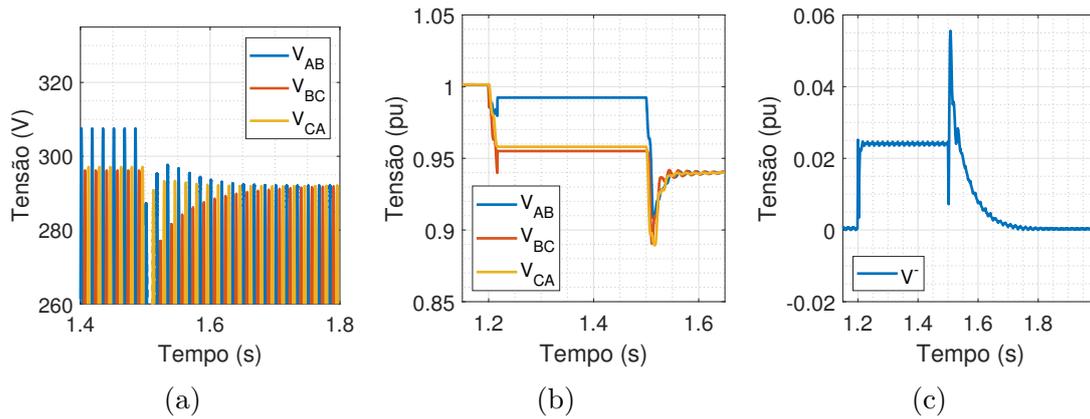


Figura 4.16: Atuação da compensação apenas de componentes de sequência negativa: (a) Tensões instantâneas equilibradas, (b) perfil do equilíbrio em pu e, (c) correção do valor nominal de sequência negativa.

4.2.4.3 Atuação da limitadora senoidal

A etapa do algoritmo da Figura 4.17 efetua a limitação dos sinais modulantes dentro da região linear de chaveamento SPWM. Esta limitação é realizada por meio da obtenção dos valores de pico dos sinais modulantes e posterior comparação com o limite da região linear, i.e., 1.0. O erro gerado, sendo positivo, é conduzido à entrada do controlador PI, cuja saída é devolvida como sinal atenuante no controle de amplitude de tensão de sequência positiva, conforme explicado no Capítulo 3.

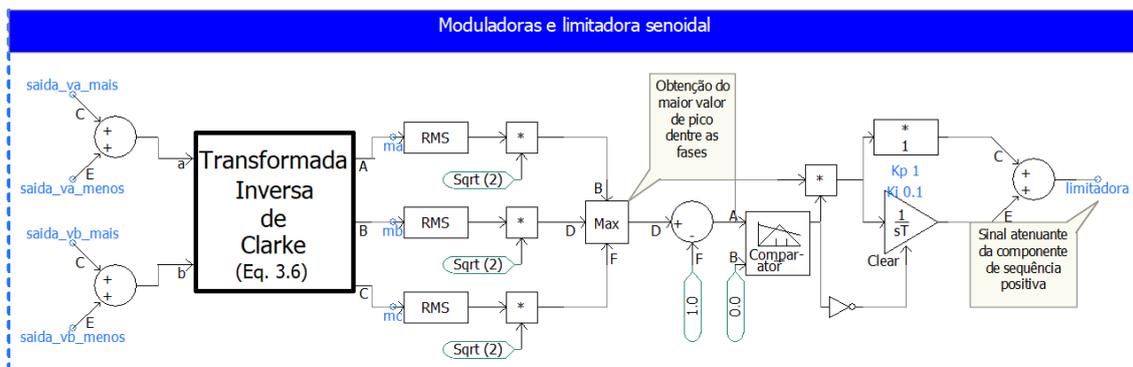


Figura 4.17: Confeção das tensões de referência e lógica da limitadora senoidal no PSCAD/EMTDC.

O funcionamento da lógica de limitação senoidal pode ser verificada na Figura 4.18 e a imposição da região não-linear é realizada por meio do desligamento do controle do VSC₁. Dessarte, permite-se que a tensão no elo decresça na medida da requisição de compensação por parte do VSC₂.

Com o objetivo de asseverar o cenário de sinais modulantes na região não-linear, simulou-se um carregamento mais pesado na rede, com impedâncias de 1.0Ω por fase. Como consequência, os sinais modulantes ultrapassam a região linear, como se vê na Figura 4.18a. Por não alcançar a tensão de referência, o algoritmo de

controle permanece integrando monotonicamente o erro de tensão no tempo, como constata-se na Figura 4.18b. À vista disso, quanto mais distantes da região linear, mais quadradas se tornam as tensões de compensação sintetizadas pelo VSC₂, vide Figura 4.18c.

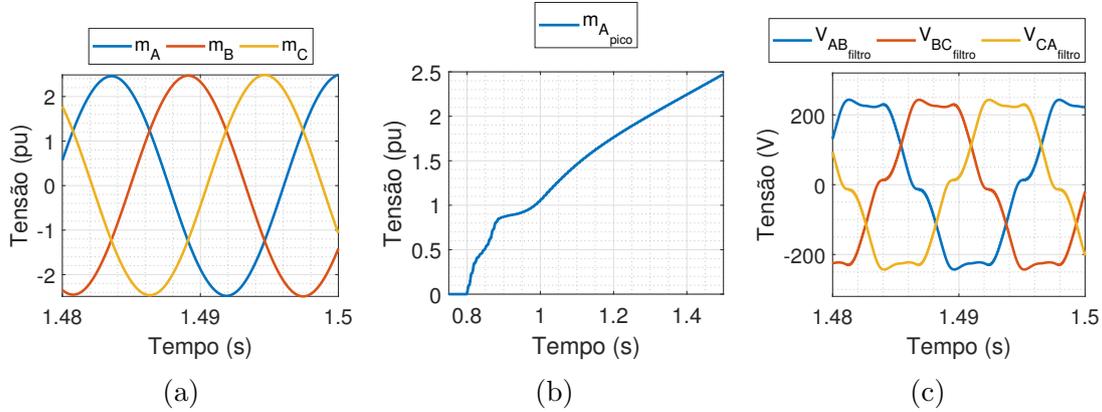


Figura 4.18: Limitadora senoidal fora de operação: (a) Moduladoras fora da região linear, (b) valor de pico instantâneo das moduladoras e, (c) tensões de saída do VSC₂.

A atuação da lógica da limitadora senoidal evita a ultrapassagem do valor de pico de uma ou mais senoides de referência, contendo-as dentro da região linear, conforme se vê na Figura 4.19a. A contenção do valor de pico da moduladora m_A pode ser verificada na Figura 4.19b, conduzindo às tensões de saída do filtro do VSC₂ na Figura 4.19c.

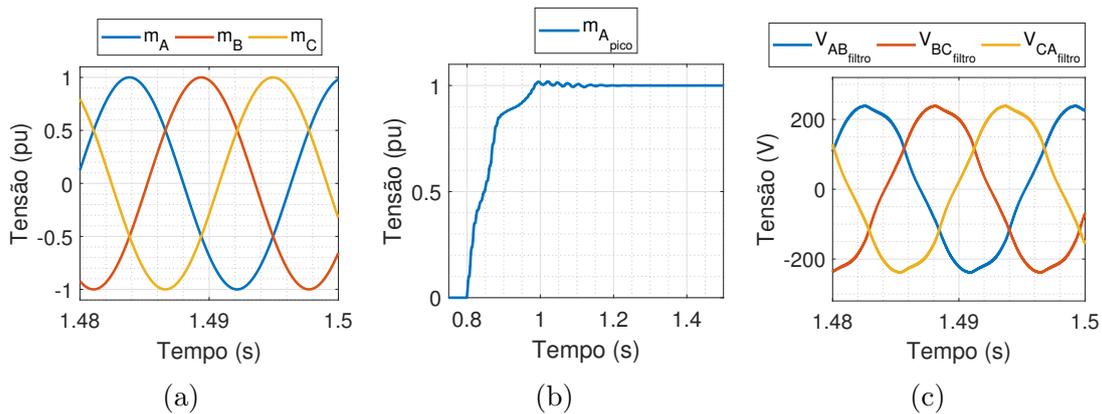


Figura 4.19: Limitadora senoidal em operação: (a) Moduladoras dentro da região linear, (b) valor de pico instantâneo das moduladoras e, (c) tensões de saída do VSC.

O efeito imediato da ação da limitadora senoidal culmina na redução das magnitudes de tensão da barra de carga, conforme mostra a Figura 4.20. Com efeito, estas tensões não alcançam os valores de referência, porém se encontram o mais próximo possível dos valores nominais da rede, dentro da capacidade do D²VC. De outra sorte, a tensão nominal do sistema poderia ser alcançada, contudo, infrin-

gindo os limites de QEE por estarem somadas a tensões com conteúdos harmônicos característicos da onda quadrada.

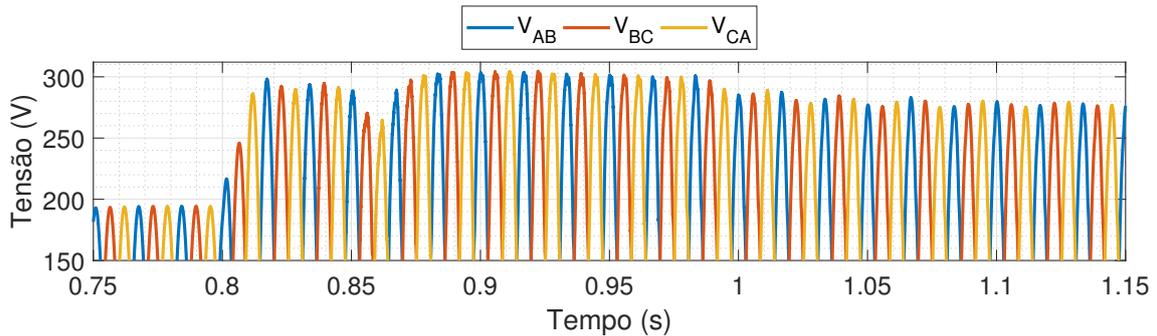


Figura 4.20: Picos de tensões instantâneas na barra de carga com atuação da limitadora senoidal.

4.3 Monitoramento do D²VC no sistema

Constatada a capacidade de atuação do D²VC na rede regulando o conteúdo de sequência positiva e negativa, resta comprovar a efetividade do D²VC atuando com conexões de carga em instantes aleatórios no sistema. Deste ponto em diante, a compensação se dará em ambas as componentes de sequência atuando antes da perturbação de corrente ocasionada pela entrada e saída de cargas do sistema.

4.3.1 Manobra de carga equilibrada

Com vistas a avaliar a operação continuada do D²VC, adota-se as cargas n^o3 e n^o6, objetivando causar o afundamento de tensão aos limiares crítico e precário do PRODIST, respectivamente. Conforme se vê na Figura 4.21, compara-se o comportamento da barra de carga com o sistema na configuração normal e na configuração com D²VC. As simulações consideram a seguinte sequência de eventos:

1. Até $t = 0,9s$: Rede em vazio;
2. Em $t = 0,9s$: Atuação do D²VC;
3. Em $t = 1,5s$: Conexão da carga de 9,68kW;
4. Em $t = 2,1s$: Aumento de carga para 19,35kW, e;
5. Em $t = 2,7s$: Alívio de carga para 9,68kW.

Observa-se da Figura 4.21b o impacto da carga sobre a componente de sequência positiva, que assume os mesmos valores da tensão na barra de carga na Figura 4.21a,

dada a natureza equilibrada da carga em questão. Vê-se que as tensões sofrem uma variação de -7% para a entrada da carga e -13% quando ocorre o aumento de carga. Contudo, a atuação do D²VC de forma continuada permite que tais afundamentos sejam mitigados em intervalos de tempo de aproximadamente 50ms, tanto para a entrada de carga, quanto para o aumento e o alívio de carga. Nota-se que em cada evento a regulação da tensão ocorreu sem jamais infringir a faixa adequada de tensão.

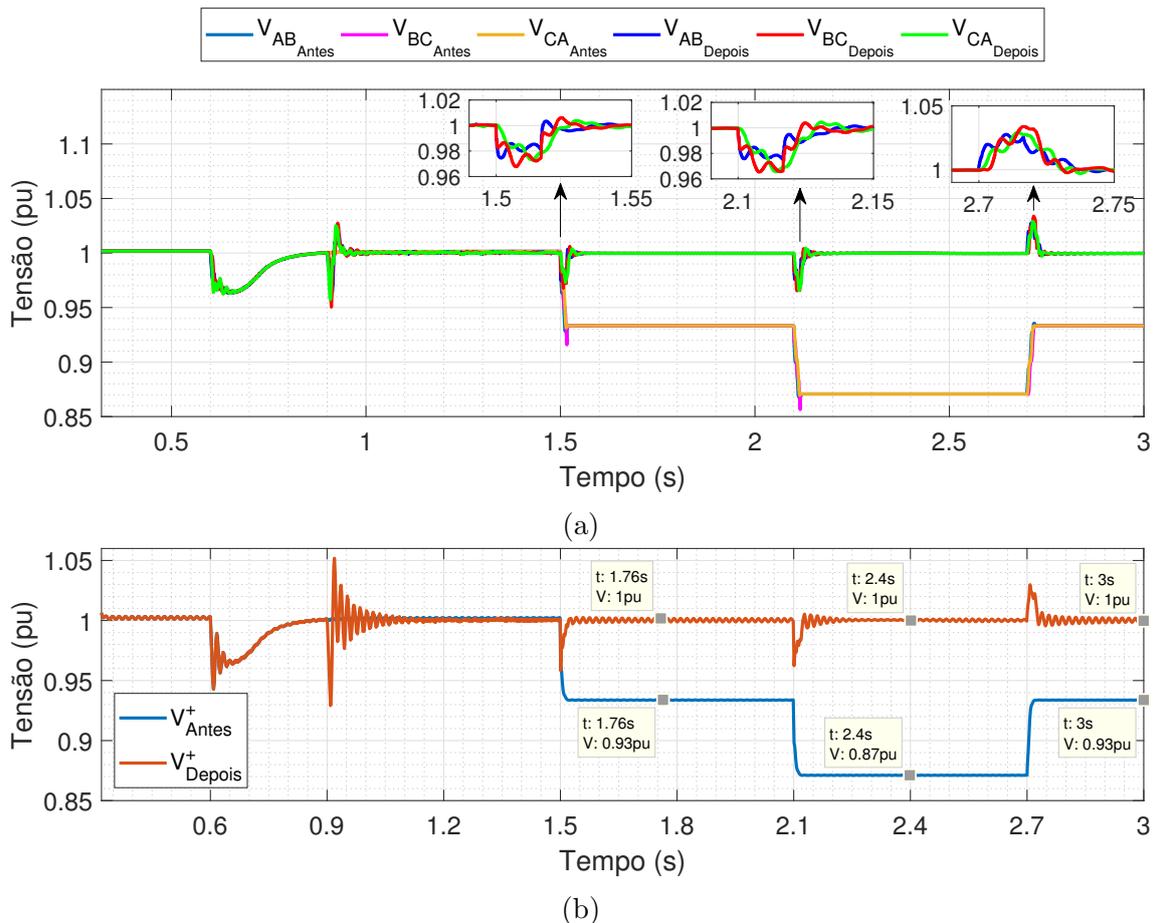


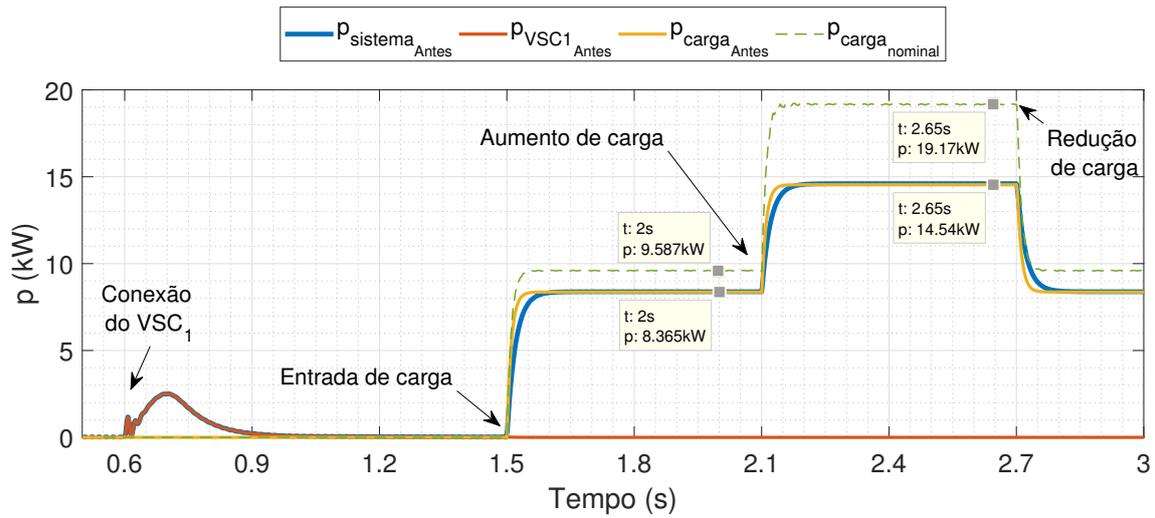
Figura 4.21: Comportamento do sistema antes e depois da atuação do D²VC: (a) Perfil de tensões na barra de carga e, (b) componente de seqüência positiva.

A Figura 4.22 mostra ainda o efeito direto do desvio de tensão na potência fornecida pela rede às cargas, que por causarem o afundamento da tensão na barra às quais se conectam, terminam por reduzir a potência efetivamente consumida. A Figura 4.22a mostra a potência nominal das cargas, representada pela curva tracejada no gráfico. Dado o afundamento observado, a potência consumida pela carga à partir de sua entrada em $t = 1,5s$ passa a ser de 8,364kW, o que representa uma redução de 16% em relação ao valor nominal de potência. Já por ocasião do aumento de carga em $t = 2,1s$, nota-se o consumo efetivo de 14,54kW, representando consumo com decréscimo de 24,11% em relação à potência nominal. Tais erros podem ser

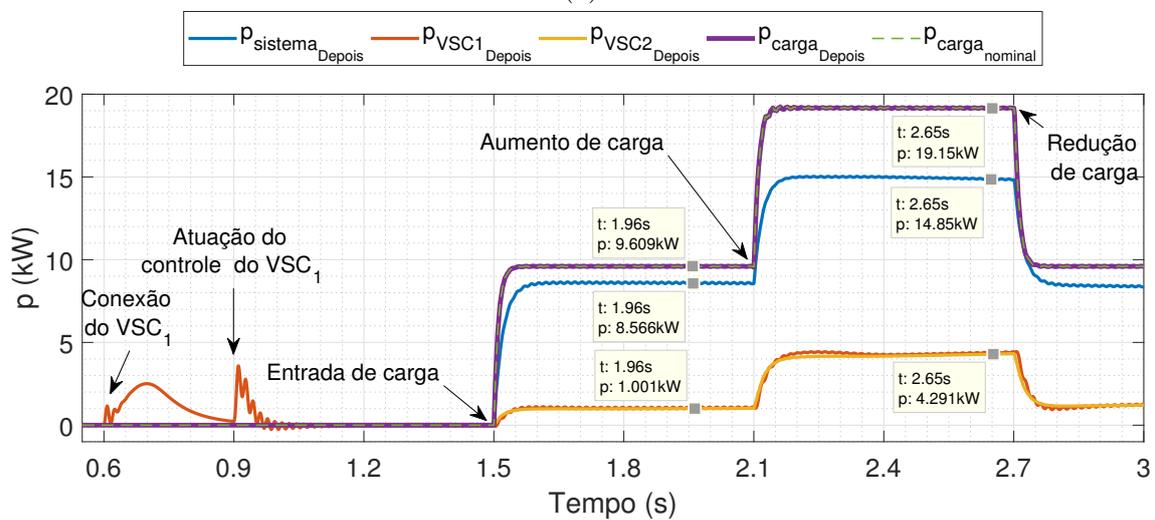
satisfatoriamente reduzidos a valores praticamente desprezíveis a partir da atuação do D²VC, como se constata na Figura 4.22b.

Em última análise, verifica-se o balanço de energia do conjunto D²VC+Filtro a partir das potências de entrada e saída do D²VC. Percebe-se que a todo instante, durante o regime permanente, a soma das potências do sistema e do VSC₂ ($p_{sistema_{Depois}} + p_{VSC2_{Depois}}$) sempre resulta na potência consumida pela carga, comprovando o compartilhamento de potência pelo D²VC.

Nota-se também que durante o transitório de aumento de carga, a potência de saída do D²VC, i.e., $p_{VSC2_{Depois}}$ é ligeiramente menor que a potência de entrada $p_{VSC1_{Depois}}$ durante aproximadamente 300ms. Este fato decorre justamente da tendência de descarregamento da tensão do elo CC durante a manobra de aumento de carga, requerendo uma ação de compensação do controle do VSC₁ na injeção de uma potência ativa que regule a tensão do elo CC de volta ao valor nominal, conforme se constata da Figura 4.23.



(a)



(b)

Figura 4.22: Fluxo de potência ativa: (a) Antes da atuação do D²VC e, (b) depois da atuação do D²VC.

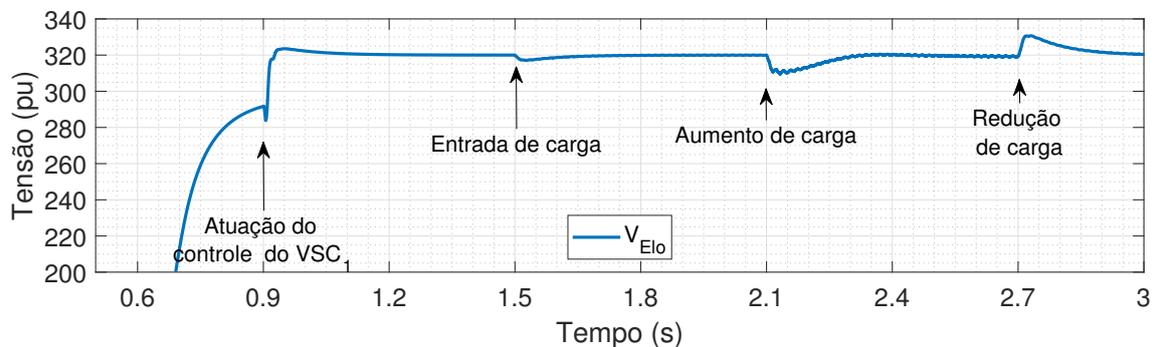


Figura 4.23: Tensão no Elo CC para compensação atuação do D²VC frente a entrada e saída de cargas.

4.3.2 Carga desequilibrada

A operação do D²VC também é avaliada face aos casos mais comuns em redes de distribuição que é a manobra de cargas desequilibradas. Para este fim, adotou-se o seguinte esquema de manobra de cargas na simulação:

1. Até $t = 0,6s$: Rede em vazio;
2. Em $t = 0,9s$: Atuação do D²VC;
3. Em $t = 1,5s$: Conexão da carga: $R_A = 30.0\Omega$, $R_B = 10.0\Omega$, $R_C = 4.0\Omega$;
4. Em $t = 1,8s$: Aumento de carga: $R_A = 15.0\Omega$, $R_B = 5.0\Omega$, $R_C = 2.0\Omega$, e;
5. Em $t = 2,4s$: Abertura da fase A: $R_A = \infty$, $R_B = 5.0\Omega$, $R_C = 2.0\Omega$.

A Figura 4.24a exibe o comportamento da tensão na barra de carga antes e depois da atuação do D²VC. Observa-se ainda que o último evento ocorrido no sistema, i.e., abertura da fase A, ocasiona a sobre-elevação de tensão $V_{AB_{Antes}}$, e também leva à faixa precária a tensão $V_{BC_{Antes}}$. Contudo, a atuação continuada do D²VC permite que tais transgressões sejam mitigadas em intervalos de tempo de aproximadamente 100ms, tanto para a entrada da carga desequilibrada, quanto para o aumento de carga e abertura da fase A. Nota-se também que em cada evento a regulação da tensão ocorreu sem jamais infringir a faixa adequada de tensão.

Observa-se ainda na Figura 4.24b a diminuição da componente de sequência positiva por ocasião da entrada de carga no sistema. Já na Figura 4.24c vê-se a elevação da componente de sequência negativa durante os eventos de entrada de carga, aumento de carga e abertura da fase A, sendo estas últimas duas manobras suficientes para causar a infração do limite máximo de fator de desequilíbrio, conforme se vê na Figura 4.25.

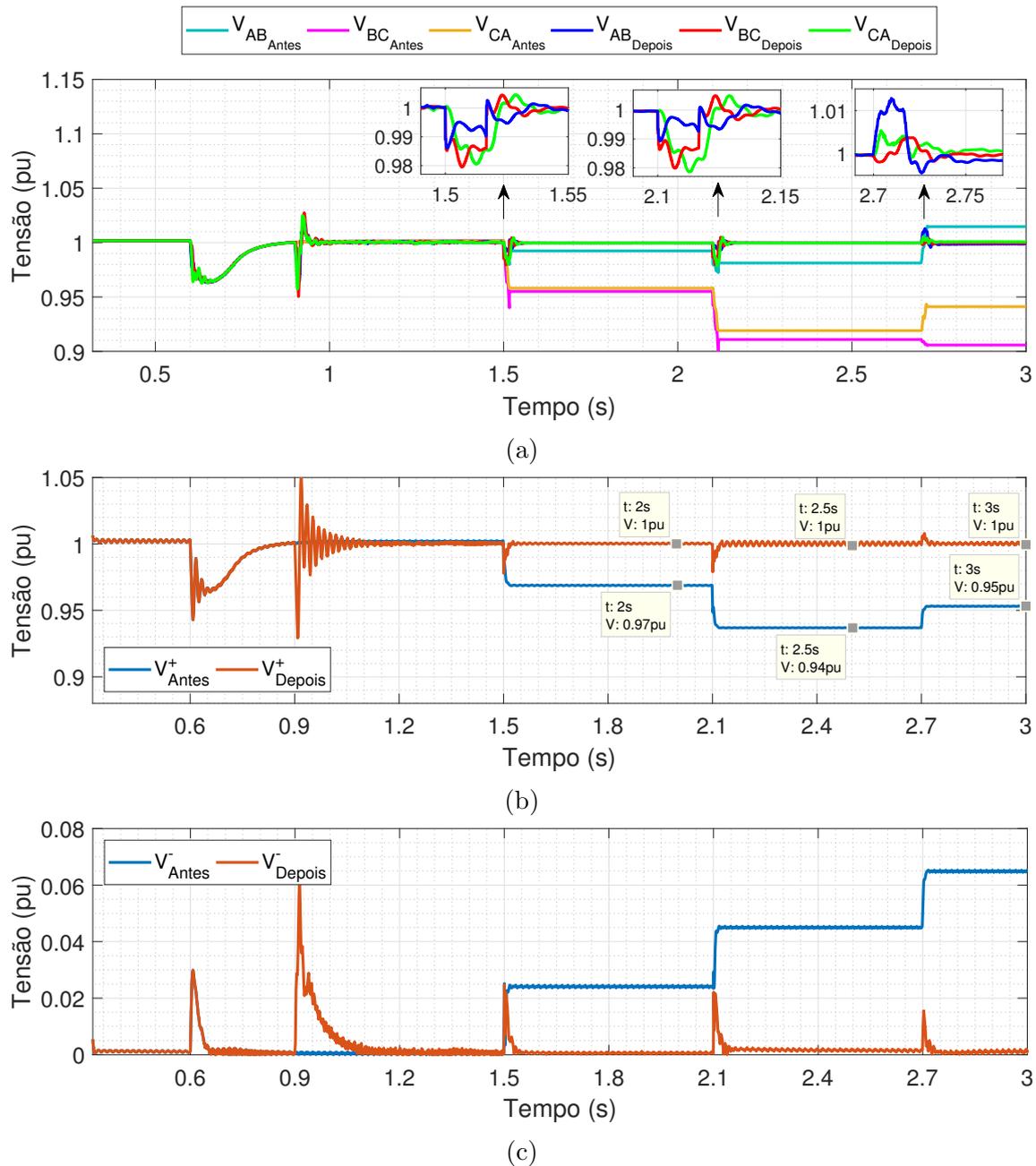


Figura 4.24: Comportamento do sistema antes e depois da atuação do D²VC: (a) Perfil de tensões na barra de carga, (b) componente de sequência positiva e, (c) componente de sequência negativa.

Observa-se da Figura 4.25 a atuação contínua do D²VC, e nota-se a rápida ultrapassagem do FD_{max} durante o período transitório de entrada do D²VC em operação, em contraponto aos instantes de manobra de carga em $t = 1,5s$, $t = 2,1s$ e $t = 2,7s$, mantendo sempre o FD dentro dos limites aceitáveis. Este ponto corrobora o requisito de proteção da rede contra desvios de tensão devido à operação contínua do D²VC no sistema, sem jamais comprometer os limites regulatórios de tensão adequada e FD máximo da ANEEL.

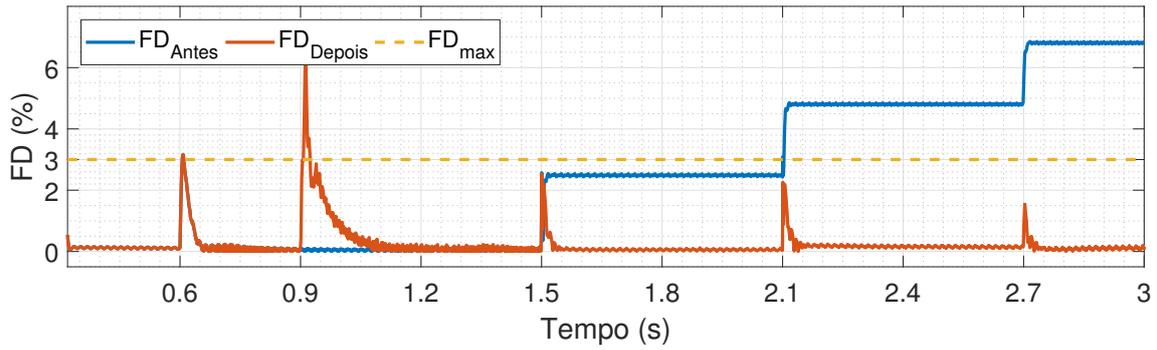
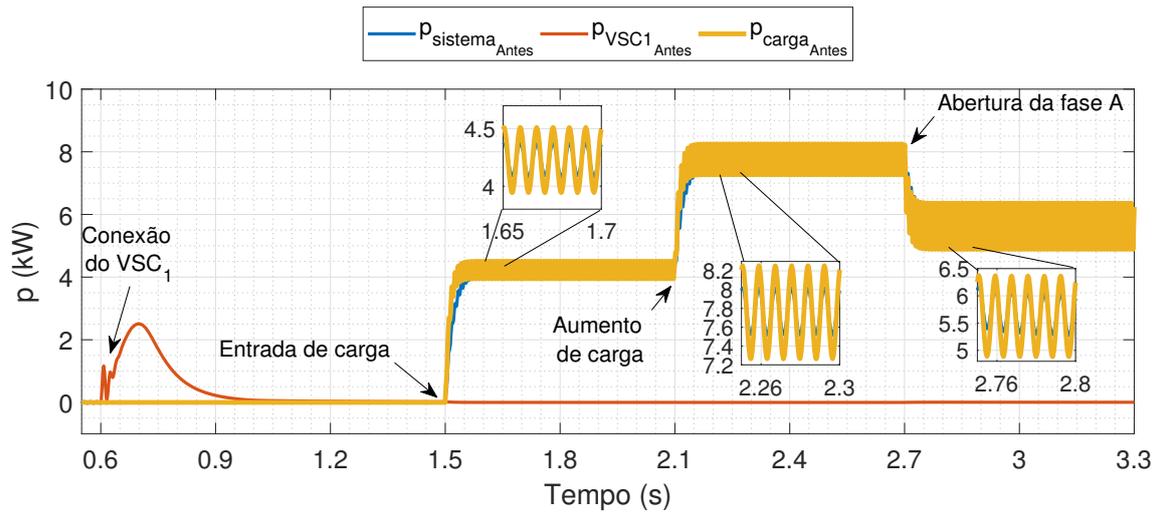
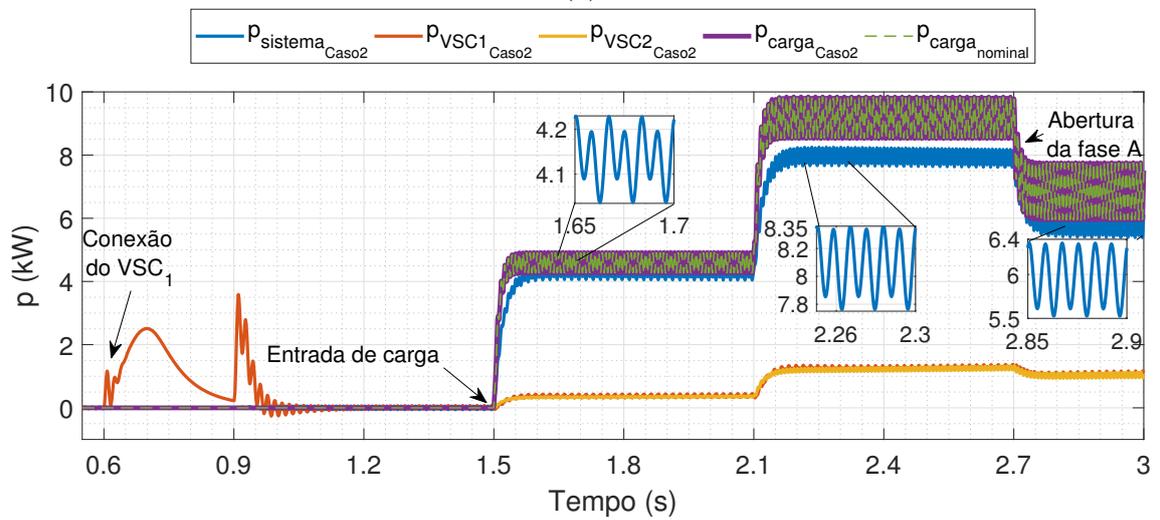


Figura 4.25: Fator de desequilíbrio.

A correção do desequilíbrio de tensão no sistema também se mostrou benéfica do ponto de vista da oscilação de potência ativa durante o atendimento à carga. Durante a entrada de carga, a variação da oscilação de potência do sistema era da ordem de 700W, sendo reduzida a 250W devido à correção do desequilíbrio de tensão, o que corresponde a uma oscilação aproximadamente 36% menor que na configuração inicial. Do mesmo modo, a oscilação durante o aumento de carga reduziu-se de 1000W para 550W, correspondendo a uma redução de 45%. Por fim, durante a abertura da fase A, caso com maior FD simulado, a potência apresentou variação de 1500W, enquanto que após a correção do desequilíbrio apenas 900W, correspondendo a 40% de redução. As reduções de oscilação de potência não são o foco da utilização do D²VC devido a correção apenas do desequilíbrio de tensões, e não do desequilíbrio de correntes ainda existente no sistema, razão pela qual as oscilações observadas foram apenas reduzidas e não eliminadas.



(a)



(b)

Figura 4.26: Fluxo de potência ativa: (a) Sem atuação do D²VC e, (b) com atuação do D²VC.

4.4 Sumário do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação conduzidos no PSCAD/EMTDC investigando a capacidade de regulação de tensão do D²VC. Considerações foram feitas a respeito dos parâmetros do filtro LC e do comissionamento do D²VC na rede sem ocasionar a degradação do perfil de tensão observado no alimentador, mesmo que temporariamente. A conclusão desta etapa constatou que a melhor maneira de conectar o D²VC é considerando a ação completa do D²VC, i.e., o acionamento simultâneo de ambos os VSCs. Desta forma, a rede pode iniciar o atendimento às cargas sem que estas estejam submetidas aos desvios de tensão, naturalmente observáveis, dado que o D²VC já se encontra em operação, perfazendo a compensação *online* de tensões.

Na sequência, averiguou-se a eficácia do controle direto frente à manobra de cargas na rede de distribuição simulada no PSCAD/EMTDC. O afundamento de tensão observado por conta da entrada da carga equilibrada pôde ser mitigado de forma rápida pelo D²VC, regulando a componente de sequência positiva de volta a 1 pu, sem que a faixa adequada sequer tenha sido infringida. Em seguida, submeteu-se o sistema a um aumento de carga, dobrando o consumo de potência ativa e, por fim, um alívio de carga, retornando à metade desta potência. Verificou-se que o D²VC foi capaz de sustentar a tensão na barra de carga com variações da ordem de 2%, o que comprova a capacidade de regulação de tensão *online* do sistema, culminando inclusive na correção do fluxo de potência nominal do sistema. Ainda verificou-se a correta atuação da lógica da limitadora senoidal, em evitar que os sinais modulantes do SPWM ultrapassassem a região linear de ação do VSC₂, garantindo assim que o D²VC não degradasse os níveis de QEE pelo efeito colateral de inserção de harmônicos no sistema.

No tocante a cenários desequilibrados de tensão, simulou-se a entrada de cargas desequilibradas, além do aumento de carga e abertura de uma fase, elevando o fator de desequilíbrio a níveis de severidade maiores que os permitidos pela ANEEL. Confirmou-se a efetividade do controle do D²VC pela sua atuação no perfil de tensões não apenas regulando a componente de sequência positiva de volta a 1 pu, como também eliminando o conteúdo de sequência negativa, responsável pelo desequilíbrio em sistemas a 3 fios. O fato pôde ser comprovado pela redução do fator de desequilíbrio em cada evento para um valor bem abaixo do limite de 3%, o que também se mostrou benéfico do ponto de vista do fluxo de potência na rede, reduzindo a sua oscilação graças à eliminação do desequilíbrio de tensão.

Capítulo 5

Validação Experimental

O algoritmo de controle do D²VC, descrito no Capítulo 3 e analisado no Capítulo 4 por meio de simulações feitas no ambiente PSCAD/EMTDC, foi testado em bancada experimental. Neste capítulo valida-se parte do controle desenvolvido por meio de um protótipo experimental do D²VC montado em laboratório durante as etapas desta pesquisa. Tal comprovação não se destina a verificar a parte do controle que mantém a tensão nominal no barramento CC do *back-to-back*, papel desempenhado pelo VSC₁. Os testes experimentais se limitam a mitigar os desvios de tensão na barra de carga, validando a parte do controle responsável pelo acionamento do VSC₂. São descritas as características de *hardware* e *software* do protótipo construído e dos testes realizados comprovando a efetividade de compensação de tensões em cenários equilibrados e desequilibrados.

5.1 Protótipo experimental

Com o intuito de validar o controle direto de tensão utilizando o algoritmo desenvolvido, elaborou-se um arranjo experimental para um protótipo do D²VC no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia (LAFAE/UFRJ) durante as fases desta pesquisa, como ilustrado na Figura 5.1.

Cabe salientar que a configuração do controle proposta no Capítulo 3, garante a regulação do barramento CC na tensão de referência mediante o acionamento do VSC₁, conforme os resultados de simulação mostraram na seção 4.2.1.1. Para ser possível manter a tensão nominal do elo CC, a energia necessária para o VSC₂ compensar os desvios de tensão na rede deve ser igual à energia drenada da rede pelo VSC₁. Do contrário, a tensão do elo CC pode aumentar ou diminuir com relação à tensão nominal, de acordo com a potência líquida absorvida/fornecida pelos capacitores.

Contudo, o VSC₁ do protótipo experimental do D²VC não pôde ser acionado para regulação da tensão no elo CC, devido à indisponibilidade de *drivers* de dis-

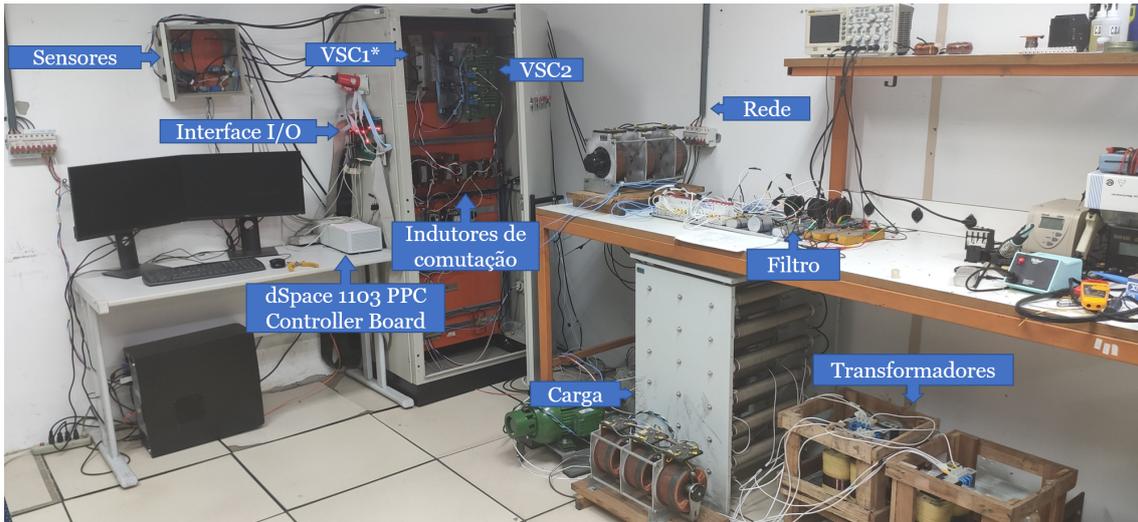


Figura 5.1: Vista geral do arranjo experimental em laboratório.¹

paro durante a fase de coleta de resultados. Este impasse durante a prototipagem em laboratório motivou a mudança do planejamento inicial da configuração dos conversores controlados em *back-to-back* para a estrutura mostrada na Figura 5.2.

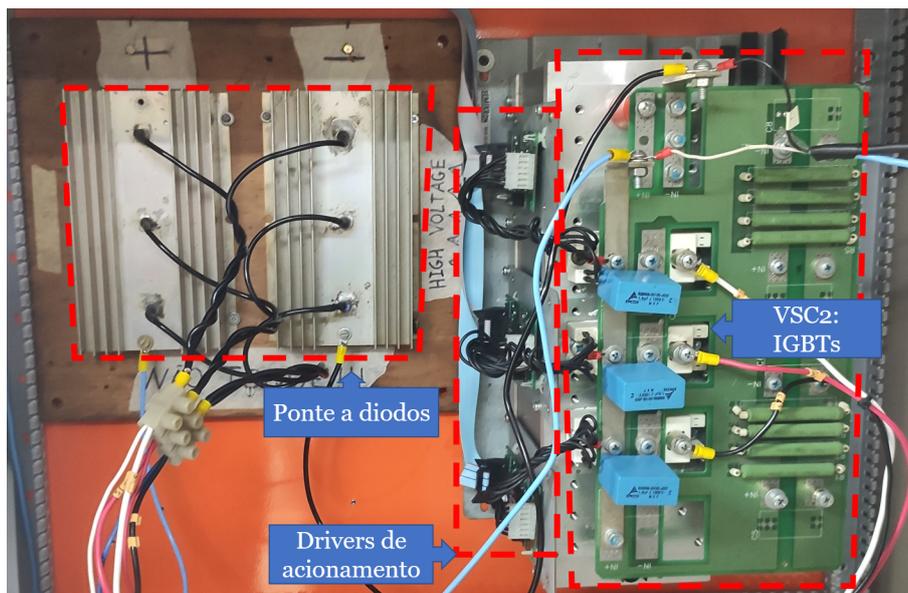


Figura 5.2: Detalhes da configuração do VSC₂.

Nesta configuração, substituiu-se o VSC₁ por uma ponte trifásica a diodos, realizando a conversão de tensão CA-CC. Assim, os capacitores do elo emulam a fonte CC necessária para o VSC₂ executar a compensação de tensões em série com o sistema. Para a proposta de validação do controle, no que diz respeito à capacidade de compensação de tensões em cenários equilibrados e desequilibrados, a mudança da estrutura do VSC₁ não afeta a verificação da atuação do VSC₂, desde que o carregamento da rede não seja tão severo a ponto de ocasionar o descarregamento contínuo dos capacitores ou que haja reversão do fluxo de potência. Tal condição

foi assegurada em bancada durante a validação experimental conectando cargas de potência nominal abaixo da do conversor (10kW).

A Figura 5.3 mostra os indutores de comutação utilizados na entrada da ponte a diodos. Mostra-se também as resistências em série para execução do processo de pré-carga do barramento CC, limitando as sobrecorrentes no processo inicial de carregamento dos capacitores.

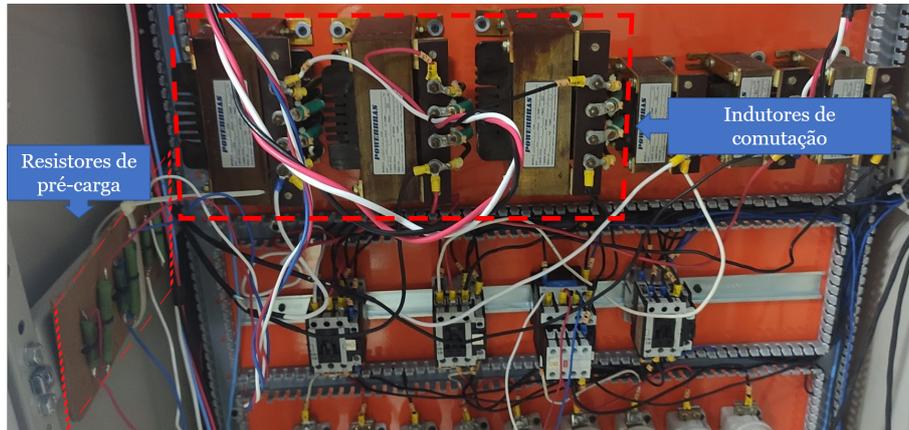


Figura 5.3: Conexão dos indutores de entrada e resistores de pré-carga do VSC₁.

O arranjo dos componentes apresentados, com parâmetros detalhados na Tabela 5.1, foi trazido para o PSCAD/EMTDC. O objetivo é validar os resultados de simulação do Capítulo 4 através da réplica do arranjo experimental em ambiente de simulação e comparação com as coletas experimentais. A configuração do teste a ser simulado e validado em bancada pode ser visto na Figura 5.4.

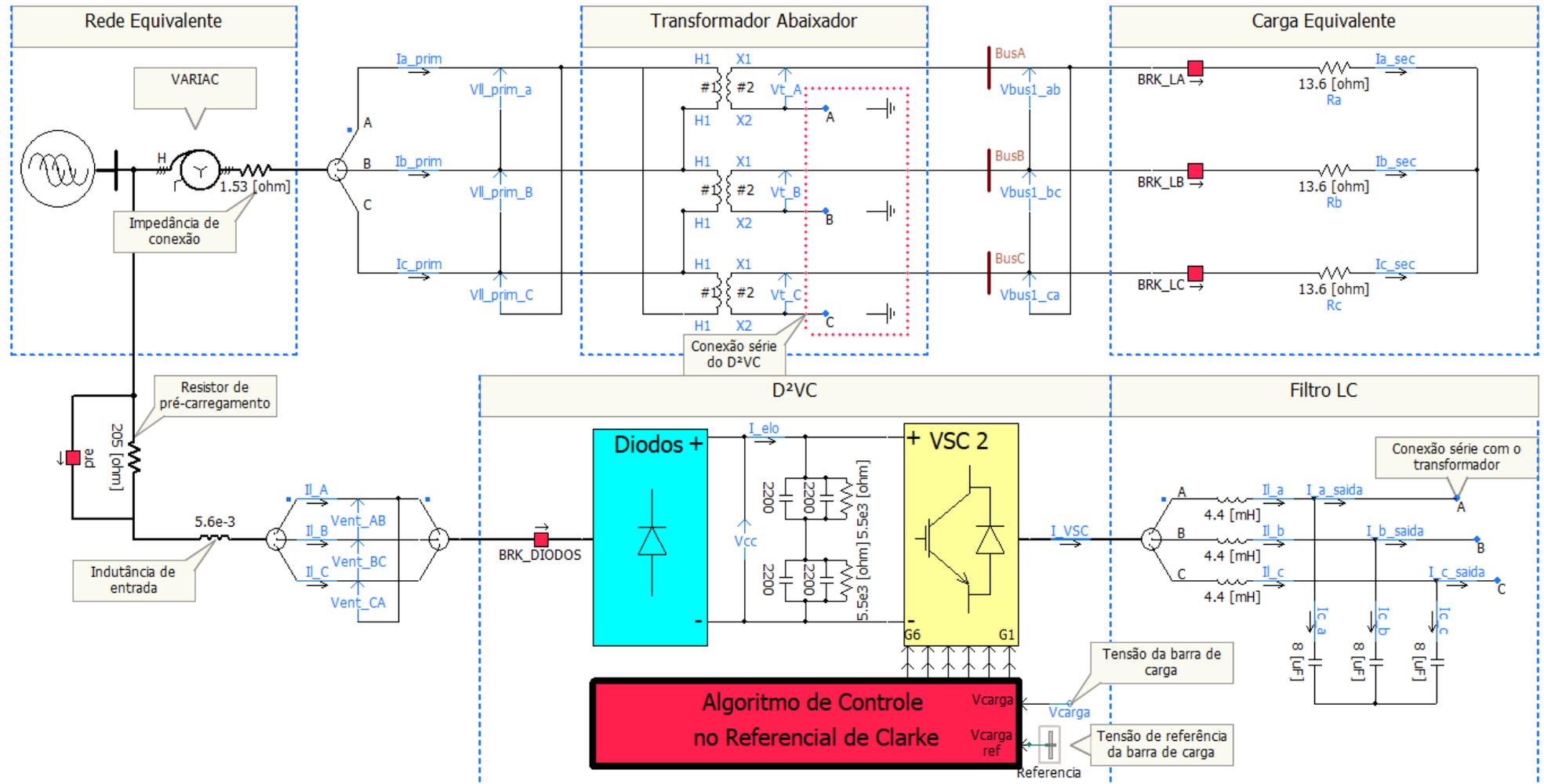


Figura 5.4: Bancada simulada no PSCAD/EMTDC.

Em primeiro lugar, a estrutura do arranjo experimental da Figura 5.4 difere da simulada na Figura 4.1 na impedância equivalente da rede, que experimentalmente, será puramente resistiva. Em segundo lugar, desassocia-se a alimentação da ponte trifásica da rede principal através da conexão à jusante da impedância de conexão, deixando a validação experimental para verificação do controle do VSC₂, unicamente. Por fim, considera-se uma impedância de pré-carga na entrada da ponte trifásica, por motivos de capacidade de condução dos cabos alimentadores do conversor no carregamento inicial dos capacitores.

Dada a configuração de ponte trifásica a diodos, deve-se assegurar que a potência ativa se encontre no sentido do elo CC para a carga através do VSC₂. Tal situação em bancada se deu para tensões de pico fase-terra em torno dos 100V. Valores de tensão maiores que o verificado levam à entrada de potência ativa no elo através do VSC₂, culminando no aumento contínuo da tensão CC nos capacitores. Por este motivo, optou-se por reduzir a tensão nominal da bancada para 100V_{pico}, verificando a validade do algoritmo de controle no atendimento a esta tensão de referência.

Portanto, os valores das cargas para o cenário equilibrado foram escolhidos para atender a condição de carregamento seguro da rede, com relação também a corrente máxima permissível dos condutores na bancada e conforme disponibilidade de resistências. A montagem do cenário desequilibrado se deu na forma de abertura de uma das fases, a saber, a fase C. Os demais parâmetros do protótipo estão elencados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros elétricos do protótipo em pequena escala.

	Parâmetros	Valor	Unidade
Rede	Tensão de fase	100	V _{pico}
	Impedância da linha	1.53	Ω
	Potência nominal do Transformador	1.0	kVA
Carga Equilibrada	R _{A,B,C}	13.6	Ω
Carga Desequilibrada	R _A	13.6	Ω
	R _B	13.6	Ω
	R _C	∞	Ω
VSC ₁	Indutores de Comutação	5.6	mH
	Resistores de pré-carga	205	Ω
	Tensão CC	330	V
	Capacitância do Elo CC	2200	μF
VSC ₂	Frequência de chaveamento	12.0	kHz
	Tempo de banda morta	2.0	μs
Filtro LC	Indutor	4.4	mH
	Capacitor	8.0	μF

5.2 Implementação do controle no dSpace

Nesta etapa experimental do projeto do D²VC, o acionamento do VSC₂ é realizado por meio do processador digital de sinais dSpace DS1103. Este equipamento consiste em um controlador digital para conexão computador-bancada que permite a construção rápida de protótipos de controle.

Por esta característica peculiar do dSpace e a integração direta com o *software* MATLAB/Simulink consegue-se a prototipagem rápida do experimento a ser realizado. O *software* ControlDesk como interface com o usuário permite a interação com a bancada em tempo real. Além disso, o ControlDesk possibilita a análise das grandezas elétricas da bancada de forma digital, habilita eventos como início e fim de determinadas ações de controle e também a gravação de medições em tempo real.

Dentro do ambiente de simulação do Simulink são instaladas bibliotecas de interface em tempo real (rtilib1103), vide Figura 5.5, com os periféricos de entrada e saída dos microprocessadores mestre (*Master PPC*), destacado em 1, e escravo (Slave DSP F240) da placa DS1103 do dSpace, destacado em 2. Dentro da biblioteca *Master PPC* encontram-se os blocos conversores de sinais analógicos em digitais (ADC, *Analogical/Digital Converter*), destacados em 3 e 4, cujos canais carregam neste projeto os dados de medição das tensões na barra de carga. Já os blocos destacados em 5 e 6 referem-se propriamente ao recebimento dos sinais de disparo do controle e encarregam-se do acionamento dos IGBTs.

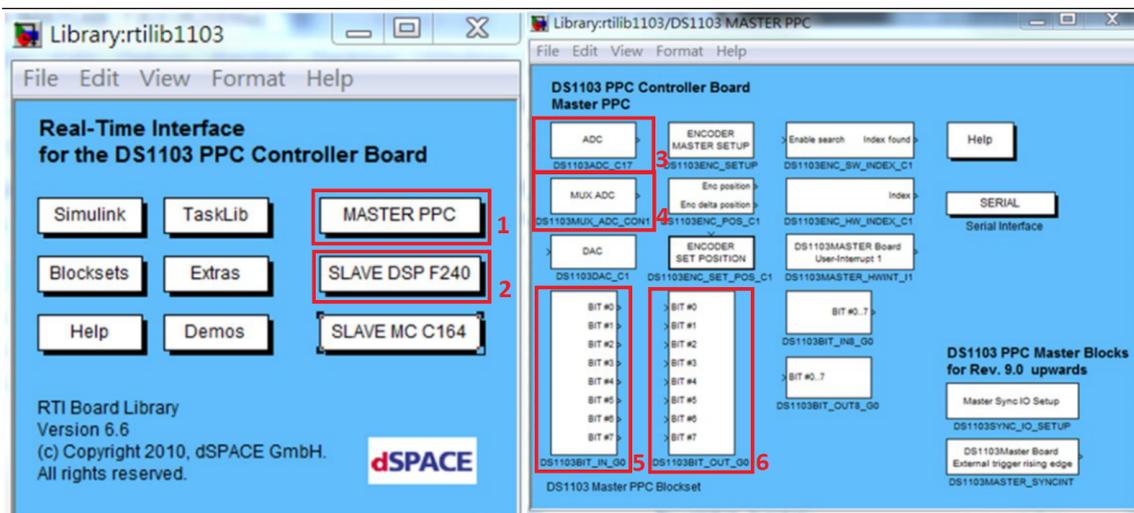


Figura 5.5: Biblioteca de blocos de interface em tempo real.

A partir disso, constrói-se o esquema de controle por meio de código estruturado ou diagrama de blocos, para ser traduzido para a linguagem C e posteriormente embarcado automaticamente no DS1103. O algoritmo de controle desenvolvido no PSCAD/EMTDC nas fases de simulação é escrito no Simulink em forma de diagrama de blocos.

A Figura 5.6 mostra de forma modular, a implementação do controle desenvolvido, com todas as etapas que foram descritas no Capítulo 3 e simuladas no Capítulo 4. Tais etapas constituem-se na: *i*) entrada das leituras de tensão, *ii*) obtenção das componentes de sequência positiva e negativa, *iii*) construção das amplitudes de referência, *iv*) limitadora senoidal e, *v*) elaboração das moduladoras para o SPWM.

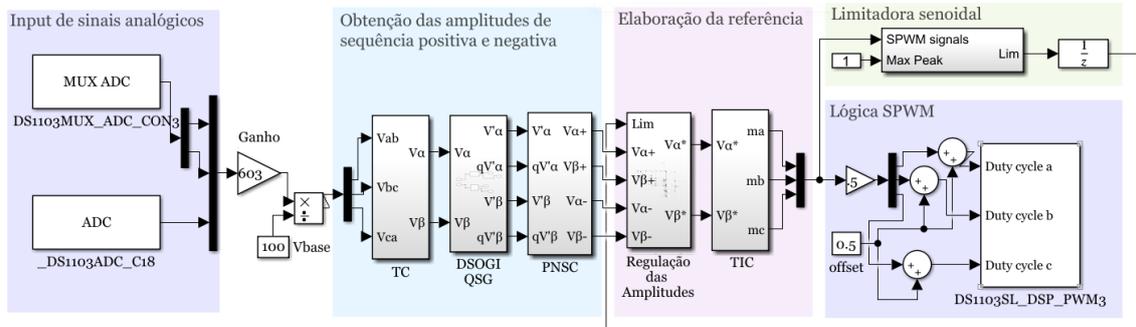


Figura 5.6: Diagrama de blocos do algoritmo de controle construído no MATLAB/Simulink.

Os blocos ADC mostrados na área *Input de sinais analógicos* referem-se às aquisições das leituras de tensão na barra de carga, sendo convertidas da forma analógica para digital. Em sequência, redimensiona-se tais sinais digitais devido ao ganho dos sensores de tensão para ajustá-los à ordem de grandeza das tensões na bancada. Por fim, normalizam-se as tensões com $100V_{pico}$ de referência.

A etapa final do diagrama de blocos, *Lógica SPWM*, consiste na preparação dos sinais de referência de tensão para o DSP escravo por meio do ganho e *offset* dos mesmos, ambos de 0,5, uma vez que a onda portadora do DS1103 varia de 0 a 1. A saída do DSP escravo é um conjunto de 6 sinais digitais de ciclo de trabalho variável, todas com estado lógico ativo de 5V. As demais áreas do diagrama de blocos da Figura 5.6 modularizam a mesma sequência do algoritmo de controle já apresentados nas seções anteriores. Esses blocos encontram-se detalhados para consulta no apêndice B.

Desse modo acelera-se o processo de construção e validação de protótipos em bancada já que o tempo necessário para a conversão do controle no Simulink para um código em C embarcado na placa DS1103 é expressivamente menor que o tempo necessário usando um DSP comercial para o eventual caso em que o usuário não esteja familiarizado com programação em baixo nível. A Figura 5.7 mostra detalhes do processo sequencial de retroalimentação da tensão na carga, centralizando o dSpace como elemento essencial para o processo.

Uma vez recebidos os sinais retroalimentados dos sensores de tensão na barra de carga, o dSpace realiza a aquisição de tais leituras com auxílio da placa de interface I/O desenvolvida no laboratório. O tratamento dos dados é realizado em seguida

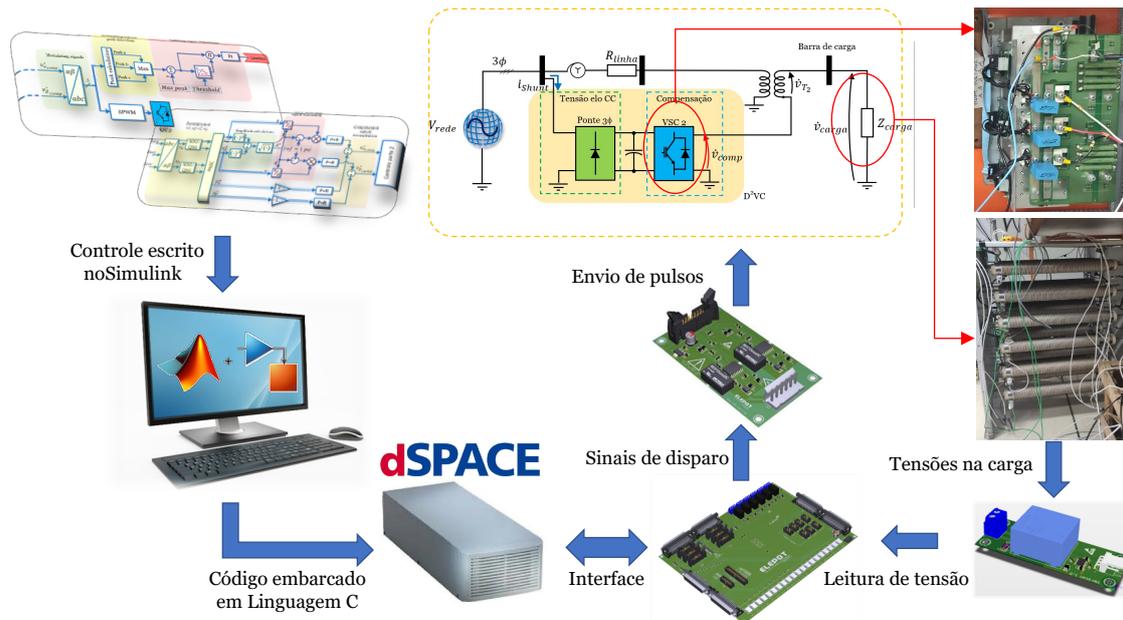


Figura 5.7: Sequência do sensoriamento e controle.

executando o algoritmo de controle embarcado, e por fim, gerando os disparos para os IGBTs do VSC₂.

Na próxima seção serão apresentados resultados experimentais obtidos durante a validação do protótipo do D²VC no laboratório.

5.3 Resultados Experimentais

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos em bancada. Por conta dos excessivos esforços computacionais ligados ao processamento de dados da versão do ControlDesk, a gravação de medições *online* é feita apenas para a verificação da tensão no elo CC antes e depois da fase de pré-carregamento. As demais gravações das tensões na bancada poderão ser realizadas do mesmo modo após uma posterior atualização da versão do ControlDesk, permitindo observação de mais grandezas elétricas simultaneamente. Por ora, a obtenção destas tensões trifásicas da bancada é feita pela captura de tela do osciloscópio digital de bancada.

As capturas dos instantes de atuação do controle são feitas com auxílio da tensão de linha antes do filtro LC da bancada, para configuração do nível de *trigger* do osciloscópio digital. Em todos os resultados a serem expostos, a captura do osciloscópio é confrontada com a simulação da barra de carga no PSCAD/EMTDC com os mesmos níveis de tensão e mesmos elementos componentes do circuito de potência do protótipo em bancada. Tal simulação baseou-se nas mesmas premissas das simulações realizadas no Capítulo 4. Validadas as simulações que representam o protótipo experimental, valida-se os resultados de simulação do Capítulo 4, no que

se refere ao controle do VSC₂.

5.3.1 Comissionamento do protótipo experimental

O primeiro ponto a se destacar quanto à inicialização do D²VC é que na versão em bancada, com retificador não-controlado, não há regulação da tensão nominal do elo. Isto posto, não há como controlar a potência ativa líquida no barramento CC do equipamento, de forma que o aumento gradativo da tensão da rede permite a entrada de potência ativa através do VSC₂, elevando a tensão no conjunto de capacitores. Portanto, conforme exposto na Figura 4.1, considerou-se a utilização de um auto-transformador na rede principal, diminuindo os níveis de tensão e mantendo o fluxo de potência através dos conversores sempre unidirecional, ou seja, sempre no sentido do elo CC para o VSC₂.

Em segunda instância, dado que o foco deste capítulo é a verificação da eficácia do VSC₂, alimenta-se o VSC₁ à montante da impedância equivalente do sistema. Deste modo, não há queda de tensão sobre a impedância equivalente do alimentador da rede. À vista disso, a preocupação da inicialização dos conversores se dá: *i*) na limitação das correntes de entrada do VSC₁ e, *ii*) no chaveamento do VSC₂ com tensão de referência nula para proporcionar um caminho de baixa impedância para a corrente de carga no secundário da rede principal.

5.3.1.1 Pré-carregamento dos capacitores

A Figura 5.8 mostra portanto o processo de pré-carregamento do elo CC por meio da resistência de pré-carga da Figura 5.4, e do *bypass* posterior, ocorrido depois do regime permanente de pré-carga ter sido alcançado ($t \approx 17.2s$). As curvas expressas na Figura 5.8 permitem a comparação da pré-carga do elo simulada no PSCAD/EMTDC e obtida da bancada por meio da gravação de medições do ControlDesk.

Observa-se que ambas as curvas apresentam tempo de subida e tempo de assentamento muito próximos. O erro em regime permanente destacado reflete pequenas diferenças entre a modelagem dos diodos no PSCAD/EMTDC que não foi realizada com os mesmos parâmetros dos diodos da bancada da ponte trifásica. Além disso, leva-se em consideração que as indutâncias de comutação da ponte trifásica apresentam pequenas diferenças entre si e o modelo simulado, com variações de 2% a 5% em relação a indutância nominal de placa. De igual modo, os resistores de descarga do elo CC na simulação foram modelados segundo informações de fábrica, não tendo sido acuradamente medidos.

Após o *bypass* da resistência de pré-carga, a tensão do elo CC simulado apresentou 308V, enquanto a do protótipo se aproximou de 311V. Os comportamentos do

modelo computacional e do experimental podem ser considerados satisfatoriamente semelhantes pois, em regime permanente, a diferença de 3V representa 0,96% de 308V.

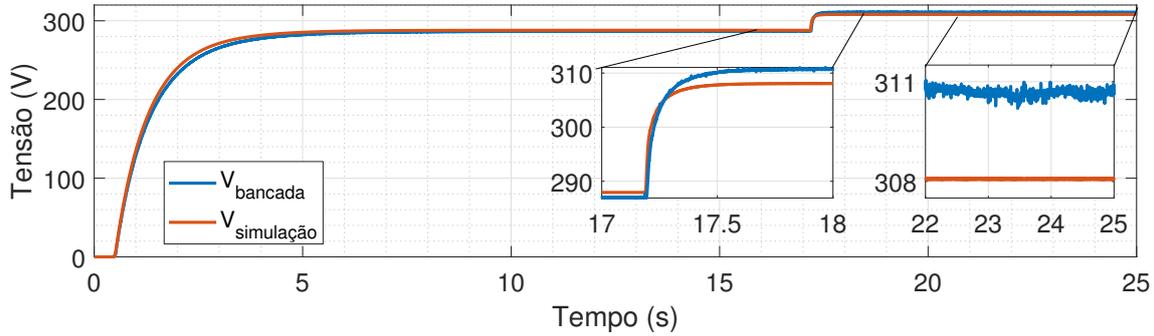


Figura 5.8: Pré-carregamento do elo CC.

5.3.1.2 Chaveamento do VSC₂

Como explanado na seção 4.2.1, a configuração em série do D²VC ocasiona um caminho de alta impedância pelo ramo capacitivo do filtro LC quando o VSC₂ encontra-se desconectado ou em estado de repouso. Assim, para que a presença do D²VC não altere o comportamento da rede principal é necessário que o VSC₂ seja acionado com tensão de referência nula em sua estratégia SPWM.

A Figura 5.9 mostra as tensões na barra de carga da bancada para os instantes em que o VSC₂ encontra-se em estado de repouso e após a liberação do chaveamento com moduladora nula. Os canais 1, 2, e 3 (azul, vermelho e verde) se referem às medições de tensão nas fases A, B e C, respectivamente.

Pela análise da Figura 5.9a percebe-se o afundamento das tensões nas fases da barra de carga para aproximadamente $7V_{pico}$ devido ao estado de repouso do VSC₂. Este comportamento se encontra de acordo com o esperado, consoante a simulação da mesma situação na Figura 5.9b, que constatou aderência aos resultados do protótipo experimental por apresentar $8V_{pico}$ de tensão. Após a liberação do chaveamento do VSC₂ com moduladora nula, a rede elétrica volta a exibir as tensões esperadas na barra de carga. Tanto na barra de carga do modelo experimental da Figura 5.9a, quanto na da simulação da Figura 5.9b houve circulação de corrente através dos braços do VSC₂. Isto possibilitou o funcionamento normal da rede elétrica em regime permanente, com erro de 2% no modelo experimental.

Cabe salientar que os valores de indutância e capacitância do filtro LC na Tabela 5.1 são oriundos dos elementos disponíveis na bancada. Neste sentido, assegurou-se de a filtragem da tensão ocorresse de forma que a conseqüente frequência de corte se encontrasse adequadamente dentro da faixa $10 \cdot \omega_0 < \omega_C < 0.5\omega_s$, sendo $\omega_C = 848Hz$, contribuindo para a atenuação do *ripple* de tensão na Figura 5.9 e

na Figura 5.10. Para verificação mais clara dos resultados posteriores, as capturas do osciloscópio foram realizadas utilizando um filtro digital de média móvel, com frequência de corte de 1kHz, sem comprometimentos na avaliação do desempenho do VSC₂. Além disso, as capturas foram feitas com amostragem em tempo equivalente com frequência de amostragem em tempo real de 400MSa/s.

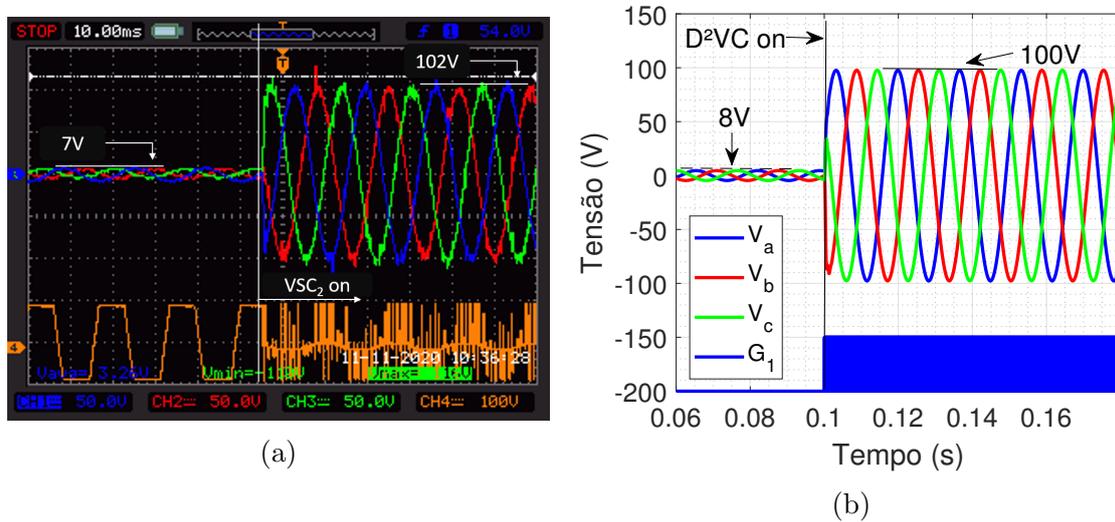


Figura 5.9: Detalhe da tensão na carga a partir do chaveamento do VSC₂ com referência nula de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.

5.3.1.3 Alteração da sequência de fases

Além da correção em magnitude e fase, o algoritmo de controle também mostrou capacidade de alterar a sequência de fases das tensões na carga. A Figura 5.10 mostra as tensões da barra de carga com sequência de fases invertida, i.e., ACB.

Antes da atuação do D²VC as tensões de pico se encontravam em torno de 0.3 pu na sequência de fases ACB. Após um pequeno período transitório de 17.2ms, as tensões passaram a seguir a referência de tensão de pico de 0.75 pu, apresentando a correta sequência de fases arbitrada, i.e., ABC.

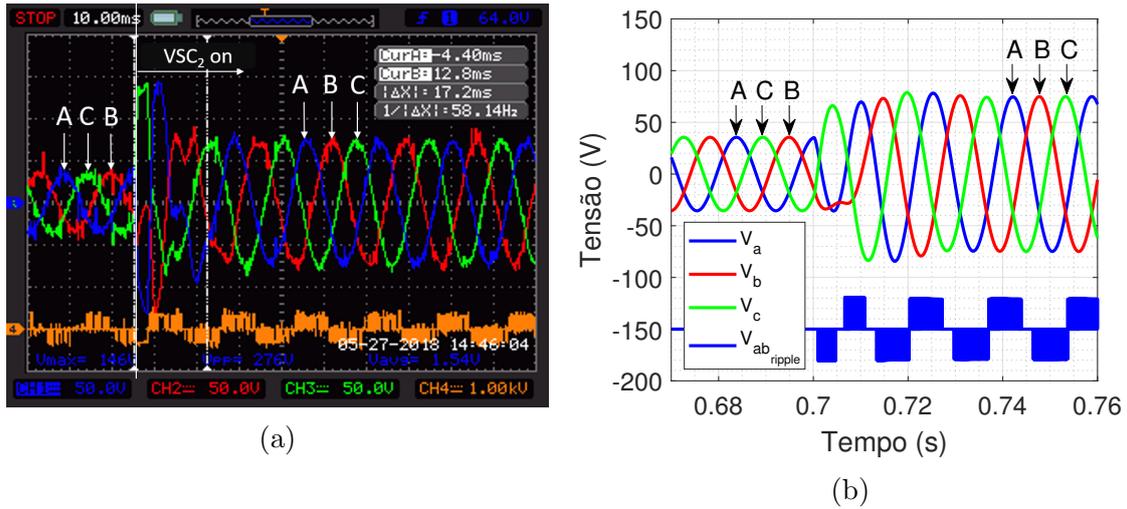


Figura 5.10: Detalhe da mudança da sequência de fases (a) Experimental e (b) Simulação.

5.4 Sintetização de tensões em série

Os experimentos realizados doravante buscam investigar a capacidade de sintetizar tensões em série com o sistema. Primeiramente será verificado o aumento e a redução das tensões da rede a vazio mediante degraus na ordem de tensão do algoritmo de controle do D²VC. Em seguida, será investigada a capacidade de mitigação das violações de tensão da barra de carga em detrimento da perturbação representada pela corrente da carga, conforme explanado no Capítulo 3.

5.4.1 Rede em vazio

5.4.1.1 Degrau positivo na referência de V^+

Na situação representada na Figura 5.11 verifica-se experimentalmente a capacidade do protótipo de realizar a soma de tensões em fase com as tensões do sistema. Com o auto-transformador variável posicionado para fornecer tensões de fase $V_{rede} = 0.4pu$, e estabelecido um degrau de $V_{ref}^+ = 0.75pu$, habilitou-se a atuação do D²VC.

A Figura 5.11a mostra o resultado da tensão na rede seguindo a tensão de referência dada ao controle durante a atuação do D²VC. As tensões após o degrau positivo de tensão corresponderam ao esperado, apresentando um pequeno desequilíbrio de tensões da ordem de 2,5%. A simulação do mesmo evento em bancada pode ser vista na Figura 5.11b, mostrando a aderência dos resultados de simulação aos experimentais.

$$FD(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} = 2,5\%. \quad (5.1)$$

onde,

$$\beta = \frac{80^4 + 77^4 + 77^4}{(80^2 + 77^2 + 77^2)^2} = 0.33.$$

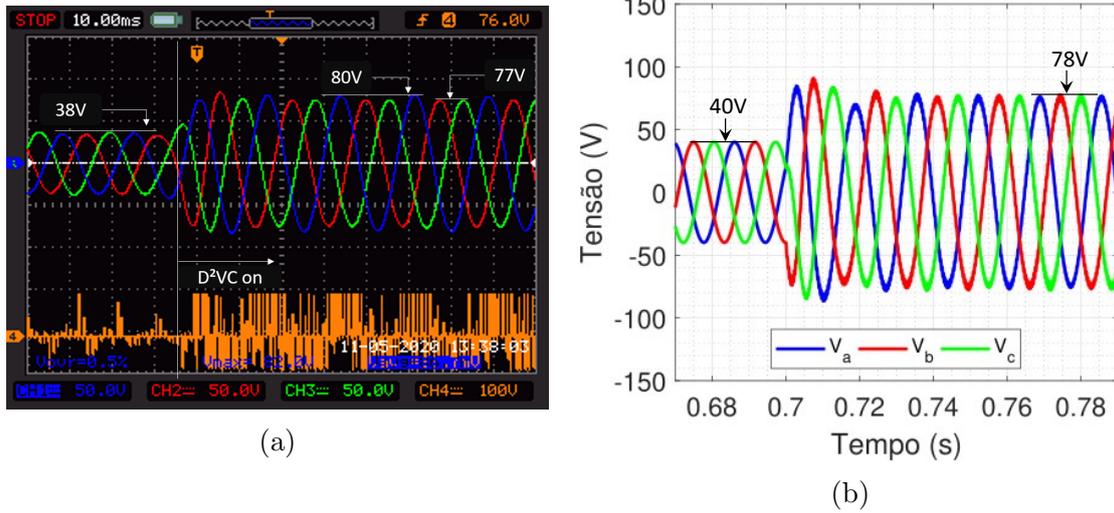


Figura 5.11: Degrau de tensão com circuito a vazio: (a) Experimental e, (b) Simulação.

5.4.1.2 Degrau negativo na referência de V⁺

Semelhantemente, buscou-se verificar na Figura 5.12 a redução das tensões da rede com o D²VC. O objetivo consistiu em validar o conceito apresentado no Capítulo 3 quanto à capacidade de sintetização de tensões em oposição de fase com as da rede. Neste sentido, configurou-se a rede para apresentar tensões $V_{rede} = 1.2pu$ e aplicar um degraú negativo de tensões na rede, estabelecendo $V_{ref}^+ = 0.8pu$.

A Figura 5.12a mostra a capacidade do D²VC gerar tensões em oposição de fase com as da rede, reduzindo-as de $120V_{pico}$ para $80V_{pico}$ dentro de um intervalo de 2 ciclos elétricos. A simulação do evento realizado em bancada, vide Figura 5.12b demonstrou a aderência entre o modelo computacional e o desenvolvido em bancada. Ambos os modelos apresentaram o mesmo valor de tensão em regime permanente dentro de um intervalo de tempo de 2 ciclos elétricos.

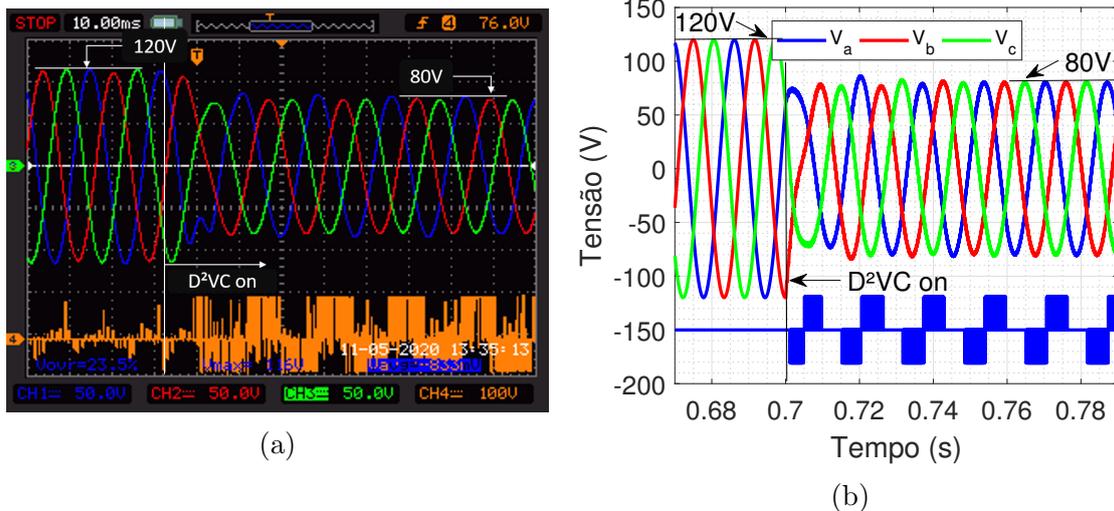


Figura 5.12: Degrau negativo de tensão com circuito a vazio: (a) Experimental e, (b) Simulação.

5.4.2 Rede com cargas equilibradas e desequilibradas

As validações de compensação de tensão em fase e em oposição de fase feitas até aqui consideraram a rede elétrica em vazio. A seguir, considera-se a conexão de um banco de resistências ao secundário dos transformadores do protótipo experimental para validar a capacidade de compensação dos desvios de tensão na rede na presença da perturbação da corrente de carga. O objetivo do experimento consiste na verificação do atendimento à ordem de tensão dada ao controle do D²VC.

Em primeira análise, a regulação da tensão é feita corrigindo o desvio da componente de sequência positiva V^+ para cargas equilibradas, em seguida regula-se a componente de sequência negativa V^- para cargas desequilibradas. Por fim, realiza-se a regulação de ambas as componentes de sequência, corrigindo tanto o afundamento quanto o desequilíbrio de tensão.

5.4.3 Carga Equilibrada

A Figura 5.13 mostra o afundamento de tensões na barra de carga com $V_{carga} = 0.3\text{pu}$ e a ordem de tensão dada ao controle é $V_{ref}^+ = 1.0\text{pu}$. A Figura 5.13a mostra as tensões na barra de carga antes e depois da atuação do D²VC. Após um pequeno sobressinal de 1.02pu , o valor de pico das tensões em regime permanente apresenta um erro de 8% com relação ao valor de referência, tendo sido considerado satisfatório segundo a faixa de tensão adequada do PRODIST para redes abaixo de 1kV . A simulação do mesmo evento pode ser vista na Figura 5.13b, com um sobressinal de 0.04pu , conforme a ampliação dos picos das tensões revela, similar ao protótipo experimental.

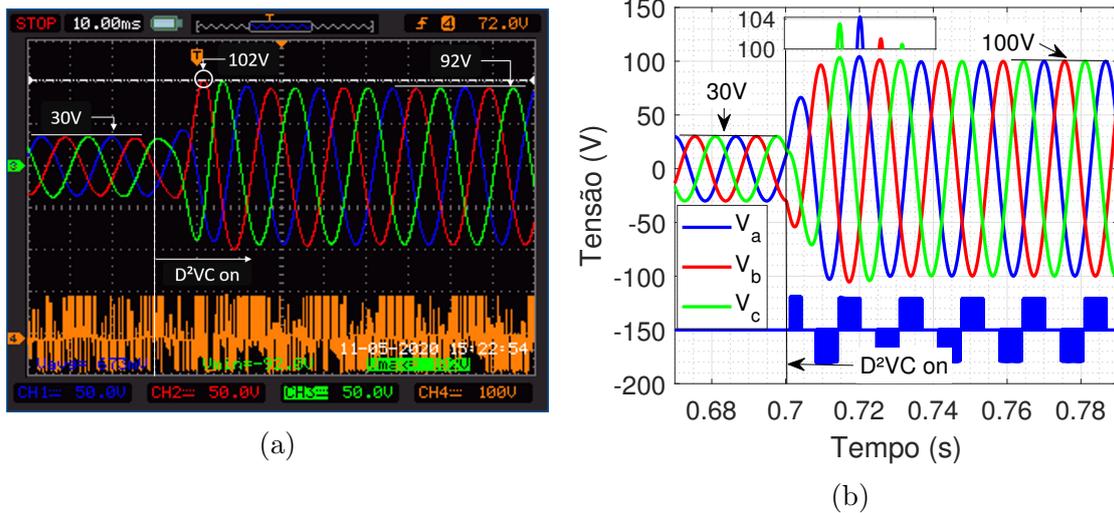


Figura 5.13: Correção do afundamento de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.

Semelhantermente, considerou-se na Figura 5.14 o caso em que as tensões na carga estão submetidas a um valor de tensão maior que a referência arbitrada. Ou seja, verifica-se a capacidade do D²VC de sintetizar tensões em oposição de fase com as da barra de carga apesar da perturbação de corrente no modelo. A Figura 5.14a demonstra experimentalmente que o D²VC foi capaz de reduzir as tensões originais de $V_{carga} = 0.7pu$ na barra de carga, atendendo a $V_{ref}^+ = 0.5pu$. O erro do valor de pico das tensões em regime permanente foi de 2% com relação a referência, sendo considerado satisfatório segundo a faixa adequada de tensões do PRODIST. Por outro lado, a simulação do mesmo evento apresentou valor de pico das tensões em regime permanente com erro desprezível, conforme se vê na Figura 5.14b.

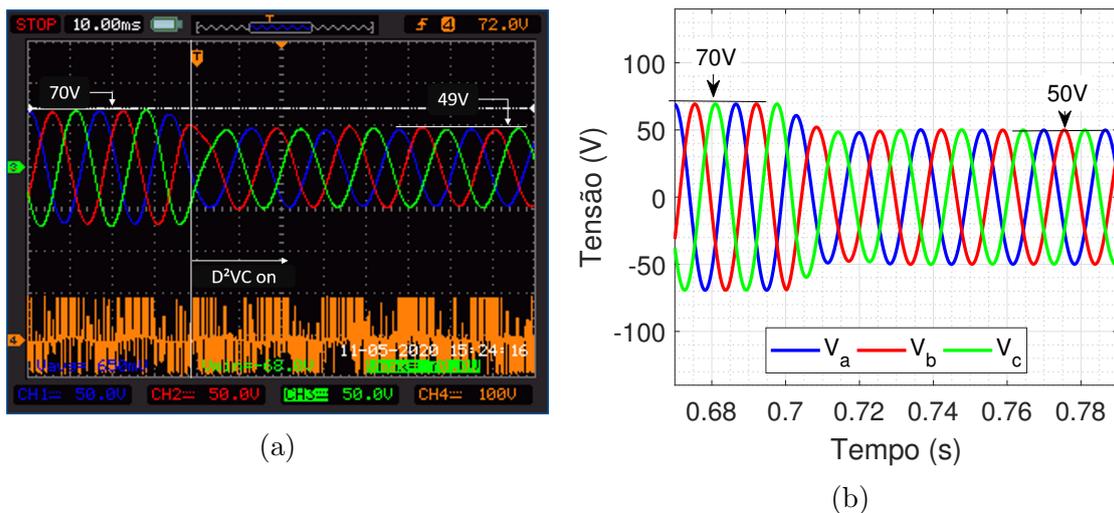


Figura 5.14: Correção da elevação de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.

5.4.4 Carga Desequilibrada

Tendo avaliado a sintetização de tensões em fase e em oposição de fase com carga, resta identificar a capacidade do protótipo experimental em produzir tensões com diferentes magnitudes e deslocamento de fase para eliminar o desequilíbrio de tensões em uma rede de distribuição. Para este fim, impõe-se o cenário desequilibrado no modelo construído a partir da alimentação de uma carga bifásica na rede, a saber, nas fases A e B e suprime-se o conteúdo de sequência negativa V^- , eliminando o desequilíbrio.

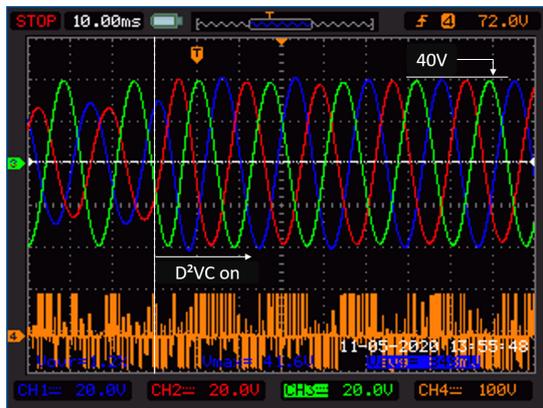
A Figura 5.15 mostra as tensões instantâneas na barra de carga $V_{carga} = 0.4\text{pu}$. O objetivo da verificação é eliminar a presença da sequência negativa de tensão do desequilíbrio de cargas após a inserção da carga bifásica.

A Figura 5.15a mostra que o atendimento à carga bifásica impõe tensões nas fases A, B e C iguais a $V_A = 32\text{V}$, $V_B = 28\text{V}$ e $V_C = 40\text{V}$, respectivamente. Tal condição leva ao surgimento de um fator de desequilíbrio dado em (5.2) igual a 22% no protótipo experimental. A imposição do desequilíbrio de tensões em bancada foi ligeiramente mais severa que a verificada em simulação, vide Figura 5.16, que apresentou um fator de desequilíbrio de aproximadamente 20%. O desequilíbrio é extinto dentro de um intervalo de tempo de 25ms no modelo computacional, enquanto que na bancada a extinção é realizada em um intervalo de 50ms.

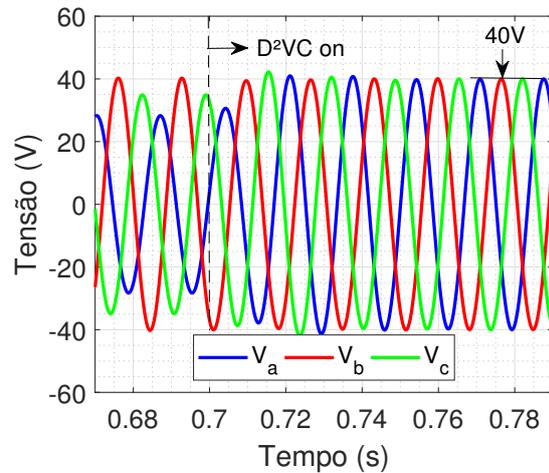
$$FD(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} = 22\%. \quad (5.2)$$

onde:

$$\beta = \frac{32^4 + 28^4 + 40^4}{(32^2 + 28^2 + 40^2)^2} = 0.36.$$



(a)



(b)

Figura 5.15: Correção do desequilíbrio de tensão: (a) Experimental e, (b) Simulação.

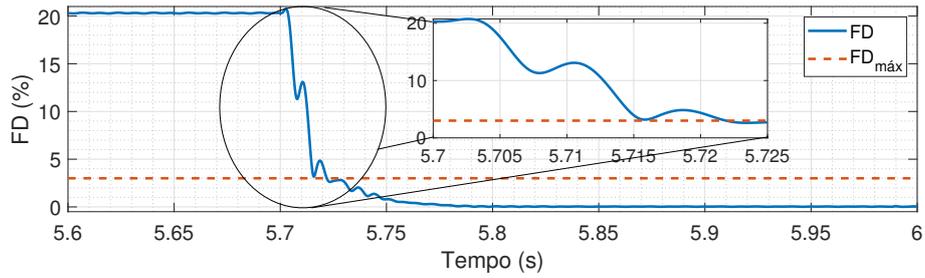


Figura 5.16: Fator de desequilíbrio simulado.

5.4.4.1 Regulação de V^+ e V^-

Tendo sido verificada a atuação do D²VC em compensar as componentes V^+ e V^- separadamente, resta constatar a capacidade de correção simultânea das duas componentes de sequência. Ainda com a fase C aberta, a Figura 5.17 exhibe este cenário de afundamento desequilibrado de tensões no sistema. A Figura 5.17a demonstra o desempenho do controle do D²VC eliminando a presença da componente de sequência negativa, e extinguindo assim o desequilíbrio de tensões. Além disso, também regula a componente de sequência positiva com referência de $100V_{pico}$. O erro do valor de pico das tensões nas três fases foi de 8% em regime permanente. A mesma situação foi simulada na Figura 5.17b, onde o erro em regime permanente foi considerado desprezível.

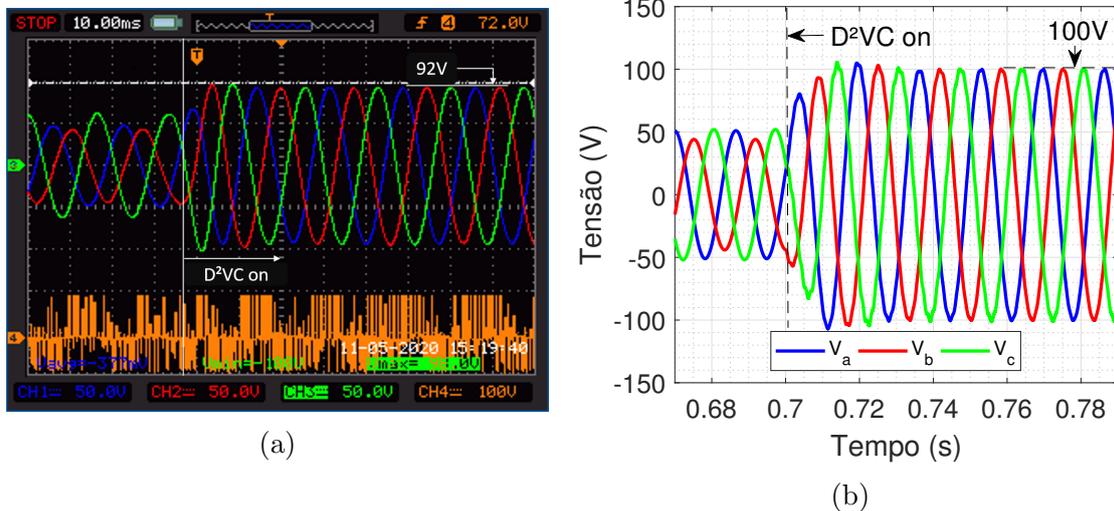


Figura 5.17: Correção do desequilíbrio de tensão afundada: (a) Experimental e, (b) Simulação.

Por fim, a mesma atuação do controle do D²VC é investigada na Figura 5.18 na situação em que existe sobre-elevação de tensão em uma ou mais fases do sistema, vide Figura 5.18a. O protótipo experimental detém uma severidade maior que o computacional ao apresentar uma sobre-elevação de 1.28pu em uma das fases.

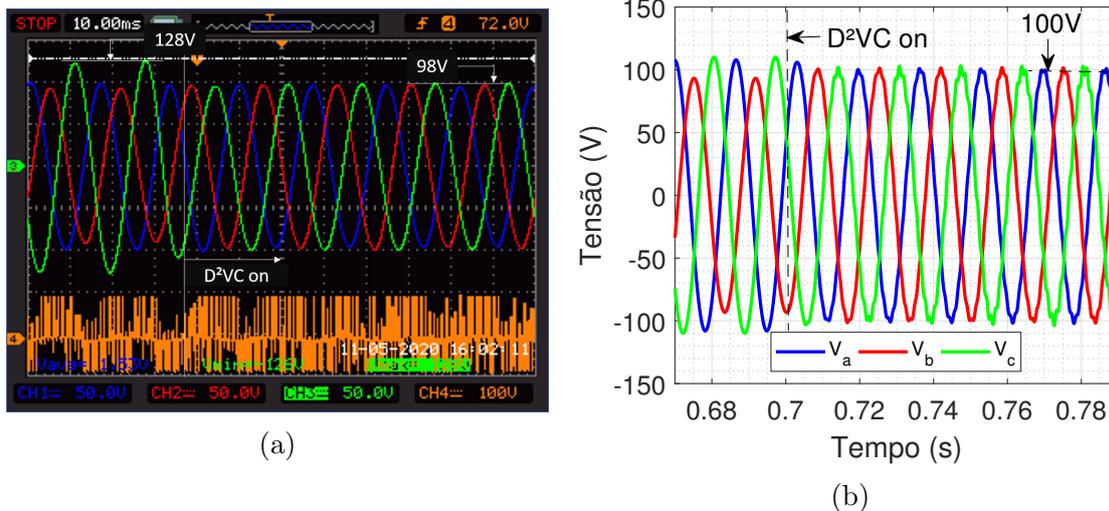


Figura 5.18: Correção do desequilíbrio de tensão sobre-elevada: (a) Experimental e, (b) Simulação.

Após a atuação do D²VC, a extinção do desequilíbrio foi alcançada juntamente com o atendimento ao valor nominal de tensão adotado no experimento. O erro do valor de pico das tensões em regime permanente foi de 2% no modelo experimental mais uma vez, sendo considerado desprezível na versão simulada. As diferenças entre o modelo experimental e o simulado podem ser explicadas devido a algumas características de bancada não levadas em conta na simulação. Uma delas é pelo fato do auto-transformador variável não ter sido modelado no ambiente computacional do PSCAD/EMTDC, e com isso, não ter sido levado em consideração a indutância que pode apresentar em bancada, assim como as interações que pode ter com o filtro LC e transformadores.

5.5 Sumário do Capítulo

A avaliação em bancada com um protótipo experimental construído em laboratório permitiu validar o sistema de controle do D²VC. Os testes envolveram o uso do *software* MATLAB/Simulink para embarcar o código do algoritmo em C na plataforma dSpace 1103, responsável pelo acionamento do D²VC. Salientou-se o motivo pelo qual a verificação experimental consistiu apenas na investigação da sintetização de tensões em série com a rede, vista a necessária readaptação do VSC₁ do protótipo de uma versão controlada a IGBTs para uma versão baseada em diodos. Desta maneira, constatou-se experimentalmente que o controle do D²VC é de fato eficaz em mitigar os afundamentos de tensão causado pela entrada de grandes blocos de carga em redes consideradas fracas e, também, em eliminar o desequilíbrio de tensões originários de cargas desequilibradas conectadas ao sistema.

Capítulo 6

Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo investigar a proposta de regulação de tensão em redes de distribuição por vias do D²VC, utilizando o controle desenvolvido no referencial $\alpha\beta$ com controladores P+R. Pelas simulações, constatou-se na seção 4.2.1.1 que o chaveamento com referência nula adotado do VSC₂ não trouxe impactos no perfil de tensão da barra de carga, devido unicamente à ação conjunta dos dois VSCs. Assim, considerou-se satisfatória a inicialização do D²VC carregando o elo CC e compensando o afundamento de tensão no sistema, preparando-o para a conexão de cargas.

Na sequência, comprova-se a efetividade do D²VC para os cenários equilibrado e desequilibrado, e foi mostrada a capacidade de regulação das componentes de sequência na seção 4.2.4. A seção 4.3 corrobora o funcionamento satisfatório do equipamento a partir do atendimento aos requisitos regulatórios de tensão adequada no sistema, dados pela ANEEL, mesmo após submetê-lo a manobras tais como a conexão, aumento e alívio de cargas. Além disso, o objetivo de buscar equilíbrio de tensões na rede também foi alcançado mediante a ação do D²VC, mesmo que diante das mesmas manobras de carga mencionadas, inclusive a abertura de uma das fases. A avaliação da efetividade desta característica foi satisfatória, considerando o consequente fator de desequilíbrio abaixo do limiar máximo regulatório.

Ademais, a validação experimental em bancada na seção 5.3 também apresentou resultados satisfatórios, reservando a avaliação do controle apenas à verificação da sintetização de tensões em série com a rede. Assim, atesta-se a efetividade da proposta no: *i*) atendimento às ordens de tensão dadas ao controle, para os cenários equilibrados, e *ii*) à redução do fator de desequilíbrio FD, para os cenários desequilibrados de tensão. Os resultados experimentais obtidos satisfizeram os objetivos traçados, controlando a tensão na barra de carga para valores maiores e menores que o valor nominal arbitrado, e mantendo um perfil equilibrado de tensões, mesmo atendendo a cargas desequilibradas. Adicionalmente, assegurou-se que o controle não contribuisse com harmônicos na barra de carga graças à lógica limitadora dos sinais

modulantes do acionamento SPWM do VSC₂, protegendo-o também para o caso em que houvesse um carregamento severo na rede ou defeito que viesse demandá-lo além de sua potência nominal.

Em suma, comprovou-se neste trabalho de pesquisa a efetividade do uso do D²VC como um CDT em redes de distribuição em simulações e em ensaios experimentais. Destaca-se como um ponto contributivo do algoritmo o fato de oferecer uma alternativa aos controles clássicos de VSCs dependentes de circuitos dedicados ao sincronismo com a rede. Esta característica foi atestada, dado o desenvolvimento nos eixos estacionários $\alpha\beta$, cuja transformação envolve cálculos puramente algébricos. Desta maneira, a sincronização das tensões produzidas pelo VSC₂ foi obtida de forma direta, dispensando o uso de PLLs, sem dinâmicas de rastreamento angular e suas influências no desempenho do controle. O potencial do D²VC como controlador direto de tensão cresce por ter tido eficácia comprovada neste trabalho, carecendo ainda de estudos ligados a aspectos econômicos para justificar a aplicabilidade na rede em substituição aos demais equipamentos baseados no CDT.

6.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Como primeira proposta de trabalhos futuros dentro do tema, prevê-se a substituição do retificador que fornece a tensão no elo CC do protótipo experimental pelo conversor VSC₁. Esta proposta daria a possibilidade de verificação experimental do controle do VSC₁ em garantir controle de tensão CC para o *back-to-back*, além de possibilitar a extensão da capacidade de sintetização de tensões em série por parte do VSC₂.

Em segunda instância, sugere-se a instalação do D²VC em sistemas a 4 fios, e a consequente consideração da componente de sequência zero da tensão da rede. Esta característica pode acarretar na consideração de algum tipo de esquema de balanceamento da tensão nos capacitores em *split* do elo CC a ser previsto no controle do VSC₁, porém, tornaria a proposta do D²VC mais abrangente e genérica, aplicável a todos os tipos de rede, envolvendo as demais configurações possíveis de bancos de transformadores também (Δ , Y e suas associações).

Considera-se ainda, em terceiro lugar, a busca por uma metodologia de cálculo dos parâmetros dos controladores P+R do algoritmo, objetivando a investigação por parâmetros que conduzam a melhorias no desempenho dinâmico do controle, no que tange a sobrepasso, e tempo de assentamento da tensão controlada.

Considera-se também, em quarto lugar, a comparar as diferenças do controle em $\alpha\beta$ com relação a um controle tradicionalmente desenvolvido em dq , que envolveria um tipo de PLL. Tal comparação teria por objetivo avaliar a real vantagem em dispensar o PLL do controle do VSC e em que grau essa vantagem justificaria tal

dispensa.

E por fim, sugere-se a investigação da capacidade de proteção da rede com o D²VC analisando o cumprimento dos requisitos de *Low-Voltage Ride Through* e altas correntes. O atendimento desta característica poderia garantir atendimento às cargas em casos de ocorrências de falta, atuação de esquemas de proteção da rede e eventuais aberturas temporárias de fase da rede, aumentando a confiabilidade da rede.

Referências Bibliográficas

- [1] MONTICELLI, A. J. “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”. 1983.
- [2] RAHMAN, M. M., AREFI, A., SHAFIULLAH, G. M., et al. “A new approach to voltage management in unbalanced low voltage networks using demand response and OLTC considering consumer preference”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 99, n. December 2017, pp. 11–27, 2018. ISSN: 01420615. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.12.034.
- [3] DRIESEN, J., CRAENENBROECK, T. V. “Voltage Disturbances, Introduction to Unbalance”, *Power Quality Application Guide*, 2002.
- [4] KIANI, M., LEE, W.-J. “Effects of Voltage Unbalance and System Harmonics on the”, *Control*, v. 46, n. May, pp. 562–568, 2009.
- [5] OLIVEIRA, R. A. N. D. *Compensação de Desequilíbrios em Redes Trifásicas a Quatro Fios Utilizando Dispositivos Híbridos*. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, 2017.
- [6] AGARWAL, K. C. *Industrial Power Engineering Handbook*. Newnes, 2001. ISBN: 978-0750673518.
- [7] REVUELTA, P. S., LITRÁN, S. P., THOMAS, J. P. *Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality*. 2015. ISBN: 9780128032176. doi: 10.1016/C2014-0-02915-2.
- [8] PRODIST, M. . “Prodíst, Módulo 8”, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, v. 8, pp. 88, 2018.
- [9] SHAHNIA, F., WOLFS, P. J., GHOSH, A. “Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 3, pp. 1318–1327, 2014. ISSN: 19493053. doi: 10.1109/TSG.2014.2305752.

- [10] SHAHNIA, F., WOLFS, P., GHOSH, A. “Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013. ISSN: 19449925. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672798.
- [11] KERSTING, W. H. *Distribution System Modeling and Analysis*, v. №3. 2013. ISBN: 9781498772143.
- [12] GWISDORF, B., BORCHARD, T., HAMMERSCHMIDT, T., et al. “Technical and economic evaluation of voltage regulation strategies for distribution grids with a high amount of fluctuating dispersed generation units”, *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, CITRES 2010*, pp. 8–14, 2010. doi: 10.1109/CITRES.2010.5619841.
- [13] MOHAMED, Y. A. R. I. “Mitigation of dynamic, unbalanced, and harmonic voltage disturbances using grid-connected inverters with LCL filter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 9, pp. 3914–3924, 2011. ISSN: 02780046. doi: 10.1109/TIE.2010.2098372.
- [14] TAKAHASHI, N., HAYASHI, Y. “Centralized voltage control method using plural D-STATCOM with controllable dead band in distribution system with renewable energy”, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, pp. 3–4, 2012. doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465827.
- [15] LI, K., LIU, J., WANG, Z., et al. “Strategies and Operating Point Optimization of STATCOM Control for Voltage Unbalance Mitigation in Three-Phase Three-Wire Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, pp. 413–422, jan 2007. ISSN: 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2006.876655.
- [16] CHAMUNDESWARI, K., RAJU, Y. B. “Adaptive fuzzy control strategy of STATCOM for the regulation of voltage”, *Proceedings - 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT 2017*, pp. 309–313, 2018. doi: 10.1109/CSNT.2017.8418557.
- [17] BOZALAKOV, D. V., LAVEYNE, J., DESMET, J., et al. “Overvoltage and voltage unbalance mitigation in areas with high penetration of renewable energy resources by using the modified three-phase damping control strategy”, *Electric Power Systems Research*, v. 168, n. April 2018, pp. 283–294, 2019. ISSN: 03787796. doi: 10.1016/j.epsr.2018.12.001.

- [18] BLAŽIČ, B., PAPIČ, I. “Voltage profile support in distribution networks - Influence of the network R/X ratio”, *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008*, pp. 2510–2515, 2008. doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635641.
- [19] LIMA, S. L., DIAS, R. F., WATANABE, E. H. “Direct voltage control in grids with intermittent sources using UPFC”, *2013 Brazilian Power Electronics Conference, COBEP 2013 - Proceedings*, pp. 974–980, 2013. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785233.
- [20] LIMA, S. L., DIAS, R. F., WATANABE, E. H. “Indirect Voltage Control (IVC) versus Direct Voltage Control (DVC) in distribution grids with renewable energy sources”, *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2017*, , n. Ivc, pp. 1–6, 2017. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972514.
- [21] MELONI, L. F., REZEK, Â. J., RIBEIRO, Ê. R. “Small-signal modeling of a single-phase DVR for voltage sag mitigation”, *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, v. 2016-Decem, pp. 55–59, 2016. ISSN: 21640610. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783449.
- [22] ITAL, A. V., BORAKHADE, S. A. “Compensation of voltage sags and swells by using Dynamic Voltage Restorer (DVR)”. In: *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, pp. 1515–1519. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., nov 2016. ISBN: 9781467399395. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754936.
- [23] MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition*. 2007. ISBN: 9780511544828. doi: 10.1017/CBO9780511544828.039.
- [24] BARCELOS, S. L. D. S. L. *UPFC Para Controle de Tensão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [25] GYUGYI, L., SCHAUDER, C. D., WILLIAMS, S. L., et al. “The unified power flow controller: a new approach to power transmission control”, v. 10, n. 2, pp. 1085–1097, 1995.
- [26] BARCELOS, S. L. S. L., DIAS, R. F. S., ABRANTES-FERREIRA, A. J. G., et al. “Dynamic Direct Voltage Controller (D²VC) for grids with intermittent sources”, *Electric Power Systems Research*, v. 182, n. October 2018, pp. 106225, 2020. ISSN: 0378-7796. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106225.

- [27] MACEDO, E. O., DIAS, R. F. S., WATANABE, E. H., et al. “Unbalanced Voltage Mitigation using D 2 VC with Proportional Resonant Controller in $\alpha\beta$ -Frame”, *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6, 2020. doi: 10.1109/cobep/spec44138.2019.9065559.
- [28] GRAINGER, J. J., STEVENSON, W. D. *Power system analysis*. McGraw-Hill Education, 2003. ISBN: 9781420037043. doi: 10.1201/9781420037043.
- [29] LLANO, E. M. *Voltage Unbalance Compensation in the Distribution Grid through Distributed Generation*. 2015. ISBN: 9788792846563.
- [30] KUNDUR, PRABHA AND BALU, NEAL J AND LAUBY, M. G. *Power System Stability And Control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [31] NEXANS. “Catálogo Alumínio - Condutores Nus”. 2013. Disponível em: <http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt{ }BR/fileLibrary/Download{ }540134436/Brazil/files/catalogonus{ }maio2013.pdf>.
- [32] GAMBÔA, L. C. “Conversores De Tensao Sem Intercomunicação Rápida Conectados Em Microrredes Desbalanceadas.” 2015.
- [33] LEE, D. W., AHN, S. J., MOON, S. I. “A study on coordinated control of UPFC and voltage compensators using voltage sensitivity”, *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES*, pp. 1–6, 2008. doi: 10.1109/PES.2008.4596720.
- [34] AKAGI, H., WATANABE, E. H., AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., feb 2017. ISBN: 9781119307181. doi: 10.1002/9781119307181.
- [35] ATENCIA, C. T. Z. *Análise Do Desempenho Do Statcom Com Estratégia De Controle Para Operação Em Regime Permanente E Transitório*. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 1981.
- [36] PERERA, D. *Contributions to the understanding of harmonics, flicker and voltage unbalance management in future electricity distribution networks*. Tese de Doutorado, 2014.
- [37] TEODORESCU, REMUS ; LISERRE, MARCO; RODRÍGUEZ, P. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Systems*. 2011. ISBN: 97080470667040.

- [38] CIPCIGAN, L. M., TAYLOR, P. C. “Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation”, *IET Renewable Power Generation*, v. 1, n. 3, pp. 160–166, 2007. ISSN: 17521416. doi: 10.1049/iet-rpg:20070011.
- [39] THOMSON, M. “Automatic-voltage-control relays and embedded generation part 1”, *Power Engineering Journal*, v. 14, n. 3, pp. 93–99, 2000. ISSN: 09503366. doi: 10.1049/pe:20000301.
- [40] BOONCHIAM, P., MITHULANANTHAN, N. “Dynamic control strategy in medium voltage DVR for mitigating voltage sags/swells”, *2006 International Conference on Power System Technology, POWERCON2006*, pp. 0–4, 2007. doi: 10.1109/ICPST.2006.321898.
- [41] MOHAMMED, S. A., CERRADA, A. G., HASANIN, B. “Dynamic Voltage Restorer (DVR) System for Compensation of Voltage Sags , State-of-the-Art Review”, *International Journal Of Computational Engineering Research (ijceronline.com)*, v. 3, n. 1, pp. 177–183, 2013.
- [42] JAYALAKSHMI, V., GUNASEKAR, N. O. “Implementation of discrete PWM control scheme on Dynamic Voltage Restorer for the mitigation of voltage sag /swell”, *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2013*, pp. 1036–1040, 2013. doi: 10.1109/ICEETS.2013.6533529.
- [43] NIELSEN, J. G., BLAABJERG, F. “A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, pp. 1272–1280, 2005. ISSN: 00939994. doi: 10.1109/TIA.2005.855045.
- [44] FERNANDES, R. M. *Condicionador Universal de Energia (UPQC) com Estratégia de Controle Invertida*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [45] FILHO, I. C. R. D. A. “Estudos e Implementações de Topologias de Restauradores Dinâmicos de Tensão”, *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 01, n. 01, pp. 1689–1699, 2013. ISSN: 1098-6596.
- [46] DA SILVA, T. V. *Uma proposta para o controle eletrônico de reguladores eletromagnéticos através do reforço série de tensão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

- [47] NED MOHAN, TORE M. UNDELAND, W. P. R. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition*. John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 9780511544828. doi: 10.1017/CBO9780511544828.039.
- [48] PANUMAT SANPOUNG, P. B., PLANGKLANG, B. “Analysis and control of UPFC for voltage compensation using ATP/EMTP”, *Asian Journal on Energy and Environment*, v. 10, n. 04, pp. 241–249, 2009.
- [49] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice hall.
- [50] DE SOUZA, I. D., DE ALMEIDA, P. M., BARBOSA, P. G., et al. “Digital single voltage loop control of a VSI with LC output filter”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, v. 16, pp. 145–155, 2018. ISSN: 23524677. doi: 10.1016/j.segan.2018.07.004.
- [51] LOH, P. C., NEWMAN, M. J., ZMOOD, D. N., et al. “A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 5, pp. 1176–1185, 2003. ISSN: 08858993. doi: 10.1109/TPEL.2003.816199.
- [52] LI, S., WANG, X., YAO, Z., et al. “Circulating current suppressing strategy for MMC-HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 30, n. 1, pp. 387–397, 2015. ISSN: 08858993. doi: 10.1109/TPEL.2014.2329059.
- [53] HART, D. W. *Power Electronics*. McGraw-Hill Education, 2011. ISBN: 9780073380674.
- [54] BARBI, I., ESTOFANERO, H., HAUSMANN, R., et al. “Projeto de Inversores Monofásicos”, p. 107, 2007.
- [55] AHMED, K. H., FINNEY, S. J., WILLIAMS, B. W. “Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation”, *5th International Conference-Workshop Compatibility in Power Electronics, CPE 2007*, v. XIII, n. 2, pp. 49–58, 2007. doi: 10.1109/CPE.2007.4296511.
- [56] BERES, R. N., WANG, X., BLAABJERG, F., et al. “Optimal design of high-order passive-damped filters for grid-connected applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 3, pp. 2083–2098, 2016. ISSN: 08858993. doi: 10.1109/TPEL.2015.2441299.

Apêndice A

Critérios de Projeto do Filtro LC

A.1 Especificação da indutância

De acordo com as especificações da Tabela 4.3, considera-se que durante um período de tempo t_1 a tensão sobre um indutor seja definida por (A.1), enquanto que durante t_2 seja dada por (A.2), conforme ilustrado na Figura A.1 [54–56].

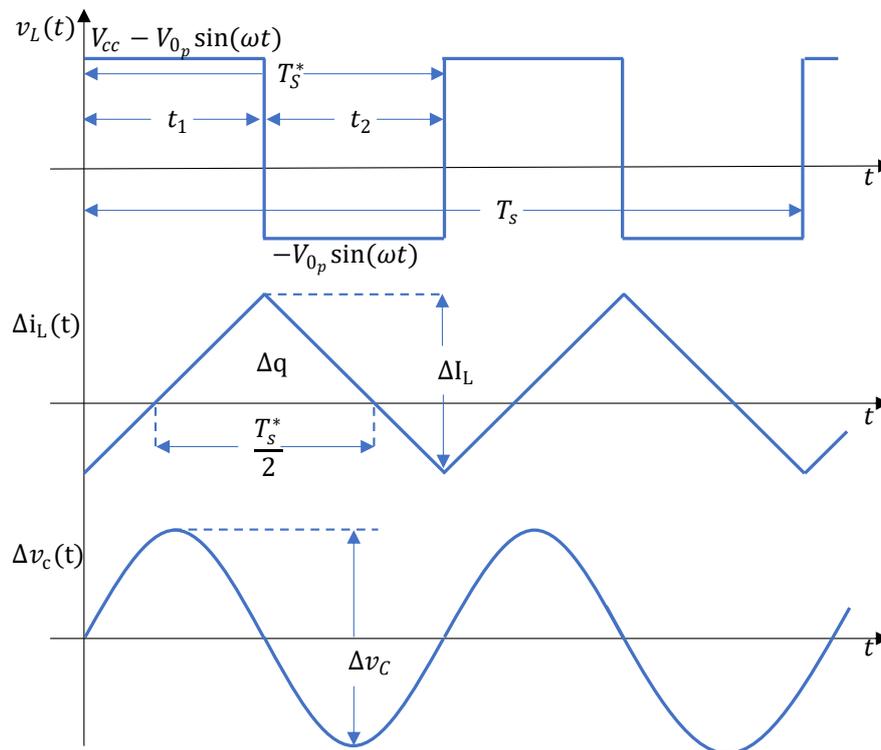


Figura A.1: Formas de onda consideradas no indutor e no capacitor do filtro LC.

Note que durante o intervalo t_1 a tensão sobre o indutor é descrita por (A.1), enquanto no intervalo t_2 é descrita por (A.2):

$$L_f \frac{di_{L_f}(t)}{dt} = V_{cc} - \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t). \quad (\text{A.1})$$

$$L_f \frac{di_{L_f}(t)}{dt} = -\sqrt{2}V_0 \sin(\omega t). \quad (\text{A.2})$$

Admitindo que as derivadas da corrente possam ser aproximadas para Δi_{L_f} durante os intervalos de tempo t_1 e t_2 , pode-se reescrever as equações (A.1) e (A.2) obtendo as equações (A.3) e (A.4), respectivamente:

$$L_f \frac{\Delta i_{L_f}(t)}{\Delta t_1} = V_{cc} - \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t). \quad (\text{A.3})$$

$$L_f \frac{\Delta i_{L_f}(t)}{\Delta t_2} = -\sqrt{2}V_0 \sin(\omega t). \quad (\text{A.4})$$

Assim, pode-se explicitar os intervalos Δt_1 e Δt_2 em (A.5) e (A.6), respectivamente:

$$\Delta t_1 = \frac{L_f \Delta i_{L_f}(t)}{V_{cc} - \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t)}. \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta t_2 = -\frac{L_f \Delta i_{L_f}(t)}{\sqrt{2}V_0 \sin(\omega t)}. \quad (\text{A.6})$$

Uma vez que o período da tensão T_s^* de saída é composta por $\Delta t_1 + \Delta t_2$, e considerando que T_s^* corresponde à metade do período de comutação T_s , tem-se que:

$$\frac{T_s}{2} = \frac{L_f \Delta i_{L_f}(t)}{V_{cc} - \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t)} - \frac{L_f \Delta i_{L_f}(t)}{\sqrt{2}V_0 \sin(\omega t)}. \quad (\text{A.7})$$

Explicitando a ondulação de corrente no indutor, e escrevendo $V_{0_p} = \sqrt{2}V_0$, vem que:

$$\Delta i_{L_f}(t) = \frac{V_{cc}V_{0_p} \sin(\omega t) - V_{0_p}^2 \sin^2(\omega t)}{2f_s L_f V_{cc}}. \quad (\text{A.8})$$

Normaliza-se a ondulação de corrente em (A.9):

$$\overline{\Delta i_{L_f}(t)} = \frac{2L_f \Delta i_{L_f}(t)}{T_s V_{cc}} = \frac{V_{0_p}}{V_{cc}} \left(\sin(\omega t) - \frac{V_{0_p} \sin^2(\omega t)}{V_{cc}} \right). \quad (\text{A.9})$$

Derivando-se a expressão (A.9) e igualando-a a zero, obtém-se:

$$\frac{d\overline{\Delta i_{L_f}}}{d\omega t} = -\cos(\omega t) - \frac{2V_{0_p} \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{V_{cc}} = 0. \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{d\overline{\Delta i_{L_f}}}{d\omega t} = \begin{cases} \frac{1}{4}, & \text{se } V_{0_p} \leq 0.5V_{cc}. \\ \frac{V_{0_p}}{V_{cc}} \left(1 - \frac{V_{0_p}}{V_{cc}} \right), & \text{se } V_{0_p} > 0.5V_{cc}. \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

Aproximando a derivada de (A.11) a Δi_{L_f} , encontra-se a ondulação da corrente do indutor em (A.12):

$$\Delta i_{L_f} = \begin{cases} \frac{V_{cc}}{8f_s L_f}, & \text{se } V_{0_p} \leq 0.5V_{cc}. \\ \frac{V_{0_p}}{2f_s L_f} \left(1 - \frac{V_{0_p}}{V_{cc}}\right), & \text{se } V_{0_p} > 0.5V_{cc}. \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Evidenciando em (A.13) a indutância L_f do filtro:

$$L_f = \begin{cases} \frac{V_{cc}}{8f_s \Delta i_{L_f}}, & \text{se } V_{0_p} \leq 0.5V_{cc}. \\ \frac{V_{0_p}}{2f_s \Delta i_{L_f}} \left(1 - \frac{V_{0_p}}{V_{cc}}\right), & \text{se } V_{0_p} > 0.5V_{cc}. \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

Substituindo em (A.13) os valores de V_{cc} , f_s e Δi_{L_f} para o primeiro caso, especifica-se a indutância do filtro:

$$L_f = \frac{320}{8 \cdot 12000 \cdot 28.92} = 0.115mH. \quad (\text{A.14})$$

A.2 Especificação da Capacitância

Define-se os capacitores do filtro LC segundo a máxima ondulação permissível da tensão de compensação do D²VC, que também está relacionada com a máxima ondulação permissível de corrente no indutor do filtro. Entende-se que apenas a componente da tensão na frequência fundamental surja nos terminais do filtro LC, sendo filtradas pelo capacitor todas as demais componentes de alta frequência. Deste modo, pode-se calcular a ondulação de tensão imposta ao capacitor analisando a variação de carga acumulada, segundo (A.15):

$$\Delta q = C_f \Delta v_{C_f}. \quad (\text{A.15})$$

Sendo $q = 1/2 \cdot i \cdot t$, vem que:

$$\Delta q = \frac{1}{2} \frac{\Delta i_{L_f}}{2} \frac{T_s^*}{2} = \frac{\Delta i_{L_f} T_s^*}{8}. \quad (\text{A.16})$$

Substituindo (A.16) em (A.15):

$$\frac{\Delta i_{L_f}}{8f_s^*} = C_f \cdot \Delta v_{C_f} \therefore \Delta v_{C_f} = \frac{\Delta i_{L_f}}{16f_s C_f}. \quad (\text{A.17})$$

$$\Delta v_{C_f} = \begin{cases} \frac{1}{128} \frac{V_{cc}}{f_s^2 L_f C_f}, & \text{se } V_{0_p} \leq 0.5V_{cc}. \\ \frac{1}{16} \frac{V_{0_p}}{f_s^2 L_f C_f} \left(1 - \frac{V_{0_p}}{V_{cc}}\right), & \text{se } V_{0_p} > 0.5V_{cc}. \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

Explicitando o valor da capacitância em (A.19):

$$C_f = \begin{cases} \frac{1}{128} \frac{V_{cc}}{f_s^2 L_f \Delta v_{C_f}}, & \text{se } V_{0p} \leq 0.5V_{cc}. \\ \frac{1}{16} \frac{V_{0p}}{f_s^2 L_f \Delta v_{C_f}} \left(1 - \frac{V_{0p}}{V_{cc}}\right), & \text{se } V_{0p} > 0.5V_{cc}. \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Substituindo em (A.19) os valores de V_{cc} , L_f e Δv_{C_f} para o o primeiro caso, especifica-se a capacitância do filtro:

$$C_f = \frac{1}{128} \frac{320}{12000^2 \cdot 0.115 \cdot 10^{-3} \cdot 3.11} = 48.42 \mu F. \quad (\text{A.20})$$

A implementação dos valores encontrados em (A.14) e (A.20) para L_f e C_f do filtro LC leva à filtragem das componentes de alta frequência da tensão de linha do VSC_2 , como se vê na Figura A.2, permitindo passagem apenas da componente fundamental. Percebe-se também que a componente fundamental da tensão não apresentou atenuações ou deslocamentos de fase, conforme esperado pelo diagrama de Bode da Figura A.3.

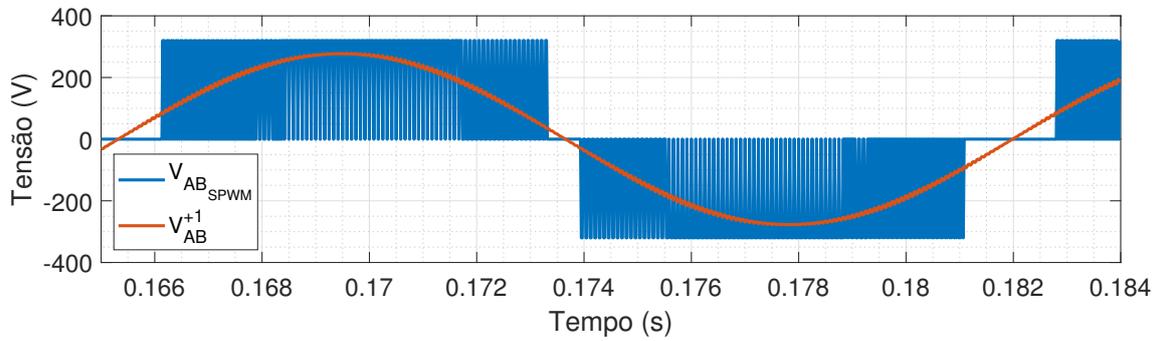


Figura A.2: Tensão de linha chaveada e sua componente fundamental.

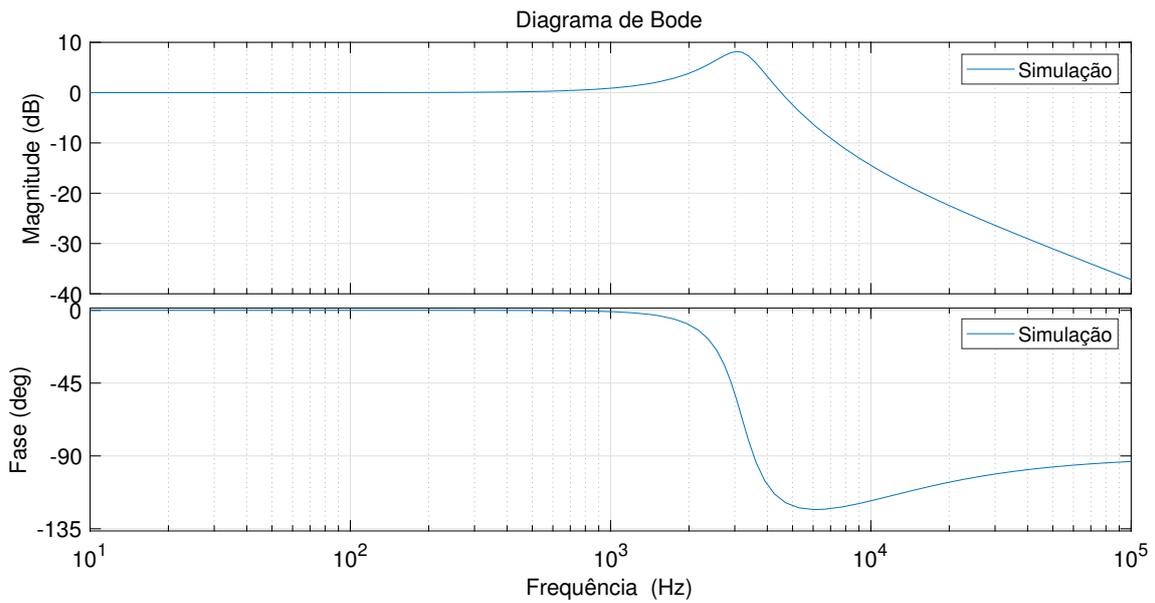


Figura A.3: Diagrama de Bode da tensão de saída.

Em relação às correntes envolvidas no filtro LC, constata-se que o projeto foi atendido do ponto de vista da ondulação observada da corrente no indutor, como se vê na Figura A.4a. O conteúdo de alta frequência é filtrado pelo capacitor, como percebido na Figura A.4b, restando apenas a componente de frequência fundamental da corrente de saída.

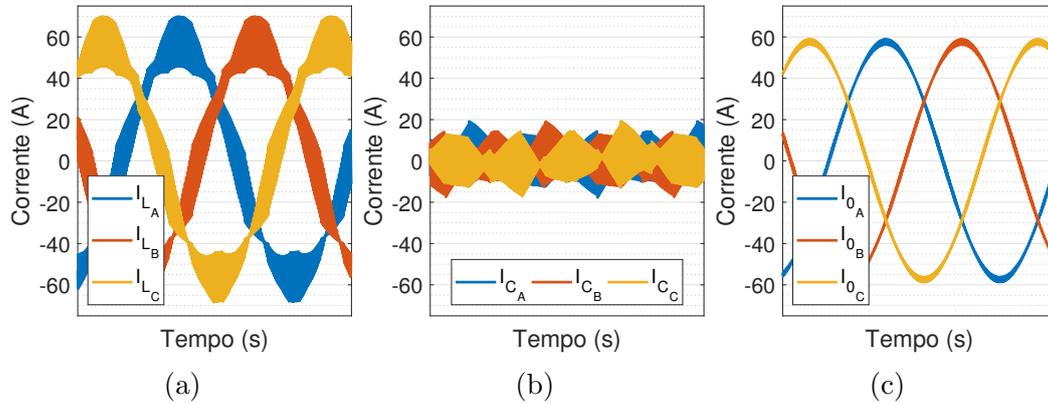


Figura A.4: Corrente: (a) no indutor, (b) no capacitor e, (c) na saída do filtro LC.

Nota-se o atendimento ao critério estabelecido para o filtro quanto à ondulação de corrente na Figura A.5, cuja variação se encontra dentro do especificado, i.e., 28.92A. A frequência de corte se encontra em $\omega_C = 2.131kHz$, o que se adequa ao intervalo de $10 \cdot \omega_0 \leq \omega_C \leq \omega_s/2$. Em conclusão, constata-se atendimento também do $THD_V = 4,85\%$ e $THD_I = 4,86\%$, atendendo aos limites máximos estipulados pelo PRODIST e pela norma IEEE 1547, vide Tabela 4.3.

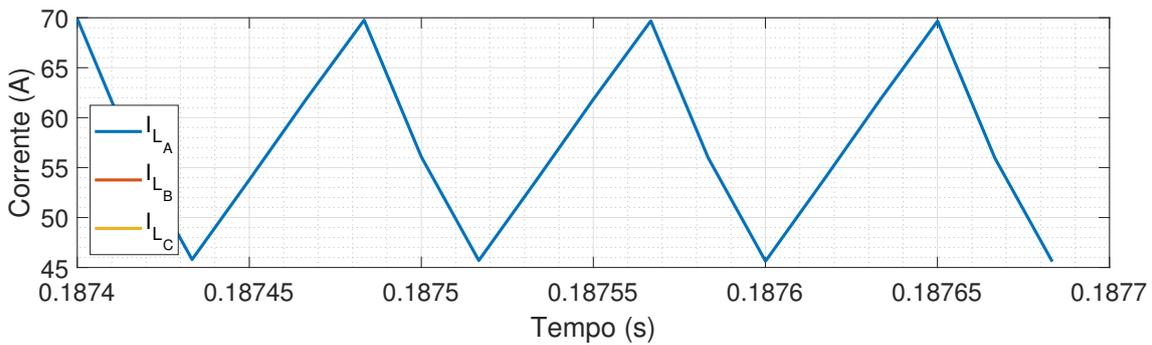


Figura A.5: Detalhe da ondulação de corrente no indutor.

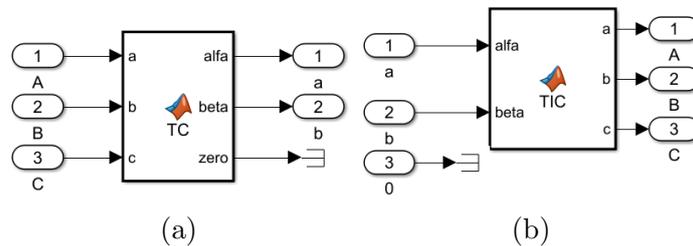
Apêndice B

Diagrama de blocos do Simulink

Este capítulo se motiva ao detalhamento dos blocos utilizados na escrita do algoritmo no Simulink, para tradução à linguagem C.

B.1 Transformações

As transformações de referenciais foram implementadas por meio de uma função de MATLAB, escritas como se seguem:



```
Editor - Block: D2VC8/Transformada de Clarke/MATLAB Function5
```

EDITOR	VIEW
<pre>1 function [alfa,beta,zero] = TC(a,b,c) 2 alfa=2/3*(a-.5*b-.5*c); 3 beta=2/3*(sqrt(3)/2*b-sqrt(3)/2*c); 4 zero=2/3*(.5*a+.5*b+.5*c);</pre>	<pre>1 function [a,b,c] = TIC (alfa,beta) 2 a=alfa; 3 b=-.5*alfa+sqrt(3)/2*beta; 4 c=-.5*alfa-sqrt(3)/2*beta;</pre>

(c)

Figura B.1: Transformação de referenciais: (a) Transformação de Clarke, (b) Transformação Inversa de Clarke e (c) equações escritas em forma de função.

B.2 Controlador P+R

O controlador proporcional+ressonante do algoritmo de controle do D²VC utiliza o modelo não ideal, e encontra-se ilustrado na Figura B.2.

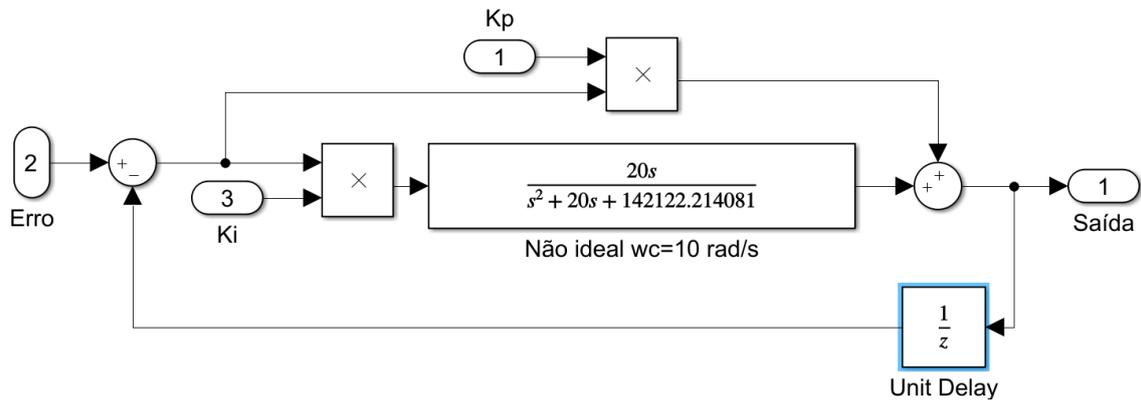


Figura B.2: Detalhe do controlador P+R construído no Simulink.

B.3 PNSC

O bloco *Positive and Negative Sequence Calculator* implementado no SIMulink é ilustrado na Figura B.3:

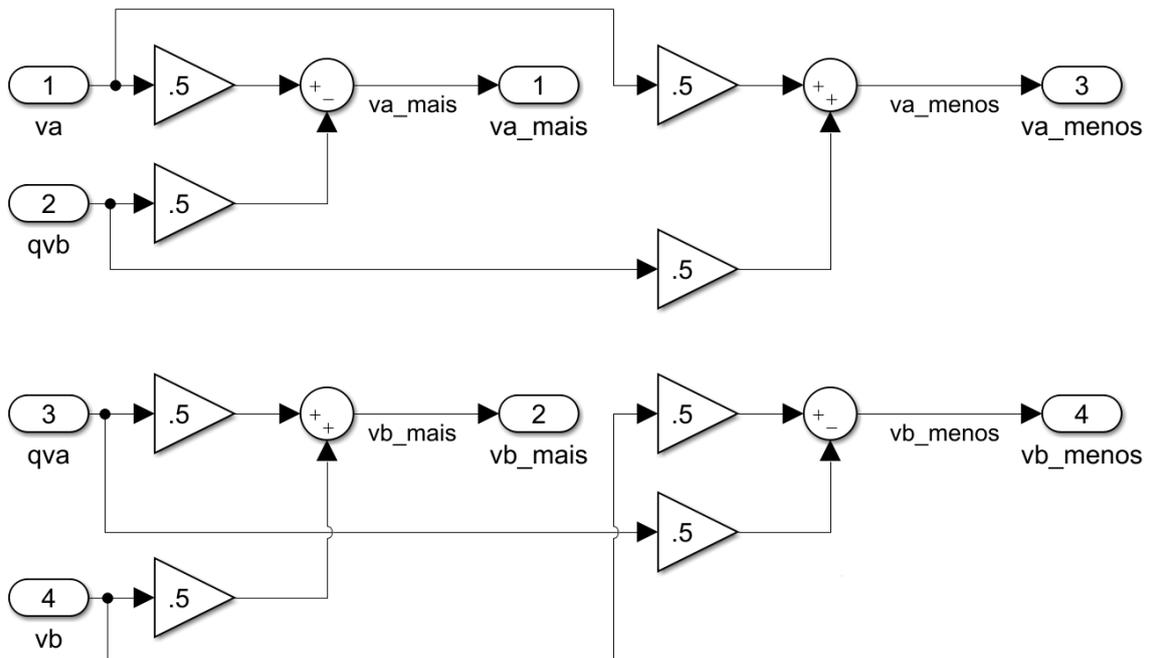


Figura B.3: Detalhe do PNSC.