

MANOEL CONDE DE ALMEIDA

Estudo da Implementação de Geradores de Reativos Utilizando Conversores
Modulares Multinível em Cascata

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Wilson Komatsu

Coorientador: Prof. Dr. Lourenço Matakas Jr.

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de MARÇO de 2024

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Almeida, Manoel Conde de
Estudo da Implementação de Geradores de Reativos Utilizando
Conversores Modulares Multinível em Cascata / M. C. Almeida -- versão corr.
- São Paulo, 2014.
298 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Eletrônica de Potência 2.Conversores Elétricos I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas II.t.

Para Fátima e meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos mestres Lourenço Matakas Junior, Wilson Komatsu e Eduardo Lorenzetti Pellini pela orientação e incentivo.

Agradeço aos professores Bruno Augusto Angélico, João Inácio Yutaka Otta, membros da banca de qualificação e Allan Fagner Cupertino e Pedro Gomes Barbosa, membros da banca de defesa, pelas importantes contribuições à revisão do trabalho.

Agradeço aos colegas Lucas Kollef, Pedro Hayashi, Francesco Sacco e Kelly Carvalho pelas contribuições e boa convivência ao longo desses últimos anos.

Agradeço à minha querida sogra, Dona Helle Nice, aos meus cunhados, Fani e Raul, verdadeiros irmãos, e aos meus filhos Bruna, Lucas e Ana Carolina, por me darem força e condições de dedicar a esse trabalho as escassas e, portanto, longas noites e finais-de-semana.

RESUMO

Este trabalho explora a compensação de reativos de sequência positiva e negativa baseada em Conversores Modulares Multinível em Cascata (MMCCs – *Modular Multilevel Cascaded Converters*). Ele busca entender conceitos que servem de base para a organização e projeto de arquiteturas de controle de conversores MMCC operando neste tipo de aplicação. Oferece um roteiro que estuda o efeito da combinação das componentes simétricas das tensões e correntes sobre a potência ativa total e nos braços do conversor identificando: i) o produto entre componentes de sequência positiva e; ii) o produto de sequência zero com componentes de sequência positiva ou negativa como sendo de especial interesse para a regulação da média global e balanceamento das tensões CC nos braços do conversor respectivamente. Discute uma arquitetura de controle baseada nessas combinações, que realiza as ações de regulação da média e balanceamento das tensões CC de forma desacoplada, operando totalmente no sistema de referência natural, abc. Modelos linearizados e simplificados das plantas são obtidos e métodos para ajuste das malhas que compõem o sistema de controle são propostos. Os modelos propostos são validados e o desempenho da arquitetura de controle é avaliado através de simulações em condições de funcionamento variadas, incluindo situações de desbalanço na tensão e corrente.

.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência. Conversores Multinível. Modelagem de Conversores. Controle de Corrente. Controle da Tensão CC. Regulação da Tensão CC. Balanceamento da Tensão CC. MMCC. STATCOM.

ABSTRACT

This work explores the positive and negative sequence reactive power compensation making use of Modular Multilevel Converters, MMCCs for short. It aims the understanding of concepts underlying the organization and design of MMCCs control architectures while operating in this type of application. It offers a framework that studies the voltage and current symmetrical components combination effects on the active power produced by the converter arms and identifies: i) the product of positive sequence components and; ii) the one involving zero and positive or negative sequences as combinations of special interest for the average regulation and balancing of the converter arms DC voltages. The work discusses a control architecture that relies on these combinations to implement decoupled DC voltage average regulation and balancing control loops operating entirely on the natural frame of reference, abc. Linear plant models are developed and methods for the design and adjustment of the various existing control loops are proposed. The proposed models are validated, and the performance of the control architecture is evaluated through a varied suite of simulations including situations of voltage and current unbalances.

Keywords: Power Electronics. Multilevel Converters. Modelling. DC Voltage Control. DC Voltage Regulation. DC Voltage Balance. Current Control. MMCC. STATCOM.

Índice de Figuras

Figura 1. 1 – Conversores SSBC e SDBC – Estrutura Básica	25
Figura 1. 2 – MMCC – Blocos de Controle	28
Figura 1. 3 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema dq	29
Figura 1. 4 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema $\alpha\beta$	31
Figura 1. 5 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema abc	32
Figura 1. 6 – Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC	33
Figura 1. 7 – Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC	34
Figura 1. 8 – Malha de Balanceamento das Tensões CC dos Braços	35
Figura 1. 10 – Compensação de Desbalanço Através da Adição de Rede Reativa	37
Figura 1. 10 – Equalização Individual - Mecanismo de Ordenamento e Seleção	38
Figura 1. 11 – Malhas de Equalização Individual.....	39
Figura 2. 1– Sistema Trifásico.....	43
Figura 3.1 – Bipolos Representando os Braços do Conversor	48
Figura 3.2 – Regulação da Média da Tensão CC dos Braços - Injeção de Corrente de Mesma Sequência e Fase da Tensão	56
Figura 3.3 – Balanceamento das Tensões CC dos Braços - Injeção de Corrente de Sequência Zero	59
Figura 3.4 – Balanceamento das tensões CC dos Braços - Injeção de Corrente de Sequência Oposta à da Tensão.....	61
Figura 3. 5 – Tensões nos Submódulos: Parcela Comum (a), Ajustes Individuais (b), (c)=(a)+(b); Tensão no Braço (d).....	64
Figura 3. 6 – Potência Instantânea nos Submódulos: Parcela Comum (a), Ajustes Individuais (b), (c)=(a)+(b); Potência Instantânea no Braço (d)	65
Figura 3. 7 – Tensões CC nos Submódulos e no Braço.....	66
Figura 4. 1 – Conversor Conectado em Y(SSBC)	68
Figura 4. 2 – Conversor Conectado em Δ (SDBC)	68
Figura 4. 3 – Arquitetura de Controle - Organização	70
Figura 4.4 – Bloco de Modulação – Configuração Y(SSBC)	72
Figura 4.5 – Bloco de Modulação – Configuração Δ (SDBC)	72
Figura 4. 6 – Malha de Corrente – Configuração Y(SSBC)	73
Figura 4.7 – Malha de Corrente – Configuração Δ (SDBC).....	74
Figura 4.8 – Controle da Tensão CC Y(SSBC) – Regulação da Média Global e Balanceamento.....	75
Figura 4.9 – Controle da Tensão CC Δ (SDBC) – Regulação da Média Global e Balanceamento	76
Figura 4. 10 – Bloco de Equalização Individual	79

Figura 5.1 – Circuito Equivalente do Conversor Conectado em Y(SSBC)	82
Figura 5.2 - Controle da Corrente no Conversor - Y(SSBC).....	86
Figura 5.3 – Circuito Equivalente – Conversor Conectado em Δ (SDBC).....	86
Figura 5.4 - Controle da Corrente no Conversor – Δ (SDBC).....	89
Figura 5.5 - Circuitos Equivalentes – Submódulo (a) e Braço do Conversor (b).....	89
Figura 5.6 - Controle da Tensão CC – Regulação da Média das Tensões CC dos Braços – Y(SSBC)	95
Figura 5.7 - Controle da Tensão CC – Regulação da Média das Tensões CC dos Braços – Δ (SDBC)	95
Figura 5.8 - Controle da Tensão CC – Balanceamento das Tensões CC nos Braços – Y(SSBC).....	98
Figura 5.9 - Controle da Tensão CC – Balanceamento das Tensões CC nos Braços – Δ (SDBC)....	100
Figura 5.10 – Equalização Individual – Malhas de Controle para Um Braço do Conversor.....	105
Figura 6.1 – Etapas do Projeto dos Controladores das Malhas de Controle.....	107
Figura 6.2 – Malha de controle da Corrente Injetada – Diagrama simplificado com atraso de cálculo	110
Figura 6.3 – Malha de Controle da Corrente Considerando o Atraso de Cálculo e Distúrbio da Rede	113
Figura 6.4 – Verificação do Comportamento da Malha de Controle da Corrente.....	115
Figura 6.5 – Métodos de controle da Tensão CC dos braços do conversor	116
Figura 6.6 – Malha de Regulação da Média Global da Tensão CC	117
Figura 6.7 – THD% Máxima na Corrente Injetada	120
Figura 6.8 – Comportamento de λ_{c_glb}	121
Figura 6.9 – Malhas de Balanceamento da Tensão CC	121
Figura 6.10 – Sinal de Sequência Zero Produzido Pela Malha de Balanceamento Com e Sem Filtro Operação Sem Desbalanço - Sinais Obtidos na Configuração Y(SSBC)	124
Figura 6.11 – Sinal de Sequência Zero Produzido Pela Malha de Balanceamento Com e Sem Filtro	126
Figura 6.12 – Diagrama simplificado - Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC com FPB.....	127
Figura 6.13 – Diagrama simplificado - Malha de Balanceamento das Tensões CC com FPB	128
Figura 6.14 – Resposta ao Degrau – Malhas de Controle da Tensão CC	131
Figura 6.15 – Diagrama simplificado - Malhas de Equalização Individual das Tensões CC dos Submódulos dos Braços	132
Figura 6.16 – Diagrama simplificado - Malha de Equalização Individual sem filtros	133
Figura 6.17 – Malha de Equalização Individual – Resposta ao Degrau	134
Figura 7.1 – Malha de Controle da Corrente Injetada – Resposta ao Degrau de Amplitude	140
Figura 7.2 – Controle da Corrente Injetada – Corrente de Linha – Referência e Medida	141
Figura 7.3 – Controle da Corrente Injetada – Corrente de Linha – Referência e Medida	141

Figura 7. 4 – Controle da Tensão CC dos Braços – Regulação da Média Global λ_{c_glb}	143
Figura 7. 5 – Controle da Tensão CC dos Braços – Balanceamento de λ_{cx}	144
Figura 7. 6 – Controle das Tensões CC nos Submódulos – Equalização de λ_{cxi}	145
Figura 7. 7 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC – Comportamento Frente a Degraus de Amplitude na Referência de Corrente – $Y(SSBC)$	149
Figura 7. 8 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC – Comportamento Frente a Degraus de Amplitude na Referência de Corrente – $\Delta(SDBC)$	150
Figura 7. 9 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC	151
Figura 7. 10 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC	152
Figura 7. 11 – Desempenho do Conversor – $Y(SSBC)$ – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente	155
Figura 7. 12 – $Y(SSBC)$ - Crescimento da Tensão de Seq. Zero x % de Sequência Negativa na Corrente Injetada.....	156
Figura 7. 13 – $Y(SSBC)$ – Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na Corrente Injetada.....	157
Figura 7. 14 – Desempenho do Conversor – $\Delta(SDBC)$ – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão	159
Figura 7. 15 – $\Delta(SDBC)$ – Correntes de Seq. Zero e de Fase (nos braços do conversor) x Percentual de Sequência Negativa na Tensão de Fase da Rede	161
Figura 7. 16 – $\Delta(SDBC)$ Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na.....	162
Figura 7. 17 – Desempenho do Conversor – $Y(SSBC)$ – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede.....	164
Figura 7. 18 – Sinal de Sequência Zero e do Índice de Modulação Após Ajuste na Tensão do Barramento CC.....	166
Figura 7. 19 – $Y(SSBC)$ – Proporção Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero	167
Figura 7. 20 – Desempenho do Conversor – $\Delta(SDBC)$ – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente Injetada	168
Figura 7. 21 – $\Delta(SDBC)$ – Proporção Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero	170
Figura 7. 22 – $Y(SSBC)$ - Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na Tensão da Rede e Corrente Injetada	172
Figura 7. 23 – Desempenho do Conversor – $Y(SSBC)$ – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva na Corrente Injetada.....	174
Figura 7. 24 – $Y(SSBC)$ – Amplitude do Sinal de Sequência Zero em Função da Defasagem Entre as Componentes de Sequência Negativa e Positiva da Corrente Injetada	176
Figura 7. 25 – Desempenho do Conversor – $\Delta(SDBC)$ – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão da Rede	177
Figura 7. 26– $\Delta(SDBC)$ – Amplitude do Sinal de Sequência Zero em Função da Defasagem Entre as Componentes de Sequência Negativa e Positiva da Tensão de Fase da Rede	179

Figura 7. 27 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Operação Apenas com Seqência Negativa na Corrente Injetada.....	181
Figura 7. 28 – Desempenho do Conversor – Δ (SDBC) – Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada.....	184
Figura 7. 29 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Operação com Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada	188
Figura 7. 30 – Desempenho do Conversor – Δ (SDBC)– Operação com Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada	189
Figura 7. 31 – Configuração Y(SSBC)– Operação com Afundamento Total em Uma Fase do Gerador	191
Figura 7. 32 – Configuração Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total em Duas Fases do Gerador	193
Figura 7. 33 – Configuração Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total nas Três Fases do Gerador	195
Figura 7. 34 – Conversor – Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total nas Três Fases do Gerador	198
Figura 7. 35 – Configuração Δ (SDBC) – Operação com Afundamento Total em Uma Fase do Gerador	199
Figura 7. 36 – Configuração Y(SSBC) – Operação Sem Injeção de Corrente Reativa.....	202
Figura 7. 37 – Configuração Δ (SDBC) – Operação Sem Injeção de Corrente Reativa	203
Figura 7. 38 – Configuração Δ (SDBC) – Comportamento da Equalização Individual Com Adição de Carga no Lado CC.....	204
Figura 7. 39 – Configuração Δ (SDBC) – Comportamento da Equalização Individual Com a injeção de Sequência Zero	205
Figura 7. 40 – Configuração Y(SSBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28	210
Figura 7. 41 – Configuração Y(SSBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28	211
Figura 7. 42 – Configuração Δ (SDBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28	213
Figura 7. 43 – Configuração Δ (SDBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28	214
Figura A. 1 – Circuito simplificado do submódulo baseado em ponte H	228
Figura A. 2 - Modelo equivalente do submódulo.....	229
Figura A. 3 - Modelo equivalente de um braço do conversor	229
Figura A. 4 - Modelo equivalente consolidado de um braço do conversor	230
Figura B.1 – Conexão em 3 fios – Rede modelada em Y.....	232
Figura B.2 – Rede modelada em Y a 3 fios – Deslocamento de vz	233
Figura C. 1 – Regulação da Média das Tensões CC nos Braços do Conversor – Cálculo da Amplitude da Corrente a Ser Injetada	235

Figura C. 2 – Balanceamento das Tensões CC nos Braços do Conversor – Cálculo da Amplitude e Fase da Corrente a Ser Injetada	238
Figura C. 3 – Equalização das Tensões CC nos Submódulos de Um Braço – Cálculo das Amplitudes dos Ajustes Individuais	245
Figura D. 1 – Conversor Y(SSBC)/ Δ (SDBC) – Conexão à Rede	249
Figura D. 2 – Índice de Modulação – Máxima Corrente Nominal – Modo Capacitivo Sem Desbalanço	252
Figura E. 1 – Representação gráfica de $\cos(2\omega t)$	254
Figura E. 2 – Tensão CC nos capacitores dos Submódulos	256
Figura F. 1 - Conversor – Esquema Básico	257
Figura F. 2 - Portadora Triangular – Taxa de Variação	258
Figura F. 3 – Corrente de Referência e Medida.....	258
Figura F. 4 – Conversor Multinível – Forma de Onda da Tensão no Braço	259
Figura F. 5 – Corrente Injetada em Diferentes Ajustes de K_{pi} – Configuração Y(SSBC)	261
Figura G. 1 – Malha de Controle da Corrente Injetada com Atraso de Cálculo e Distúrbio da Rede Considerados	262
Figura H. 1 – Organização do Modelo de Simulação Implementado no Software PLECS	267
Figura H. 2 – Organização dos Controladores PI	268
Figura H. 3 – Organização básica de um Filtro Passa-Baixas Média Móvel.....	269
Figura H. 4 – Implementação Prática dos Filtros Passa-Baixas Média Móvel	269
Figura H. 5 – Organização dos Módulos PWM.....	271
Figura H. 6 – Organização dos Submódulos de Um Braço do Conversor	272
Figura H. 7 – Processo básico para detecção da amplitude (pico) da tensão ou corrente nos braços do conversor.....	273

Índice de Tabelas

Tabela 1. 1 – Topologias de Conversores Multinível x Estratégias de Modulação	28
Tabela 2. 1 – Definições – Tensões e Correntes de Fase e Linha	43
Tabela 2. 2 – Definições – Condições de Operação do Sistema	44
Tabela 2. 3 – Definições – Partes da Arquitetura de Controle do Conversor	44
Tabela 2. 4 – Definições – Regras de Formação dos Símbolos de Sinais e Grandezas Elétricas	45
Tabela 2. 5 – Definições – Aspectos Adicionais dos Símbolos de Sinais e Grandezas Elétricas	46
Tabela 2. 6 – Definições – Regras de Formação dos Símbolos de Componentes e Partes do Conversor	46
Tabela 3.1 - Produtos de Mesma Sequência	49
Tabela 3.2 - Produtos de Sequência Zero e Sequência Positiva ou Negativa	50
Tabela 3.3 - Produtos de Sequências Positiva e Negativa	52
Tabela 5.1 - Circuito Equivalente – Relações entre Grandezas	90
Tabela 6. 1 - Conversor SSBC/SDBC – Valores Nominais	109
Tabela 6. 2 – Parâmetros da Malha de Controle da Corrente Injetada com Atraso de Cálculo	110
Tabela 6. 3 – Valores máximos para a frequência de crossover e ganhos do controlador segundo [40]	111
Tabela 6. 4 – Frequência de Crossover Mínima / Margem de Fase Máxima Para Erro Máximo de Rastreamento (Vide Apêndice G)	114
Tabela 6. 5 – Ganhos dos Controladores – Calculados a Partir da Frequência de <i>Crossover</i> Determinada	115
Tabela 6. 6 – Parâmetros para Cálculo do Ganhos dos Controladores	130
Tabela 6. 7 – Ajustes dos Controladores das Malhas de Controle da Tensão CC	132
Tabela 6. 8 – Ajustes das Malhas de Controle da Corrente e das Tensões CC dos Braços do Conversor	137
Tabela 7. 1 - Controle da Corrente Injetada – Comparação dos Erros de Rastreamento Calculados e Medidos para a Configuração Y(SSBC)	141
Tabela 7. 2 – Controle da Corrente Injetada – Comparação dos Erros de Rastreamento Calculados e Medidos para a Configuração Δ (SDBC)	142
Tabela 7. 3 – Degraus de Amplitude e Fase Utilizados nas Simulações	147
Tabela 7. 4 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa	154
Tabela 7. 5 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Injeção de Percentuais Crescentes de Sequência Negativa (valores obtidos em simulação)	156

Tabela 7. 6 – Parâmetros da Simulação – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa	158
Tabela 7. 7 – Desempenho do Conversor $-\Delta$ (SSBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede (valores obtidos em simulação).....	160
Tabela 7. 8 – Parâmetros da Simulação – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa	163
Tabela 7. 9 – Desempenho do Conversor $-\Upsilon$ (SSBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede (valores obtidos em simulação).....	165
Tabela 7. 10 $-\Upsilon$ (SSBC)– Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero	166
Tabela 7. 11 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa	167
Tabela 7. 12 – Desempenho do Conversor $-\Delta$ (SDBC) – Injeção de Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)	169
Tabela 7. 13 $-\Delta$ (SDBC)– Relação Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero (valores obtidos em simulação)	169
Tabela 7. 14 – Relação entre as amplitudes da componente de Sequência Negativa e Sequência Zero (valores obtidos em simulação).....	172
Tabela 7. 15 – Parâmetros da Simulação – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Sequência Positiva na Corrente Injetada	173
Tabela 7. 16 – Desempenho do Conversor Υ (SSBC) – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Corrente Injetada (valores obtidos em simulação).....	175
Tabela 7. 17 – Parâmetros da Simulação – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão da Rede	176
Tabela 7. 18 – Desempenho do Conversor $-\Delta$ (SDBC)– Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão de Fase da Rede (valores obtidos em simulação).....	178
Tabela 7. 19 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada apenas com Sequência Negativa.....	180
Tabela 7. 20 $-\Upsilon$ (SSBC)– Operação com Corrente de Sequência Negativa - Características da Tensão de Sequência Zero e Barramento CC (valores calculados).....	180
Tabela 7. 21 – Desempenho do Conversor $-\Upsilon$ (SSBC)– Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação).....	182
Tabela 7. 22 – Desempenho do Conversor Υ (SSBC) – Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada.....	182
Tabela 7. 23 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada Apenas com Sequência Negativa	183
Tabela 7. 24 – Operação com Corrente de Sequência Negativa $-\Delta$ (SDBC) – Características da Tensão de Sequência Zero e Barramento CC (valores calculados).....	184
Tabela 7. 25 – Dados de Desempenho do Conversor Δ (SDBC) – Operação apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)	185
Tabela 7. 26 – Desempenho do Conversor $-\Delta$ (SDBC)– Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada.....	186
Tabela 7. 27 – Condições Simuladas Em Cada Configuração – Υ (SSBC) e Δ (SDBC)	207

Tabela 7. 28 – Valores das Grandezas – $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$	208
Tabela G. 1 – Valores de ω_c e MF para erros máximos permitidos na Corrente Injetada dentro da faixa de operação	265
Tabela H. 1 – Código Fonte, na linguagem C, para a Configuração $Y(SSBC)$	275
Tabela H. 2 – Código Fonte, na linguagem C, para a Configuração $\Delta(SDBC)$	287

Lista de Símbolos

Índices

- * identifica um sinal de referência externa ou produzido internamente pelas malhas de controle
- ' identifica um sinal ou grandeza intermediária

Subíndices

- i indicador de posição, $i = 1, 2, 3, \dots N$ onde N é o número de submódulos de um braço do conversor
- j indicador de posição
- k indicador de posição
- x identifica sinal ou grandeza medidos ou componentes conectados entre Fase e Neutro, $x = a, b, c$, ou entre Fase e fase, $x = ab, bc, ca$

Sinais e Grandezas

- $A_i(s)$ função de transferência de malha aberta da malha de Controle da Corrente
- $a_{j_{xi}}^*$ ajuste individual imposto à tensão de referência, $v_{b_x}^*$, que resulta em $v_{b_{xi}}^*$
- \mathcal{A}_x nível médio de λ_{c_x}
- a_x *ripple* de λ_{c_x}
- $\bar{\mathcal{A}}$ nível médio de λ_{c_glb}
- \bar{a} *ripple* de λ_{c_glb}
- C capacitância no lado CC dos submódulos
- CA corrente alternada
- CC corrente contínua
- C_{eq} capacitância equivalente em um braço ($C_{eq} = \frac{C}{N}$)
- $C_t(s)$ função de transferência de um controlador qualquer
- δ fase do *ripple* de λ_{c_glb}
- Δ_{iref} variação da referência da malha de corrente em um intervalo de modulação pwm
- $\Delta\Omega C_{eq_x}$ variação da energia acumulada nos capacitores dos submódulos do braço x do conversor
- $\Delta\Omega_x$ variação da energia no braço x do conversor
- Δ_{vref} variação do sinal de referência produzido pela malha de corrente em um intervalo de modulação pwm
- E_{fase}^o erro de fase da corrente injetada medida em relação à referência expresso em graus
- $E_{mag}\%$ erro de magnitude da corrente injetada medida em relação à referência expresso em termos percentuais
- $e(k)$ entrada de um sistema discreto qualquer
- φ_i fase da corrente de linha injetada
- $\Phi_{ib_{max}}$ fase do fasor $I_{b_{x_{max}}}$
- φ'_{iz} fase de ib'_z
- φ_{in} fase da componente de sequência negativa das correntes através braços do conversor
- φ_{rpl_x} fase do *ripple* observado nas tensões CC dos submódulos do braço x
- $\varphi_{_x}$ fase do sinal $sinc_x$
- φ_{iz} fase da componente de sequência zero das correntes através dos braços do conversor
- f_{rede} frequência da rede em Hz
- f_s frequência de amostragem em Hz
- f_{tri} frequência da portadora triangular PWM
- φ_v fase da tensão de fase (Fase-Neutro) da rede
- φ'_{vz} fase de $v_{b'_z}$

φ_{vn}	fase da componente de sequência negativa das tensões (média instantânea) nos braços do conversor
φ_{vz}	fase da componente de sequência zero das tensões (média instantânea) nos braços do conversor
Gz	função de transferência dos controladores utilizados na malha de Balanceamento da tensão CC dos braços do conversor
I	amplitude(pico) da corrente de linha da rede (condição balanceada)
Ib_d	componente d (ativa) da corrente nos braços do conversor – sistema de referência dq
$Ib_{dist}(s)$	função de transferência da corrente injetada em relação ao distúrbio da tensão da rede
Ib_d^*	referência da componente d (ativa) da corrente nos braços do conversor – sistema de referência dq
$Ib_{inicial}$	amplitude da corrente injetada no início de um intervalo de modulação pwm
Ib_{xmax}	módulo do fasor da máxima corrente através do braço x do conversor
Ib_{il}^*	amplitude (pico) da componente ativa da referência de corrente
$\vec{Ib}_{p }$	vetor da componente ativa das correntes através dos bipolos que representam os braços de um conversor
$\vec{Ib}_{p\perp}$	vetor da componente reativa de sequência positiva das correntes através dos bipolos que representam os braços de um conversor
Ib_q	componente q (reativa) da corrente nos braços do conversor – sistema de referência dq
Ib_q^*	referência da componente q (reativa) da corrente nos braços do conversor – sistema de referência dq
$Ib_{ref}(s)$	função de transferência da corrente injetada em relação à referência
$ibsinc_x$	sinal unitário de mesma frequência e fase da corrente nos braços do conversor
\vec{Ib}	vetor das correntes através dos bipolos que representam os braços de um conversor
\vec{Ib}_n	vetor da componente de sequência negativa das correntes através dos bipolos que representam os braços de um conversor
\vec{Ib}_z	vetor da componente de sequência zero das correntes através dos bipolos que representam os braços de um conversor
Ib_x	amplitude (pico) da corrente no braço x do conversor
ib_x	corrente no braço x do conversor
Ib_{xmax}	fasor da máxima corrente através do braço x
ib_{xn}	componente de sequência negativa da corrente no braço x do conversor
ib_{xp}	componente de sequência positiva da corrente no braço x do conversor
ib_{xp}	componente de sequência positiva da corrente no braço x do conversor
$ib_{xp }$	componente ativa de sequência positiva da corrente no braço x do conversor
$ib_{x }^*$	componente ativa, em fase com a tensão da rede, da referência de corrente do braço x
$ib_{x\perp}^*$	componente reativa, em quadratura com a tensão da rede, da referência de corrente do braço x
$ib_{xp\perp}$	componente reativa de sequência positiva da corrente no braço x do conversor
Ib_z	amplitude(pico) da componente de sequência zero da corrente nos braços do conversor
ib_z	componente de sequência positiva da corrente nos braços do conversor
Ib_z'	amplitude (pico) de ib_z'
ib_z'	sinal de corrente de sequência zero intermediário, que tende à referência ib_z^*
ib_z^*	referência de corrente de sequência zero produzida pela malha de Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor na configuração SDBC
ib_α	componente α da corrente nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
$ib_{\alpha }^*$	componente α da corrente ativa, em fase com a tensão da rede, da referência de corrente – sistema de referência $\alpha\beta$

ib_{α}^*	referência da componente α da corrente nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
ib_{β}	componente β da corrente nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
$ib_{\beta }^*$	componente β da corrente ativa, em fase com a tensão da rede, da referência de corrente – sistema de referência $\alpha\beta$
ib_{β}^*	referência da componente β da corrente nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
$iceq_x$	corrente no capacitor do modelo equivalente do braço x
ic_{xi}	corrente no capacitor do modelo equivalente do submódulo i do braço x
ic_{\equiv}	sinal de corrente produzida pela modulação pwm da corrente através de uma ponte H
i_{ref}	referência da malha de corrente
$ireq_x$	corrente no resistor do modelo equivalente do braço x
ir_{xi}	corrente no resistor do modelo equivalente do submódulo i do braço x
ism_x	corrente no lado CC no modelo equivalente do braço x do conversor
ism_{xi}	corrente no lado CC no modelo equivalente do submódulo i do braço x do conversor
I_x	amplitude (pico) da corrente de linha da rede
i_x	corrente na rede
Ki_i	ganho integral do controlador da malha de Controle da Corrente
Ki_v	ganho integral dos controladores das malhas de Regulação da Média e Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor
Kp_{cmax}	ganho proporcional máximo para a malha de corrente operando no tempo contínuo
Kp_{dmax}	ganho proporcional máximo para a malha de corrente operando no tempo discreto
Kp_i	ganho proporcional do controlador da malha de Controle da Corrente
Kp_{ilim}	ganho proporcional limítrofe (máx.) acima do qual há perda de estabilidade
Kp_{ilim}	ganho proporcional limítrofe da malha de corrente acima do qual há perda de estabilidade
Kp_v	ganho proporcional dos controladores das malhas de Regulação da Média e Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor
Kp_{vequ}	ganho proporcional dos controladores das malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos dos braços do conversor
L	indutância do circuito de acoplamento do conversor à rede
$L_i(k)$	limite proporcional de um dispositivo <i>anti-windup</i> de um controlador PI
L_{p_max}	limite proporcional de um dispositivo <i>anti-windup</i> de um controlador PI
$\lambda_{caj_{xi}}$	diferença entre $\lambda_{c_{xi}}$ e $\lambda_{c_médio_x}$
$\lambda_{c_bal_x}$	diferença do valor de λ_{c_x} em relação a λ_{c_glb}
λ_{c_glb}	média aritmética dos valores de λ_{c_x} dos braços do conversor
$\lambda_{c_médio}$	média do quadrado das tensões CC dos submódulos do braço x do conversor
λ_{c}^*	referência externa para o valor de λ_{c_glb}
λ_{c_x}	soma do quadrado das tensões CC dos submódulos do braço x do conversor
$\lambda_{c_{xi}}$	quadrado da tensão CC do submódulo i do braço x do conversor
m	valor médio do sinal pwm S
MF_i	margem de fase de $Ai(s)$
MF_{imax}	máxima margem de fase de $Ai(s)$ para garantir erros de rastreamento dentro do limite especificado
MF_v	margem de fase de $Av(s)$
m_x	índice de modulação do braço x
m_{xi}	índice de modulação do submódulo i do braço x do conversor
n	número de níveis do sinal multinível produzido pelo conversor
N	número de submódulos de submódulos em um braço do conversor

N_{VIRTUAL}	neutro da rede (não acessível em sistemas a três fios)
N'_{VIRTUAL}	neutro da rede sem componente de sequência zero
$pb_x(t)$	potência instantânea produzida no braço x do conversor
Pb_x	potência média produzida no braço x do conversor
$pc_{3\phi}$	potência trifásica instantânea no conversor
$Pc_{3\phi}$	potência média trifásica no conversor
$pc_{aj_{xi}}$	diferença entre pc_{xi} e $pc_{\text{média}_x}$
pc_{bal_x}	diferença entre a potência instantânea produzida no braço x e pc_{glb} em condições desbalanceadas
Pc_{bal_x}	diferença entre a potência média produzida no braço x e Pc_{glb} em condições desbalanceadas
pc_{glb}	potência instantânea produzida nos braços do conversor em condições balanceadas
Pc_{glb}	potência média produzida nos braços do conversor em condições balanceadas
pc_x	potência instantânea no braço x do conversor
pc_{xi}	potência instantânea no submódulo i do braço x do conversor
$pc_{\text{média}_x}$	média das potências instantâneas nos submódulos do braço x do conversor
Pc_x	potência média no braço x do conversor
pc_{z_x}	potência instantânea produzida pela componente de sequência zero de tensão(Y) ou corrente(Δ) no braço x do conversor
Pc_{z_x}	potência média produzida pela componente de sequência zero de tensão(Y) ou corrente(Δ) no braço x do conversor
Perdas	total das perdas, medido em Watt(W), no circuito de acoplamento dos braços e nos submódulos do conversor
p^*	nível produzido pelo controlador da malha de Regulação da Média Global das tensões CC dos submódulos do conversor, proporcional à potência média necessária a ser drenada ou entregue à rede para manter essa média igual à referência estabelecida
$p(t)$	potência trifásica instantânea produzida pelos braços do conversor
P	potência média trifásica produzida pelos braços do conversor
R	resistência do circuito de acoplamento do conversor à rede
Rc	perdas no lado CC dos submódulos
Req	soma das perdas nos submódulos de um braço ($Req=NRc$)
$Ripple\%$	<i>ripple</i> (pico) da tensão CC dos submódulos dado como um percentual da tensão CC média
S	sinal PWM produzido a partir de $S1$ e $S2$ ($S= S1-S2$)
$s(k)$	saída de um sistema discreto qualquer
$S1, S2$	conjunto de sinais de acionamento das chaves de uma Ponte-H
$sinc_x$	notação utilizada para representar um sinal trifásico unitário de mesma frequência e fase da tensão da rede ou da corrente nos braços do conversor dependendo da configuração Y(SSBC) ou Δ (SDBC)
$Slope_{\text{modul}}$	inclinação do sinal modulador em um intervalo de tempo igual ao período da portadora triangular PWM
$Slope_{\text{portac}}$	inclinação da portadora triangular PWM
sm_{xi}	submódulo i do braço x
$St_{2\%}$	Settling Time ou Tempo de Estabilização. Tempo para a grandeza controlada permanecer numa faixa de +/-2% do nível esperado para o regime permanente após degrau na referência
S_{xi}	conjunto de sinais de acionamento das chaves da Ponte-H do submódulo i do braço x
T_d	atraso de cálculo

t_f	instante final de um intervalo de tempo qualquer
t_i	instante inicial de um intervalo de tempo qualquer
T_s	tempo de amostragem
T_{zoh}	tempo de aquisição de dados
$v_{aj_{xi}}$	diferença entre $v_{b_{xi}}$ e $v_{b_{m_x}}$
$V_{b_d}^*$	referência da componente d (ativa) da tensão nos braços do conversor – sistema de referência dq
$V_{b_{max}}$	módulo do fasor da máxima tensão produzida no braço x do conversor
$v_{b_{m_x}}$	média aritmética das tensões $v_{b_{xi}}$ produzidas pelos submódulos do braço x do conversor
$v_{b_{\equiv}}$	sinal de tensão pwm multinível produzido em um braço do conversor
$V_{b_q}^*$	referência da componente q (reativa) da tensão nos braços do conversor – sistema de referência dq
V_{b_x}	amplitude (pico) da média instantânea da tensão no braço x do conversor
v_{b_x}	média local da tensão no braço x do conversor
$V_{b_{x_{max}}}$	fasor da máxima tensão produzida no braço x do conversor
$v_{b_{xi}}$	parcela da média local da tensão CA do braço x produzida pelo submódulo i
$v_{b_{xi}}^*$	parcela ajustada da tensão CA do braço x produzida pelo submódulo i do referido braço
v_{b_x}'	referência de tensão no braço x do conversor produzida pela respectiva malha de corrente sem <i>feedforward</i> da tensão da rede
$v_{b_{xn}}$	componente de sequência negativa da média local da tensão do braço x
$v_{b_{xp}}$	componente de sequência positiva da média local da tensão do braço x
$v_{b_x}^*$	referência de tensão no braço x do conversor produzida pela respectiva malha de corrente incluindo <i>feedforward</i> da tensão da rede
V_{b_z}	amplitude (pico) da tensão de sequência zero produzida nos braços do conversor
v_{b_z}	componente de sequência zero da média local da tensão do braço x
V_{b_z}'	amplitude (pico) de v_{b_z}'
v_{b_z}'	sinal de tensão de sequência zero intermediário, que tende à referência $v_{b_z}^*$
$V_{b_z}^*$	amplitude (pico) de $v_{b_z}^*$
$v_{b_z}^*$	referência de tensão de sequência zero produzida pela malha de Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor na configuração SSBC
$v_{b_\alpha}^*$	referência da componente α da tensão nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
$v_{b_\beta}^*$	referência da componente β da tensão nos braços do conversor – sistema de referência $\alpha\beta$
v_{ceq_x}	soma das tensões instantâneas dos capacitores do braço x ($v_{ceq_x} = \sum_{i=1}^N v_{c_{xi}}$) – inclui <i>ripple</i>
V_{ceq_x}	soma das tensões médias dos capacitores dos submódulos de um braço em regime ($V_{ceq_x} = NV_c^*$)
$V_{ceq_{x_{min}}}$	valor mínimo de v_{ceq_x}
$V_{ceq_{x_{max}}}$	valor máximo de v_{ceq_x}
$\overline{v_c}$	média aritmética das tensões CC dos submódulos do conversor
$\overline{v_c}^*$	média aritmética das tensões CC dos submódulos do conversor quando utilizada como referência para as malhas de Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor
V_c^*	referência para o valor médio da tensão dos capacitores em regime ($V_{c_{xi}} = V_c^* \quad \forall x, i$)

$\overline{v_{C_{tf}}}$	tensão CC nos capacitores dos submódulos do conversor no instante final do afundamento total da tensão em uma ou mais fases do gerador da rede
$\overline{v_{C_{ti}}}$	tensão CC nos capacitores dos submódulos do conversor no instante inicial do afundamento total da tensão em uma ou mais fases do gerador da rede
v_{C_x}	tensão CC no braço x do conversor – inclui <i>ripple</i>
$v_{C_{xi}}$	tensão CC no capacitor do submódulo i do braço x
$V_{C_{xi}}$	valor médio da tensão no capacitor do submódulo i do braço x
$\overline{v_{C_x}}$	média aritmética das tensões CC dos submódulos de um braço x do conversor
$V_{C_{x\max}}$	valor máximo de v_{C_x}
$V_{C_{x\min}}$	valor mínimo de v_{C_x}
$\overline{v_{C_x}^*}$	média aritmética das tensões CC dos submódulos de um braço x do conversor quando utilizada como referência para as malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos do braço em questão
V_d	componente d (ativa) da tensão da rede – sistema de referência dq
v_{pll_x}	sinal unitário de mesma frequência e fase da tensão da rede
v_{\equiv}	sinal de tensão pwm multinível produzido por uma ponte H
V_q	componente q (reativa) da tensão da rede – sistema de referência dq
v_{rede}	tensão instantânea da rede
$\overrightarrow{V_b}$	vetor das tensões nos bipolos que representam os braços de um conversor
$\overrightarrow{V_{b_n}}$	vetor da componente de sequência negativa das tensões nos bipolos que representam os braços de um conversor
$\overrightarrow{V_{b_p}}$	vetor da componente de sequência positiva das tensões nos bipolos que representam os braços de um conversor
$\overrightarrow{V_{b_z}}$	vetor da componente de sequência zero das tensões nos bipolos que representam os braços de um conversor
V_x	amplitude (pico) ou módulo do fasor da tensão da rede
v_x	tensão instantânea da rede
\dot{V}_x	fasor da tensão da fase x da rede
v_α	componente α da tensão instantânea da rede – sistema de referência $\alpha\beta$
v_β	componente β da tensão instantânea da rede – sistema de referência $\alpha\beta$
ω	frequência angular da rede (1ª harmônica)
ω_{C_i}	frequência angular de <i>crossover</i> de $A_i(s)$
$\omega_{C_{ilim}}$	frequência angular de <i>crossover</i> limítrofe de $A_i(s)$ para erro de rastreamento menor que máximo permitido
$\omega_{C_{imin}}$	mínima frequência angular de <i>crossover</i> de $A_i(s)$ para garantir erros de rastreamento dentro dos limites especificados
ω_{C_v}	frequência angular de <i>crossover</i> de $A_v(s)$
ω_f	frequência de corte dos filtros passa-baixa utilizados nas malhas de Regulação da Média e Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor

Sumário

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. ESTRATÉGIAS DE MODULAÇÃO	26
1.2. CONTROLE DA CORRENTE.....	29
1.3. REGULAÇÃO E BALANCEAMENTO DAS TENSÕES CC NOS BRAÇOS DO CONVERSOR	33
1.4. EQUALIZAÇÃO INDIVIDUAL DAS TENSÕES CC NOS SUBMÓDULOS DOS BRAÇOS.....	37
2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	41
2.1. OBJETIVOS.....	41
2.2. ESTRUTURA	42
2.3. DEFINIÇÕES E NOTAÇÕES	43
3. EFEITO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS DE TENSÃO E CORRENTE NAS POTÊNCIAS E NAS TENSÕES CC.....	47
3.1. COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA INDIVIDUAL E TRIFÁSICA NO CONVERSOR	47
3.2. MANEJO DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA O CONTROLE DAS TENSÕES CC NOS BRAÇOS DO CONVERSOR CONECTADO À REDE DE TRÊS FIOS.....	53
3.2.1. <i>Regulação da Média das Tensões CC nos Braços do Conversor Via Injeção de Corrente de Mesma Sequência da Tensão.....</i>	55
3.2.2. <i>Balanceamento das Tensões CC dos Braços Via Injeção de Corrente de Sequência Zero</i>	57
3.2.3. <i>Balanceamento das Tensões CC dos Braços Via Injeção de Corrente de Sequência Oposta à da Tensão.....</i>	60
3.3. EQUALIZAÇÃO DAS TENSÕES CC DOS SUBMÓDULOS VIA IMPOSIÇÃO DE TENSÃO EM FASE COM A CORRENTE.....	63
3.4. CONCLUSÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO 3	66
4. ARQUITETURA DE CONTROLE.....	68
4.1. BLOCO DE MODULAÇÃO – M	71
4.2. BLOCO DE CONTROLE DA CORRENTE	73
4.3. BLOCO DE CONTROLE DA TENSÃO CC.....	75
4.4. BLOCO DE EQUALIZAÇÃO INDIVIDUAL	79
4.5. CONCLUSÕES PARCIAIS DO CAPÍTULO 4	80
5. MODELAGEM	82
5.1. CONTROLE DA CORRENTE INJETADA.....	82
5.1.1. <i>Configuração Y(SSBC)</i>	82
5.1.2. <i>Configuração Δ(SDBC)</i>	86
5.2. CONTROLE DAS TENSÕES CC NOS BRAÇOS DO CONVERSOR	89
5.2.1. <i>Regulação da Média Global das Tensões CC dos Braços</i>	92
5.2.2. <i>Balanceamento das Tensões CC dos Braços</i>	95
5.3. EQUALIZAÇÃO INDIVIDUAL	101

6.	PROJETO DAS MALHAS DE CONTROLE	106
6.1.	PROJETO DA MALHA DE CONTROLE DA CORRENTE INJETADA.....	109
6.1.1.	<i>Determinação das Relações entre Margem de Fase, Frequência de Crossover e Ganhos do Controlador</i>	109
6.1.2.	<i>Determinação da Faixa Aceitável de Operação e Fixação da Frequência de Crossover da Malha</i>	111
6.1.3.	<i>Determinação dos Ganhos e Verificação do Comportamento da Malha</i>	114
6.2.	PROJETO DAS MALHAS DE CONTROLE DA TENSÃO CC DOS BRAÇOS DO CONVERSOR	115
6.2.1.	<i>Análise do Efeito do Ripple de 2ª Harmônica Presente na Tensão CC.</i>	117
6.2.2.	<i>Projeto dos Controladores</i>	127
a.	Escolha dos controladores.....	127
b.	Determinação dos Ganhos Proporcional e Integral dos Controladores	129
6.3.	PROJETO DAS MALHAS DE EQUALIZAÇÃO INDIVIDUAL DAS TENSÕES CC DOS SUBMÓDULOS DOS BRAÇOS DO CONVERSOR	132
6.4.	COMENTÁRIOS PARCIAIS DO CAPÍTULO 6	135
7.	VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO	138
7.1.	COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO E VERIFICAÇÃO DOS PROJETOS DAS MALHAS EM CONDIÇÕES EQUILIBRADAS	138
7.1.1.	<i>Malha de Controle da Corrente Injetada</i>	138
7.1.2.	<i>Malhas de Controle da Tensão CC nos Braços</i>	142
7.1.3.	<i>Malhas de Equalização Individual</i>	144
7.2.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA ARQUITETURA PROPOSTA	147
7.2.1.	<i>Degrau de Amplitude e Fase na Corrente Injetada – Sequência Positiva</i>	147
a.	Degrau de Amplitude	147
b.	Degrau de Fase	151
7.2.2.	<i>Operação Desbalanceada</i>	153
a.	Simulações Baseadas no Artigo de Referência [19].....	154
b.	Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Submetidas a Desbalanços na Tensão da Rede e Corrente nos Braços Respectivamente	163
c.	Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Operando com Defasagem Entre as Componentes de Sequência Positiva e Negativa da Corrente Injetada ou da Tensão da Rede	173
d.	Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Injetando Apenas Corrente de Sequência Negativa.....	179
e.	Comportamento das configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) na Presença Concomitante de Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada.....	186
7.2.3.	<i>Operação em Condições Extremas de Tensão na Rede e Corrente de Linha</i>	189
a.	Verificação da Capacidade de Operação com Afundamento Total da Tensão de Uma, Duas e Três Fases da Rede (Gerador) (ZVRT – Zero Voltage Ride Through – Capability)	190
b.	Verificação da Capacidade de Manutenção das Tensões do Barramento CC Balanceadas Sem Injeção de Corrente Reativa.....	200

7.2.4. Uma Última Avaliação Qualitativa	206
8. CONCLUSÃO.....	215
REFERÊNCIAS	223
APÊNDICE A – MODELO DO LADO CC DO CONVERSOR.....	228
APÊNDICE B - MODELO DA REDE A 3 FIOS.....	232
APÊNDICE C – MÉTODO E <i>SCRIPTS</i> MATLAB UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DOS ITENS 3.2 E 3.3.....	235
APÊNDICE D – ESCOLHA DA TENSÃO CC DOS SUBMÓDULOS	249
APÊNDICE E – CÁLCULO DO CAPACITOR	253
APÊNDICE F – CÁLCULO DO LIMITE DE GANHO PROPORCIONAL PARA A MALHA DE CORRENTE	257
APÊNDICE G – IMPACTOS DO ATRASO DE CÁLCULO NO CONTROLE DA CORRENTE INJETADA E DETERMINAÇÃO DA MÍNIMA FREQUÊNCIA DE <i>CROSSOVER</i> DA MALHA DE CORRENTE	262
APÊNDICE H – DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO P UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> PLECS	267

1. Introdução

O aumento contínuo da demanda¹ por energia elétrica [1], o uso de cargas não lineares e a crescente agregação de fontes renováveis (fotovoltaica, eólica)² de forma distribuída à rede trazem desafios para a qualidade e estabilidade dos sistemas de transmissão e distribuição [2][3]. O controle sobre reativos é base para lidar com condições não ideais de operação (desbalanços na corrente e/ou tensão, flutuações na potência suprida) e, nesse contexto, os FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) são componentes importantes para promover o aumento da eficiência e confiabilidade desses sistemas [4].

Entre os diferentes tipos de FACTS [5], o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) [6] [11] se apresenta como uma solução flexível, bastante estudada e testada, para a compensação de reativos e de desbalanços de corrente e/ou tensão no ponto de acoplamento (PCC – *Point of Common Coupling*).

As primeiras gerações de STATCOMs baseiam-se em conversores multipulso. Esses conversores normalmente fazem uso de conversores convencionais, de dois níveis (6 pulsos), operando na frequência da rede. Fazendo uso de transformadores de acoplamento, podem se conectar a redes de tensão elevada. Através de arranjos de transformadores (estrela-delta, delta estendido) e do deslocamento apropriado dos ângulos de disparo dos dispositivos de chaveamento, podem produzir formas de onda com múltiplos pulsos (12, 24, 48, ...) e um conteúdo harmônico reduzido [7] [12]. Novas gerações baseiam-se em conversores multinível com arquiteturas mais eficientes, que adotam uma abordagem modular e escalável, dispensam o uso de arranjos caros e complexos de transformadores e permitem a utilização de componentes de menor potência [8][11].

Conversores multinível podem ser agrupados em três topologias. Os DCMCs (*Diode Clamped Multilevel Converters*), FCMCs (*Flying Capacitor Multilevel Converters*) e MMCCs (*Modular Multilevel Cascaded Converters*) [9][11] entre os quais as

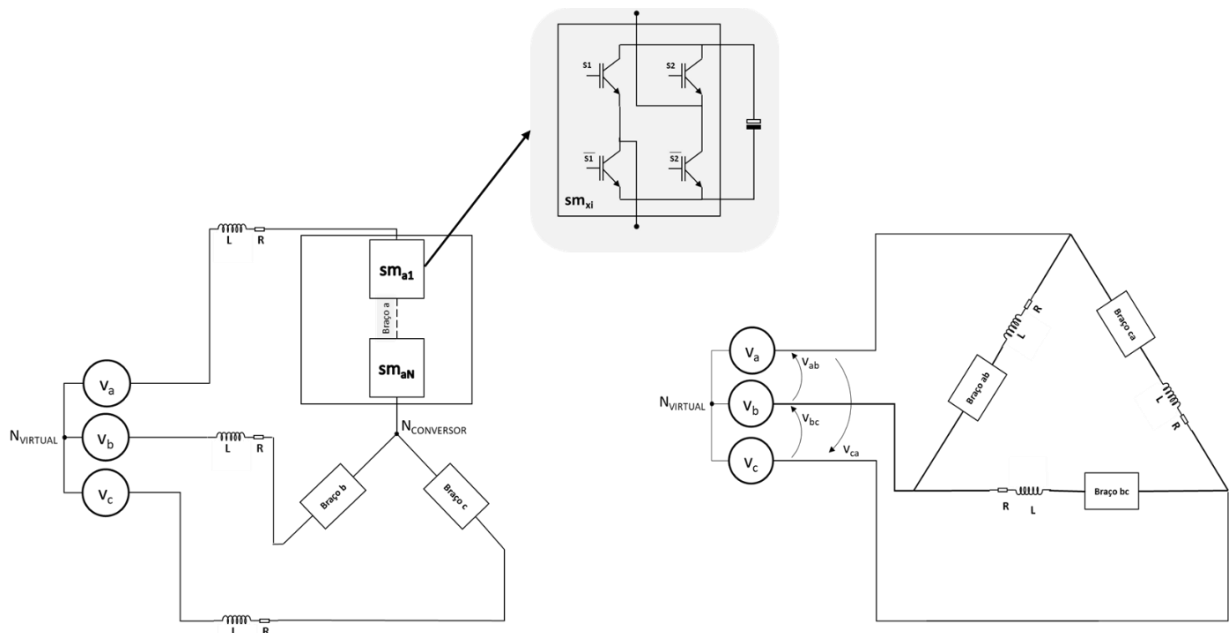
¹ De acordo com o Electricity Market Report 2023 da IEA (International Energy Agency) a demanda global por energia elétrica deve crescer a uma taxa média anual de 3% entre 2023 e 2025 chegando próxima a 30.000TWh no final desse período. No Brasil o crescimento médio é estimado em 2% ao ano no mesmo período.

² De acordo com o mesmo relatório, o crescimento global na geração de energias renováveis ultrapassa o crescimento total previsto para outras fontes de energia e em 2025 deve responder por um terço da energia produzida. Dentro do mix de fontes renováveis, a geração através de fontes eólicas e fotovoltaicas é a que mais crescerá. No Brasil a participação dessas fontes na matriz de geração chegará, em 2025, a 17% e 11% respectivamente.

configurações SSBC (*Single Star Bridge-Cells*), SDBC (*Single Delta Bridge-Cells*) e DSCC (*Double Star Chopper Cell*) são usualmente utilizados em STATCOMs [10][11].

As topologias SSBC e SDBC são estudadas neste trabalho. Do ponto de vista construtivo baseiam-se na associação em cascata (série) de um número N de submódulos para cada braço, ou fase, do conversor. Como mostra a Figura 1.1, na configuração SSBC, os braços estão conectados em Y e, na configuração SDBC, a conexão se dá em Δ . Os submódulos utilizados baseiam-se em pontes H completas (*Full H-Bridge*) como mostra o destaque na Figura 1.1.

Figura 1. 1 – Conversores SSBC e SDBC – Estrutura Básica



Fonte: Próprio autor

Nessas topologias:

- Dada a associação em série, a corrente que atravessa um determinado braço do conversor é a mesma para todos os seus submódulos.
- A corrente através de cada braço do conversor é determinada pela tensão CA gerada pela modulação das tensões CC de seus submódulos.
- Em regime, as tensões CC totais nos braços devem ser iguais e devem estar distribuídas igualmente entre os submódulos de cada braço.

Estas características do modelo determinam os objetivos básicos do sistema de controle do conversor:

- Produzir um índice de modulação que sintetize as tensões CA em cada braço necessárias para injetar as correntes definidas por uma referência.
- Como não há um Barramento CC comum aos três braços, regular as tensões CC individuais dos submódulos do conversor mantendo a equalização entre elas.

1.1. Estratégias de Modulação

A escolha da estratégia de modulação tem influência direta na arquitetura de controle e na qualidade (conteúdo harmônico, erro de rastreamento de amplitude e fase) da corrente injetada pelo conversor. Diferentes estratégias têm sido desenvolvidas e estudadas buscando atender necessidades variadas. Em [13] os autores apresentam uma revisão dessas estratégias agrupando-as como descrito a seguir:

Estratégias Baseadas em Vetores Espaciais (SVM - *Space Vector Modulation*, SVC - *Space Vector Control*)

Quando realizada através de uma simples extensão da estratégia desenvolvida para conversores convencionais, de dois níveis, sua utilização em conversores multinível sofre com um aumento expressivo na complexidade e na carga computacional trazida por operações trigonométricas e pelo uso de tabelas de valores pré-definidos (*Look-Up Tables*). Contudo, o desenvolvimento de estratégias mais adequadas às topologias multinível produz algoritmos de menor complexidade, que demandam menos capacidade computacional, tendo desempenho comparável a outras estratégias mais comumente utilizadas. Um exemplo é a técnica de modulação 3D (3D-SVM) que se adequa à operação em condições de desbalanço e permite o balanceamento das Tensões CC dos submódulos.

Estratégias Baseadas em Nível de Tensão (*Voltage Level*)

Neste grupo as estratégias são divididas de acordo com a frequência de chaveamento com que trabalham.

Entre as estratégias que trabalham com chaveamento na frequência natural da rede estão as conhecidas pelas siglas SHE (*Selective Harmonic Elimination*) e NLC (*Nearest Level Control*). Ambas têm aplicação em sistemas de alta tensão que utilizam muitos submódulos (níveis). A estratégia SHE reduz significativamente perdas de chaveamento, mas tem aplicação limitada dada a complexidade de implementação

(uso de tabelas, interpolações) que cresce na medida que cresce o número de níveis no conversor. A estratégia NLC é a mais comumente utilizada. Faz uso de algoritmos simples (*sorting & selection*) que, a cada intervalo de amostragem, ordenam submódulos de acordo com seu nível de tensão CC e selecionam aqueles que, conectados ao circuito dos braços do conversor, produzam o nível de tensão mais próximo possível da referência rastreada. Esse processo de ordenação e seleção também permite o balanceamento das tensões CC dos submódulos.

Modulando portadoras múltiplas, e produzindo sinais PWM multinível de frequência elevada, encontram-se a estratégia em que o sinal PWM multinível é obtido através da modulação de portadoras defasadas entre si (PS-PWM – *Phase Shift PWM*) e as estratégias onde o sinal é obtido através da modulação de portadoras deslocadas em nível (LS-PWM – *Level Shift PWM*) com diferentes arranjos de fase (PD-PWM – *Phase Disposition PWM*; POD-PWM – *Phase Oppositon Disposition*; APOD – *Alternative Phase Opposition Disposition*).

Entre essas estratégias, a modulação PS-PWM é a mais comumente utilizada em conversores multinível de média/baixa potência por promover um melhor balanceamento na utilização dos submódulos e produzir um sinal multinível com um conteúdo harmônico menor, especialmente em sistemas com um maior número de níveis (>5) [14][15]. Essas estratégias de modulação não garantem a equalização individual das tensões CC dos submódulos e requerem estratégias dedicadas para isso, sejam elas na forma de um mecanismo de ordenação e seleção de submódulos (no caso de LS-PWM) ou de malhas fechadas de controle (no caso de PS-PWM) impondo ajustes individuais às referências de tensão dos braços do conversor.

Um último grupo reúne estratégias híbridas (*Hybrid Modulation*) aplicadas a arquiteturas que combinam, nos braços do conversor, submódulos que operam com níveis diferentes de tensão/potência. Tais estratégias aplicam métodos de baixa frequência de chaveamento em submódulos de alta potência e de alta frequência nos submódulos de baixa potência buscando diminuir perdas com chaveamento e melhorar a eficiência do sistema [16][31].

A Tabela 1.1, baseada em [13], relaciona topologias de conversores modulares multinível às estratégias de modulação citadas neste item.

Tabela 1. 1 – Topologias de Conversores Multinível x Estratégias de Modulação
(baseada em [13])

Estratégias de Modulação	Topologias		
	DCMCs	FCMCs	CHBs ³
SVM	A	A	A
SVC	NR	A	A
LS-PWM	A	A	NR
PS-PWM	NA	A	A
Hybrid	NA	NA	A
SHE	A	A	A
NLC	NR	A	A

A – Aplicável

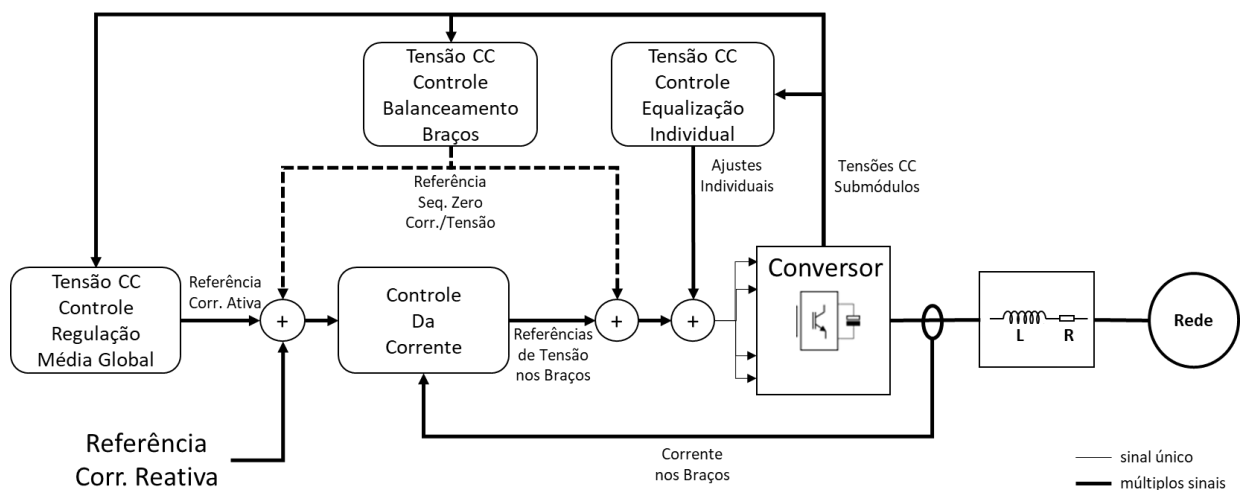
NA – Não Aplicável

NR – Não Recomendada

Neste trabalho a estratégia de modulação utilizada é a PS-PWM por, como já comentado, promover um melhor balanceamento na utilização dos submódulos e produzir um sinal multinível com um menor conteúdo harmônico.

O arranjo apresentado na Figura 1.2 é a base para várias arquiteturas de controle que empregam a modulação PS-PWM [11][21] e será objeto de estudo neste trabalho.

Figura 1. 2 – MMCC – Blocos de Controle



Fonte: Próprio autor

³ O termo CHB aplica-se a topologias MMCC de 3 fios baseadas em Pontes-H completas (Full HB).

O arranjo prevê uma malha interna que controla a corrente injetada, e malhas externas voltadas para a regulação e balanceamento das tensões CC. A análise a seguir procura identificar diferentes abordagens de implementação deste arranjo.

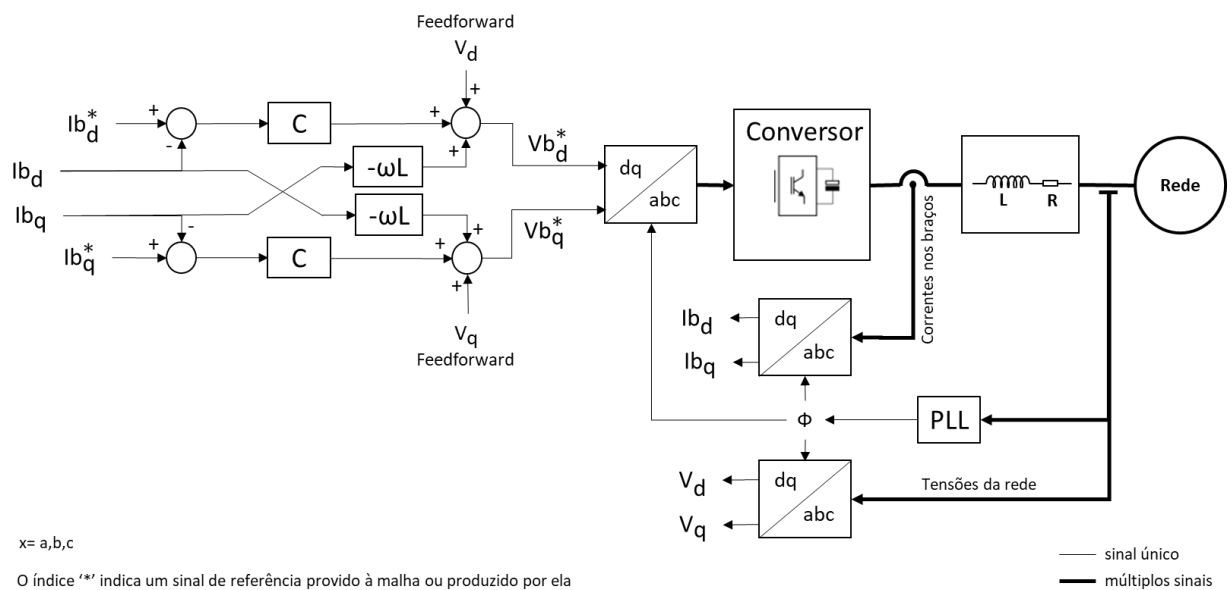
1.2. Controle da Corrente

O controle da corrente injetada pelos conversores MMCC nas topologias Y(SSBC) e Δ(SDBC) tem uma estrutura parecida com a utilizada em conversores convencionais de 2 níveis. A malha rastreia uma referência que combina uma componente externa, que, no caso dos STATCOMs, é reativa e outra interna que impõe corrente ativa necessária para a compensação de perdas no sistema. Dependendo da topologia a malha interna também pode injetar corrente de sequência zero para o balanceamento das tensões CC nos braços. Em suas saídas obtém-se as referências das tensões a serem produzidas pelos braços do conversor.

A malha interna pode operar em diferentes sistemas de coordenadas (síncrono - dq, estacionário - αβ, natural - abc). Em [17] faz-se uma revisão das arquiteturas de controle baseadas em cada um desses sistemas.

O controle no sistema de referências síncrono, dq, tem sua estrutura apresentada na Figura 1.3.

Figura 1. 3 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema dq



x= a,b,c
 O índice '*' indica um sinal de referência provido à malha ou produzido por ela

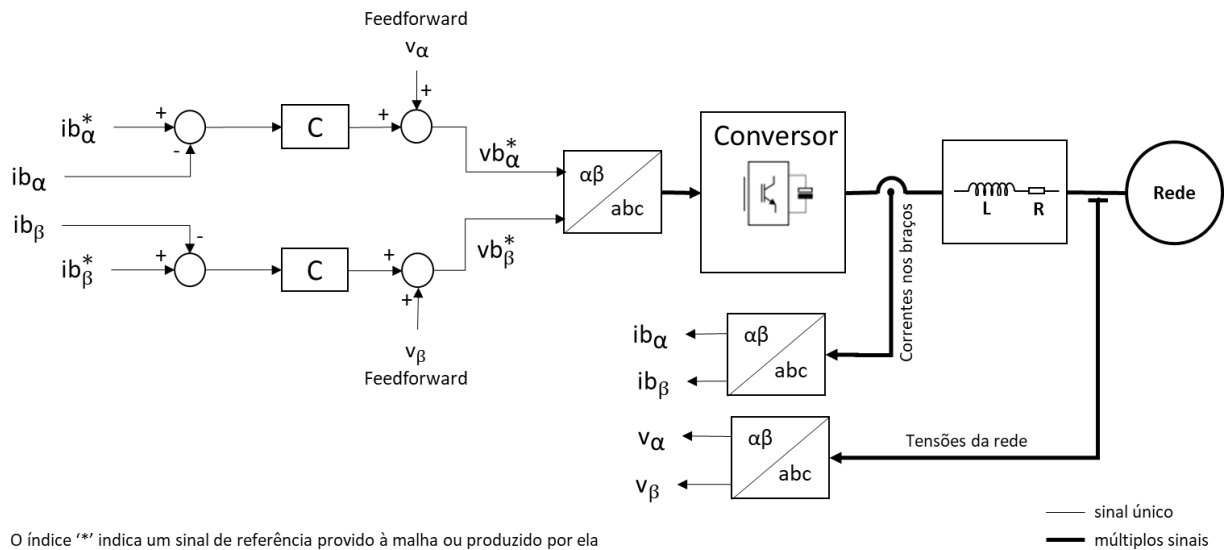
Fonte: Próprio autor

- Em um sistema balanceado, i_{b_d} e i_{b_q} são vistas como níveis CC o que permite a eliminação de erros de rastreamento em regime, mesmo com a utilização de controladores mais simples ($C = PI$). Em um sistema desbalanceado essa premissa não é válida e torna-se necessário agregar mais complexidade ao desenho da malha para que tenha condições de lidar com componentes de sequência negativa.
- Na entrada, é necessária a transformação⁴ dos sinais de tensão da rede e da corrente nos braços do conversor do sistema natural, abc , para o sistema dq . Na saída, as referências de tensão dos braços, $V_{b_d}^*$ e $V_{b_q}^*$ precisam passar por uma transformação inversa para que voltem ao sistema natural.
- As transformações necessárias requerem a informação de frequência e fase da tensão da rede representada pelo sinal ϕ na Figura 1.3.
- O distúrbio gerado pela tensão da rede precisa ser eliminado via uma malha de *feedforward*. A mesma abordagem precisa ser adotada para eliminar o acoplamento cruzado gerado pela queda de tensão na indutância, L , do circuito de acoplamento.

Estruturas de controle operando no sistema síncrono são bastante comuns. Como exemplos, o sistema de controle apresentado em [18] utiliza a estrutura aqui apresentada. Em [19] o sistema utiliza um DVCC (*Dual Vector Current Controller*) que duplica a estrutura apresentada para controlar separadamente a injeção de corrente de sequência positiva e negativa na rede.

A estrutura de controle no sistema estacionário, $\alpha\beta$, é apresentada na Figura 1.4.

⁴ Transformação de Park: vide [32]

Figura 1. 4 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema $\alpha\beta$ 

Fonte: Próprio autor

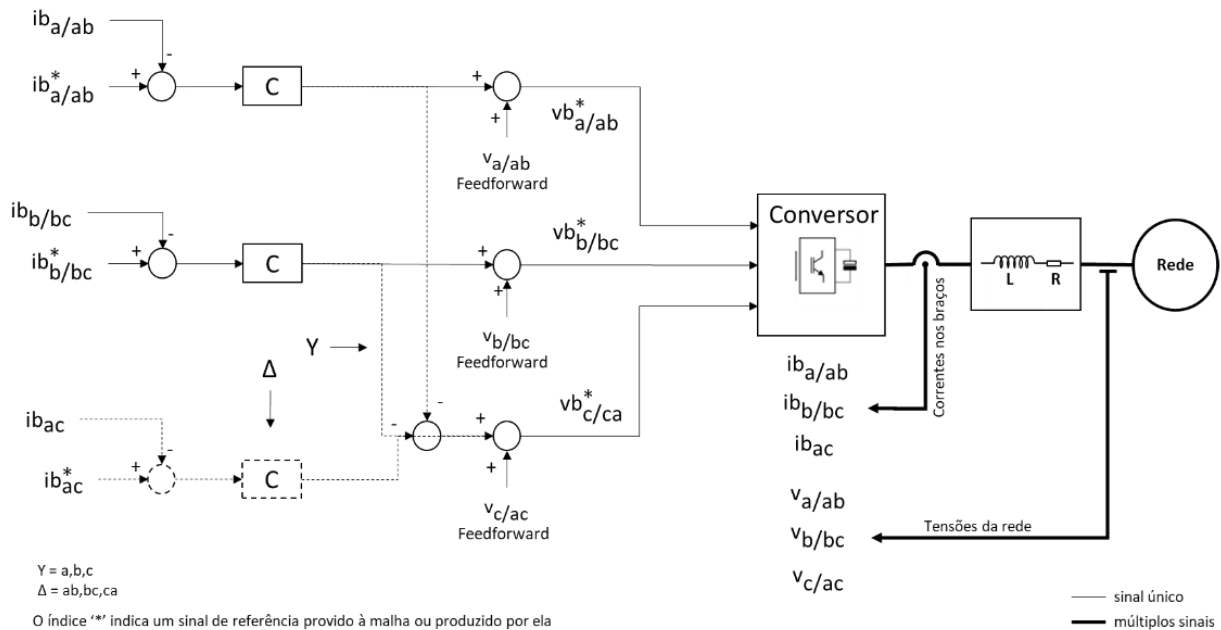
- As variáveis controladas são senoidais. Para a eliminação de erros de rastreamento é necessária a utilização de controladores do tipo P-Ressonante ($C = PR$) [33]. O uso de controladores PI é possível desde que as condições de projeto permitam a existência de um certo nível de erro de rastreamento (amplitude e fase) em regime. O desempenho da malha não é afetado pela presença de sequência negativa na corrente injetada.
- Não há acoplamento entre as malhas α e β , mas o distúrbio causado pela rede está presente e precisa ser eliminado via uma malha de *feedforward*.
- Na entrada, é necessária a transformação⁵ dos sinais da tensão da rede e da corrente nos braços do conversor do sistema natural, abc , para o sistema $\alpha\beta$. Na saída, as referências de tensão nos braços, vb_{α}^* e vb_{β}^* precisam passar por uma transformação inversa para que voltem ao sistema natural.

Arquiteturas de controle operando no sistema estacionário $\alpha\beta$ não são comuns quando comparadas ao sistema dq . Entre as referências pesquisadas [11] baseia o trabalho nesse sistema. Em [33] os autores combinam, em conversores tradicionais de dois níveis, o controle no sistema estacionário $\alpha\beta$ com a estratégia de modulação baseada em vetores espaciais o que elimina a necessidade da transformação para o sistema abc na saída da Malha de Corrente.

⁵ Transformação de Clarke: vide [32]

A estrutura de controle no sistema natural, abc, é apresentada na Figura 1.5.

Figura 1.5 – MMCC – Controle da Corrente no Sistema abc



Fonte: Próprio autor

- Toda a implementação é realizada no sistema natural de coordenadas. Não há necessidade de transformações entre sistemas.
- Na configuração Y(SSBC), a três fios, o sistema pode trabalhar impondo apenas duas tensões de referência para injetar as três correntes (a terceira é uma combinação linear das outras duas). Apenas dois controladores são necessários. Na configuração Δ (SDBC), como três correntes podem ser injetadas independentemente, três controladores são requeridos.
- As variáveis controladas são senoidais. Para a eliminação de erros de rastreamento é necessária a utilização de controladores do tipo P-Ressonante ($C = PR$). O uso de controladores PI é possível desde que as condições de projeto permitam erros de rastreamento (amplitude e fase) em regime. O desempenho da malha não é afetado pela presença de sequência negativa na corrente injetada.
- Não há acoplamento entre as malhas a, b (Y) ou ab, bc, ca (Δ). A eliminação do distúrbio gerado pela tensão da rede via uma malha de *feedforward* é necessária.

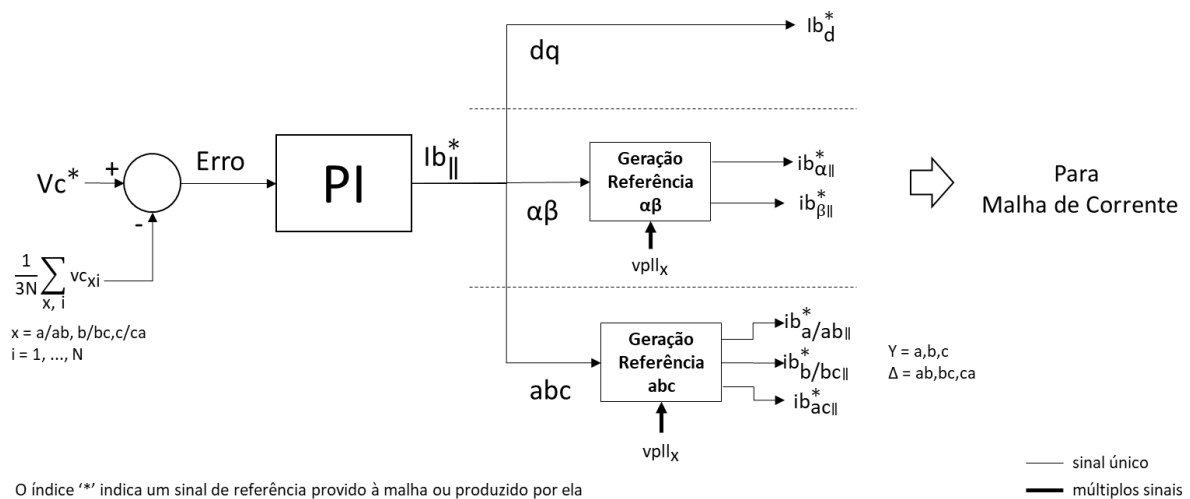
1.3. Regulação e Balanceamento das Tensões CC nos Braços do Conversor

Na operação como STATCOM, numa condição ideal (sistema balanceado e sem perdas), as potências médias trifásica e em cada braço do conversor são nulas. Como não há fluxo de potência ativa entre conversor e rede as tensões CC nos capacitores dos submódulos não sofrem alterações e não há necessidade de um controle para garantir regulação e balanceamento dessas tensões.

Contudo, na condição real, perdas em dispositivos de chaveamento, tolerâncias nas características de componentes, estão naturalmente presentes e, especialmente quando o STATCOM é levado a compensar desbalanços (presença de sequência negativa na tensão ou corrente), haverá fluxo de potência ativa entre conversor e rede alterando as tensões CC.

Para garantir regulação e balanceamento das tensões CC nessas condições o sistema de controle costuma ser dividido em duas malhas que trabalham em paralelo como mostrado anteriormente na Figura 1.2. Nela identifica-se uma primeira malha que regula a Média Global das tensões CC detalhada na Figura 1.6.

Figura 1. 6 – Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC



Fonte: Próprio autor

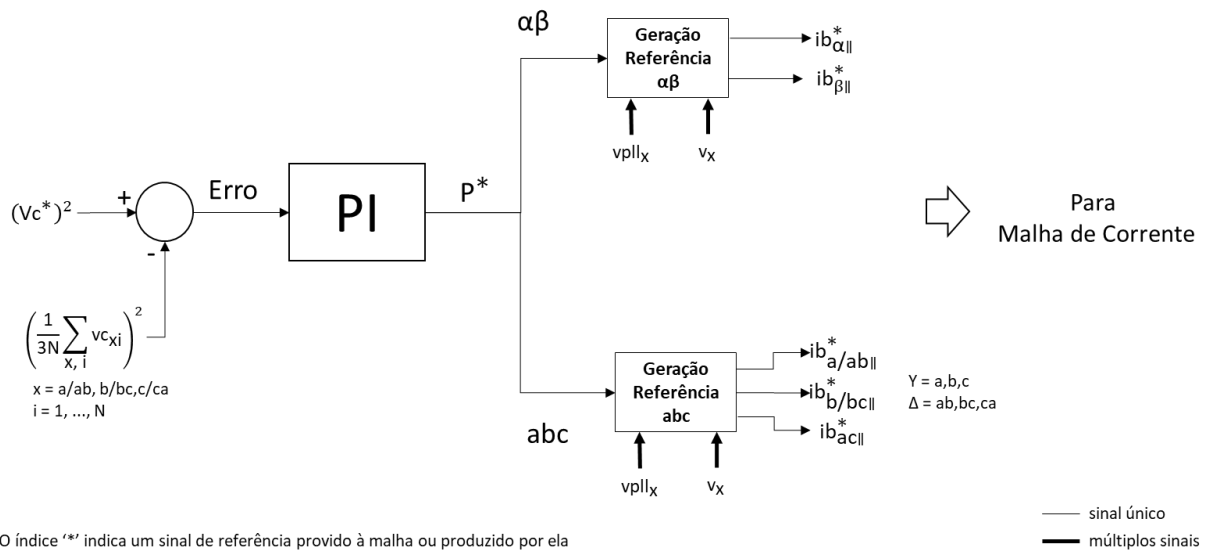
Um aspecto importante a ser notado é que as tensões CC não são controláveis diretamente. Seu controle se dá de forma indireta, através da injeção de corrente ativa.

A malha amostra as tensões CC dos submódulos e compara sua média, $\frac{1}{3N} \sum_{x, i} v_{C_{xi}}$, a uma referência fixa, V_c^* . Um controlador produz, a partir do erro observado, uma

referência de corrente ativa a ser injetada pela Malha de Corrente. A corrente ativa injetada pela Malha de Corrente carrega ou descarrega os capacitores mantendo a média de suas tensões em linha com a referência, V_c^* . Nos sistemas $\alpha\beta$ e abc , a saída do controlador, $I_{b\parallel}^*$, precisa ser convertida para o respectivo sistema de coordenadas. Essa conversão requer um sinal, v_{pll_x} , de mesma frequência e fase da tensão da rede indicado na figura.

A variável costumeiramente controlada é a própria média das tensões CC [19][21][22][29] o que simplifica a implementação quando a arquitetura de controle está baseada no sistema dq. No entanto, a variável de controle pode estar relacionada com outra grandeza que represente as tensões CC como é o caso de [11] que trabalha com o quadrado das tensões CC. Nesse caso, o que se obtém na saída do controlador é um sinal, P^* , proporcional à potência média necessária a ser drenada ou entregue à rede a partir do qual se extrai uma referência de corrente ativa para a Malha de Corrente como mostra a Figura 1.7.

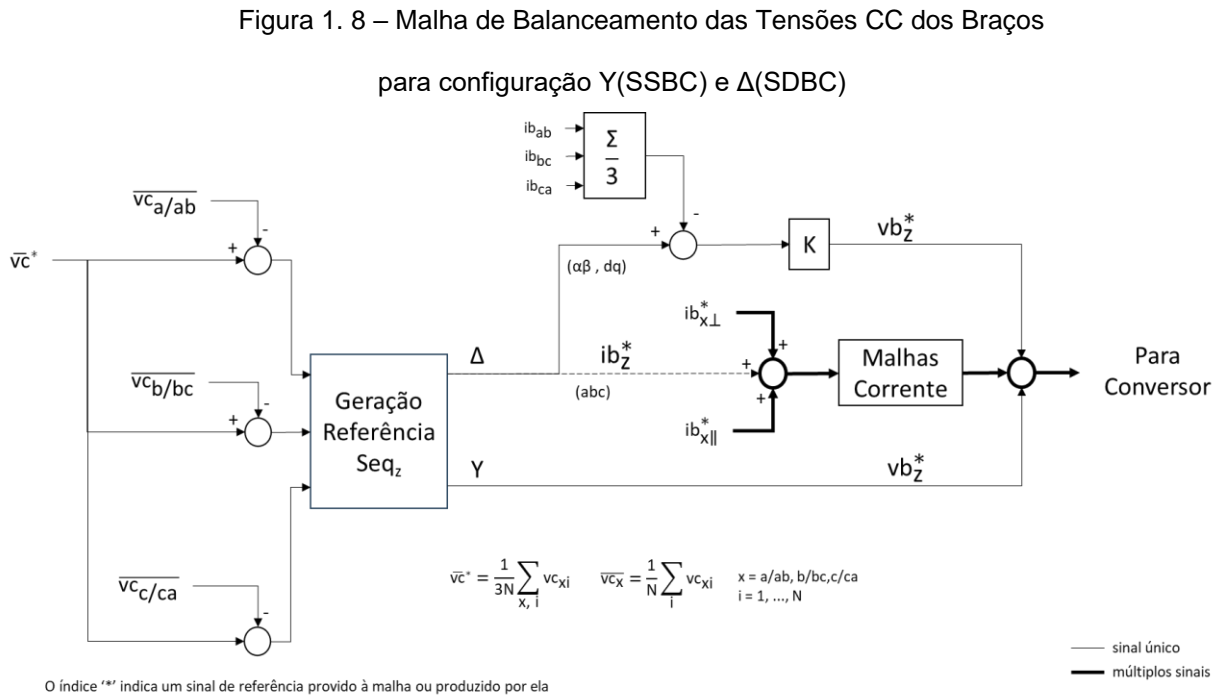
Figura 1. 7 – Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC variáveis de controle baseadas no quadrado das tensões CC



Fonte: Próprio autor

O balanceamento das tensões CC nos braços do conversor é realizado por uma segunda malha (vide Figura 1.2). A estratégia utilizada consiste na injeção de tensão de sequência zero, na configuração Y(SSBC), e de corrente de sequência zero, na configuração Δ (SDBC), para habilitar o fluxo de potência ativa nas fases, de forma individual, mantendo nula a potência média trifásica. A Malha de Balanceamento tem

como referência a tensão CC média, $\overline{v_c^*}$, regulada pela Malha de Regulação da Média Global. As tensões médias de cada braço, $\overline{v_{ca/ab}}$, $\overline{v_{b/bc}}$, $\overline{v_{ca/ca}}$, são comparadas à Média Global e, a partir do erro obtido, um sinal de referência de sequência zero, ib_z^* ou vb_z^* é produzido como mostra a Figura 1.8⁶.



Fonte: Próprio autor

Vários são os métodos para determinar a referência de sequência zero necessária para garantir o balanceamento.

Em [20] faz-se uma revisão abrangente de diferentes estratégias de balanceamento aplicadas a STATCOMs e sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS – *Battery Energy Storage Systems*). Entre as referências citadas no estudo, algumas servem de base para a arquitetura de controle estudada neste trabalho [21] e para a elaboração e comparação de resultados de parte das simulações realizadas no Capítulo 7 [19][22][23].

⁶ Na configuração Y a 3 fios o sinal de sequência zero é necessariamente de tensão e se soma aos sinais de tensão de referência produzidos pela Malha de Corrente. Na configuração Δ , operando no sistema abc, pode-se injetar um sinal de referência de corrente de sequência zero a ser somado às referências de corrente ativa e reativa da Malha de Corrente. Nos sistemas dq ou $\alpha\beta$ é necessária a adição de uma malha de atuação paralela (usualmente com controlador P) para produzir um sinal de tensão de sequência zero a partir do sinal de corrente gerado.

Em [21] uma estratégia de controle, aplicada a um STATCOM baseado na configuração Δ (SDBC), estabelece um método instantâneo e relativamente simples para geração do sinal de corrente circulante que habilita o balanceamento das tensões CC dos braços do conversor.

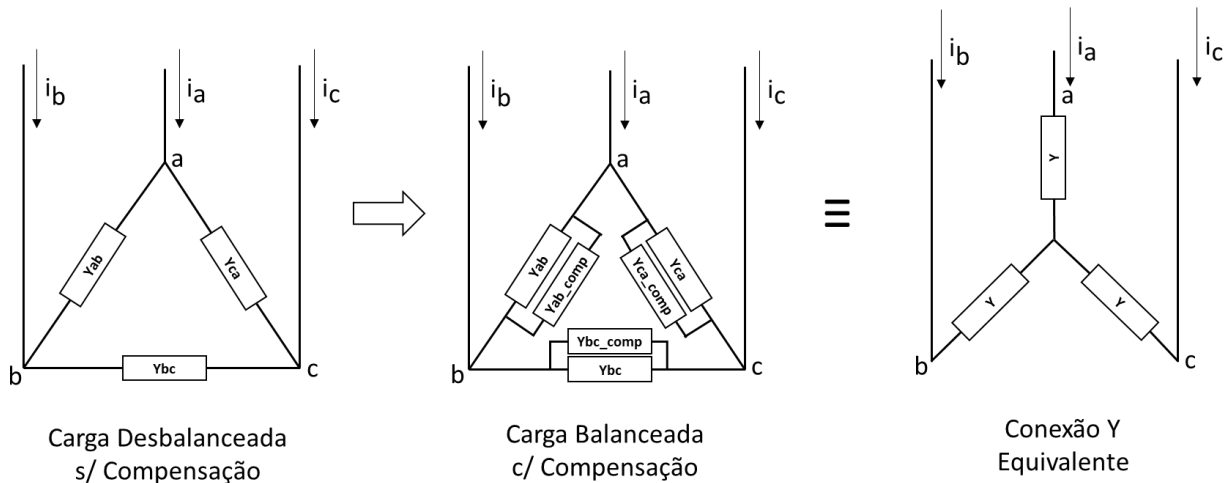
Em [19] o estudo investiga a capacidade de conversores Y(SSBC) e Δ (SDBC) injetarem corrente de sequência negativa na rede utilizando a imposição de tensão de sequência zero, na configuração Y(SSBC) e a injeção de corrente de sequência zero, na configuração Δ (SDBC), para manter o balanceamento das tensões CC nos braços do conversor. Uma solução geral para a determinação da amplitude e fase do sinal de sequência zero é definida e mostra que a amplitude desse sinal cresce de forma acelerada e tende ao infinito quando a proporção de sequência negativa e positiva, na corrente injetada, no caso Y(SSBC), e na tensão da rede, no caso Δ (SDBC), é a mesma (1:1).

Em [22], os erros nas tensões CC em cada braço do conversor são convertidos (transformação de Clarke) para o sistema $\alpha\beta$. A partir das magnitudes obtidas na transformação o método calcula a amplitude e fase do sinal de tensão de sequência zero a ser imposto⁷. Em [23] o sistema de controle é, então, submetido a condições de afundamento total de tensão nas três fases da rede (*ZVRT – Zero Voltage Ride Through*) e avalia-se capacidade do sistema de manter a injeção de corrente e o balanceamento das tensões CC dos braços por um período pré-determinado.

Importante mencionar que, embora a injeção de sequência zero seja a base para muitas das estratégias de balanceamento das tensões CC, há métodos alternativos, como o apresentado em [24][34] em que a compensação do desbalanceamento se dá através da injeção de corrente reativa para compensar o descasamento de admitâncias entre as fases e produzir um circuito equivalente equilibrado como mostra a Figura 1.10. Como a corrente injetada é puramente reativa, a potência média trifásica é nula e, como as admitâncias do sistema resultante estão equilibradas, também não há fluxo de potência em cada fase individualmente o que garante o balanceamento das tensões CC.

⁷ Os autores alertam que o método proposto tem uma área limitada de atuação.

Figura 1. 9 – Compensação de Desbalanço Através da Adição de Rede Reativa



Fonte: Próprio autor – Baseada em [24]

Um outro aspecto a ser notado na implementação das malhas de Regulação da Média e Balanceamento das tensões CC é a utilização de filtros para atenuação do *ripple* de 2ª harmônica presente nas tensões CC [21][22].

No item 6.2.1 deste trabalho a análise realizada mostra que, na malha de Regulação da Média Global, a atenuação do *ripple* é importante para evitar a introdução de componentes de 3ª harmônica na corrente injetada. Nas malhas de Balanceamento a atenuação do *ripple* é chave para evitar a introdução da componente de 3ª Harmônica no sinal de sequência zero produzido e com isso reduzir a faixa dinâmica de operação do conversor.

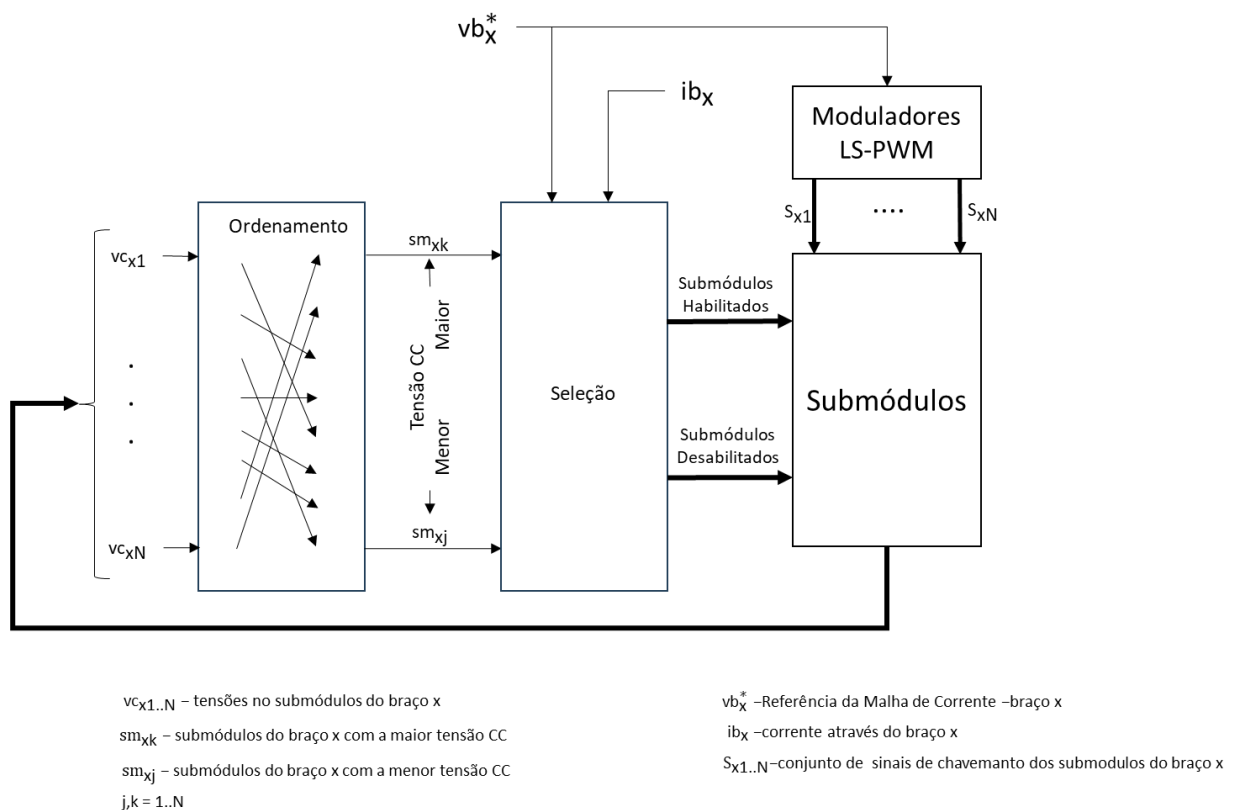
1.4. Equalização Individual das Tensões CC nos Submódulos dos Braços

Em arquiteturas que utilizam modulação baseada em portadoras (LS-PWM e PS-PWM), a regulação da média global e o balanceamento das tensões CC nos braços não garantem uma distribuição uniforme da tensão CC entre os submódulos que compõe cada braço do conversor. Portanto, um método que realize essa distribuição, usualmente chamado de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos, é necessário.

Em conversores onde as portadoras encontram-se deslocadas em nível (LS-PWM), a utilização dos submódulos não é uniforme e mecanismos de ordenamento e seleção (*sorting/selection*) são utilizados (Figura 1.10). O algoritmo utilizado precisa ter a capacidade de, periodicamente, amostrar as tensões CC de cada submódulo, ordená-los pelo nível de tensão CC apresentado, monitorar o sentido da corrente no braço e

fazer a conexão apropriada dos submódulos para produzir a tensão de braço requerida pelas malhas de corrente. Dessa forma, quando a corrente é positiva, os submódulos apresentando as menores tensões CC são selecionados para compor a tensão do braço e terem seus capacitores carregados. Quando a corrente é negativa, os submódulos com as maiores tensões CC são selecionados para a composição da tensão do braço e terem seus capacitores descarregados. Dessa forma a tensão em cada submódulo tende a se manter alinhada com a tensão CC média do braço de que faz parte. Um estudo comparativo de estratégias usadas para ordenar e selecionar os submódulos de um conversor multinível modular em função das tensões CC dos seus capacitores é realizado em [35].

Figura 1. 10 – Equalização Individual - Mecanismo de Ordenamento e Seleção

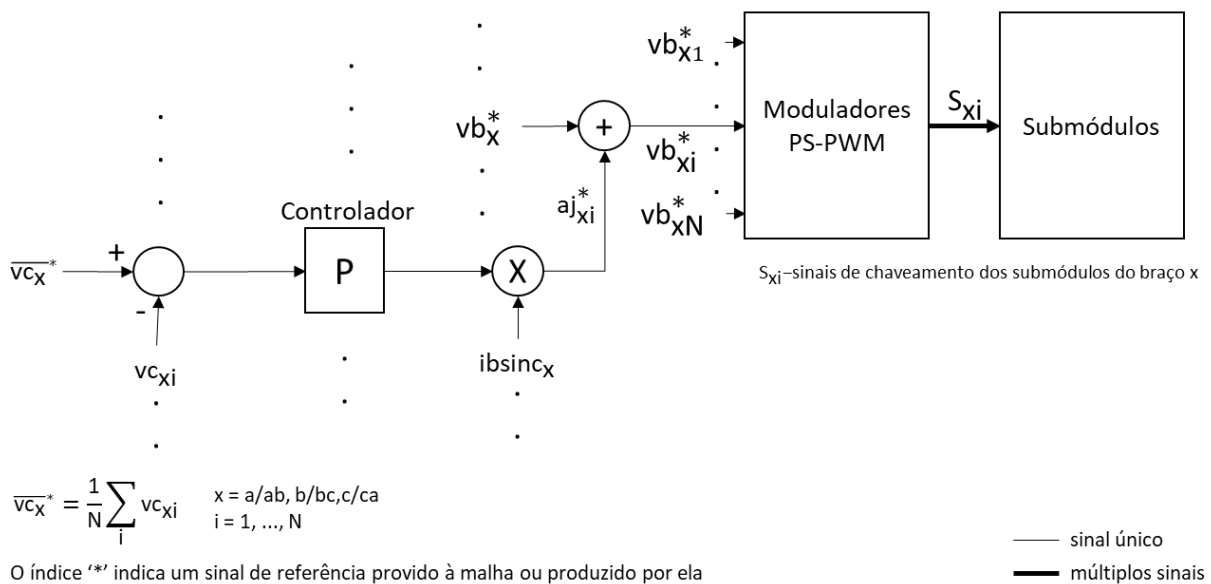


Fonte: Próprio autor

A modulação por deslocamento de fase das portadoras (PS-PWM) promove uma utilização balanceada dos submódulos e malhas de controle relativamente simples são suficientes para garantir os pequenos ajustes necessários para manter as tensões CC equalizadas. Como mostra a Figura 1.11, malhas individuais, normalmente equipadas com controladores do tipo P (Proporcional), comparam a tensão CC do

submódulo, $V_{c_{xi}}$, à tensão CC média do braço, $\overline{v_{c_x^*}}$. As saídas dos controladores modulam um sinal unitário com a mesma frequência e fase da corrente através do braço, i_{bsinc_x} , produzindo sinais de ajuste individual, $a_{j_{xi}^*}$, que são somados à referência de tensão de braço, $v_{b_x^*}$, proveniente da Malha de Corrente, gerando sinais individuais ajustados, $v_{b_{xi}^*}$, para cada submódulo do braço. Dessa forma, promove-se um balanceamento da potência média dissipada em cada submódulo levando suas tensões CC ao nível médio de referência. Importante notar que o uso da tensão CC média como referência é base para que a ação de equalização não introduza alterações na tensão, v_{b_x} , produzida nos braços e, com isso, distorções/distúrbios na corrente injetada.

Figura 1. 11 – Malhas de Equalização Individual (apenas uma malha apresentada por completo)



Fonte: Próprio autor

A imposição de um ajuste de tensão em fase com a corrente injetada, como descrito acima, consiste na estratégia mais comumente adotada para a equalização individual. Em [25] essa estratégia é comparada, e considerada mais vantajosa, em relação a outras duas alternativas que atuam apenas no ajuste individual da amplitude ou fase do sinal modulador proveniente das malhas de corrente.

O aumento do número de níveis empregados no conversor impõe um desafio para a estratégia de equalização individual na medida que cresce o número de sensores

necessários para a detecção das tensões CC e toda a complexidade associada (conexão física, conversão A/D, processamento). Buscando contornar esse desafio, estudos propõem arquiteturas que dispensam o uso de sensores através de métodos de detecção indireta das tensões CC que se apoiam na relação existente entre o método de modulação (PS-PWM), a tensão CA produzida e as próprias tensões CC nos capacitores como em [26] ou, então, em hardware adicional (*Balancing Arms*) que permite conectar submódulos adjacentes e promover o balanceamento de carga dos seus capacitores [27].

A equalização das tensões na ausência de corrente injetada também constitui um aspecto limitante das estratégias que realizam a equalização através do balanço de potência entre os submódulos do braço. Para contornar essa limitação surgem estratégias variadas que envolvem alterar a Média Global das tensões CC e, com isso, provocar a drenagem ou injeção de corrente ativa por parte do conversor que, então, permite a ação das malhas de equalização. Exemplos de aplicação são encontrados em [28] que conecta cargas controladas ao lado CC dos submódulos, em [29] que altera o *dead-time* no chaveamento dos submódulos ou ainda em [30] que impõe uma variação de baixa frequência na referência de Tensão CC da Malha de Regulação da Média.

2. Organização do Trabalho

2.1. Objetivos

Este trabalho explora o controle Conversores Modulares Multinível em Cascata (MMCCs – *Modular Multilevel Cascaded Converters*) para compensação de reativos de sequência positiva e negativa. Não tem a pretensão de tratar de temas inovadores ou avançados (novas arquiteturas, novos controladores, otimizações). Sua motivação tem mais a ver com sistematização, com a proposição de um roteiro que facilite o estudo e entendimento do tema explorando conceitos que servem de base para a organização e projeto de arquiteturas de controle do conversor MMCC operando neste tipo de aplicação.

Nessa linha o trabalho se propõe a:

- Estudar o efeito das componentes simétricas das tensões e correntes em cada braço do conversor:
 - Na potência ativa total e seu impacto na soma das tensões CC do MMCC
 - Na potência ativa em cada braço e seu impacto na soma das tensões CC por braço
- Discutir arquiteturas de controle para conversores Y (SSBC) e Δ (SDBC), à luz do estudo dos efeitos das componentes simétricas nas potências.
- Obter modelos linearizados e simplificados que permitam o projeto das diversas malhas de controle em tempo contínuo e propor um método para ajuste de controladores.
- Validação dos modelos e avaliação do desempenho das arquiteturas de controle apresentados através de simulações numéricas.

O estudo se concentra nas topologias Y (SSBC) e Δ (SDBC) e tem os seguintes balizadores para suas arquiteturas de controle:

- A modulação PWM com portadoras triangulares deslocadas em fase (PS-PWM) buscando uniformizar a frequência de chaveamento e o balanceamento da utilização/esforços dos submódulos que compõem os braços do conversor.
- Diferente de implementações mais comuns em que o controle da corrente injetada se dá no sistema de referência síncrono, dq, todo o sistema de controle

opera no sistema natural de coordenadas, abc, buscando avaliar o desempenho da arquitetura e identificar deficiências que justifiquem sua pouca utilização.

2.2. Estrutura

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema abordado apontando referências que apoiaram o desenvolvimento do trabalho.

Este Capítulo 2 apresenta os objetivos do trabalho e a organização do documento.

O Capítulo 3 realiza um estudo dos efeitos das componentes simétricas da tensão e corrente sobre a potência ativa produzida nos braços do conversor e discute como tais efeitos afetam as tensões nos barramentos CC do conversor e podem ser utilizados em estratégias para a sua regulação e balanceamento.

O Capítulo 4 propõe e descreve arquiteturas de controle para cada topologia estudada (SSBC e SDBC) baseadas na discussão realizada no Capítulo 3.

O Capítulo 5 desenvolve modelos matemáticos simplificados e linearizados no tempo contínuo para o controle da Corrente Injetada e Regulação e Balanceamento das tensões CC, seja de forma agrupada, nos braços do conversor, como individual, nos submódulos que compõem cada um dos referidos braços.

O Capítulo 6 realiza o projeto das malhas de controle fazendo uso dos modelos desenvolvidos no Capítulo 5. Aborda a escolha de controladores e propõe métodos para cálculo dos seus ganhos.

O Capítulo 7 realiza simulações com o objetivo de validar a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos e avaliar o desempenho das arquiteturas propostas em condições de operação variadas, com e sem desbalanço (presença de sequência negativa na corrente injetada e/ou na tensão da rede).

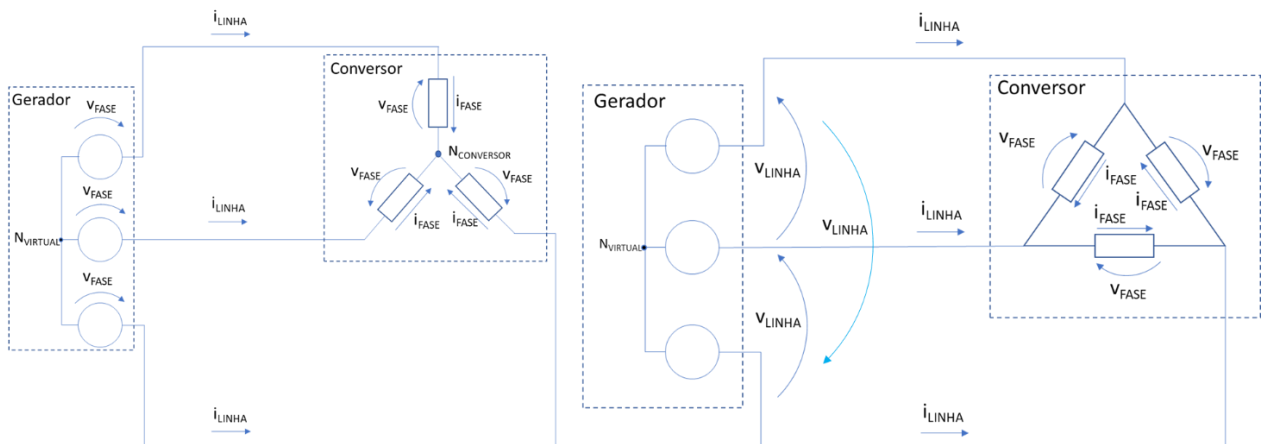
O Capítulo 8 apresenta conclusões finais e possibilidades para futuros trabalhos.

2.3. Definições e Notações

Neste item são definidos símbolos, termos e notações utilizados ao longo do documento.

O conjunto que inclui a rede de transmissão trifásica e conversores conectados a ela nas configurações Y a 3 fios ou Δ , como mostra a Figura 2.1, será chamado de Sistema ou Sistema Trifásico.

Figura 2. 1– Sistema Trifásico



Fonte: Próprio autor

Com relação às tensões e correntes observadas no sistema define-se:

Tabela 2. 1 – Definições – Tensões e Correntes de Fase e Linha

Tensão de Fase	Tensão medida entre um dos terminais do Gerador ou Conversor e o respectivo ponto neutro (N_{VIRTUAL} ou $N_{\text{CONVERTOR}}$).
Tensão de Linha	Tensão medida entre dois condutores da linha de transmissão ou, também, a tensão medida entre dois terminais do Gerador ou Conversor, desde que nenhum desses terminais seja o neutro (N_{VIRTUAL} ou $N_{\text{CONVERTOR}}$).
Corrente de Fase	Corrente através de uma das bobinas do Gerador ou de um dos bipolos representando braços do Conversor.
Corrente de Linha	Corrente através dos condutores da linha de transmissão.

No que tange a condição de operação do sistema e perdas nele observadas define-se:

Tabela 2. 2 – Definições – Condições de Operação do Sistema

Sistema Balanceado	Um sistema onde tensões e correntes de linha são senoidais, de mesma amplitude e defasadas em $\frac{2\pi}{3}$ rad ou 120°. É o que, na literatura, também é chamado de Sistema Simétrico Equilibrado.
Sistema Desbalanceado	Um sistema onde a condição acima não é atendida.
Perdas ⁸ Equilibradas	Perdas nos braços do conversor são iguais e, Perdas nos circuitos de acoplamento à rede são iguais.
Perdas Desequilibradas	Perdas nos braços ou nos circuitos de acoplamento não são iguais.

Ainda no Sistema apresentado na Figura 2.1 o Conversor é o elemento a ser controlado.

Tabela 2. 3 – Definições – Partes da Arquitetura de Controle do Conversor A Tabela 2.3 apresenta termos que identificam partes da arquitetura de controle do conversor.

Tabela 2. 3 – Definições – Partes da Arquitetura de Controle do Conversor

Controle da Corrente	Conjunto de malhas que controlam a corrente injetada pelo conversor na rede
Controle da Tensão CC nos braços	Conjunto de malhas de controle que realizam a Regulação da Média Global e Balanceamento das tensões CC nos braços do conversor
Regulação da Média Global das tensões CC nos braços do conversor	Ação da malha que busca manter a média das tensões CC observadas nos submódulos que compõem os braços do conversor igual a uma referência externa fixa pré-determinada.
Balanceamento das tensões CC nos braços do conversor	Ação da malha que busca manter a média das tensões CC em cada braço do conversor igual à Média Global das tensões CC
Controle das Tensões CC Individuais dos submódulos ou Equalização Individual das Tensões CC nos submódulos.	Malhas de controle das tensões CC individuais de cada um dos submódulos que compõem cada braço do conversor

⁸ Perdas na linha de transmissão não são consideradas nesse estudo.

Os símbolos utilizados para identificar sinais/grandezas elétricas adotam o formato estabelecido abaixo. A Tabela 2.4 apresenta as regras de formação aplicadas.

$$I_{\text{comp}}^{\text{índice}}_{\text{subíndice}}$$

Tabela 2. 4 – Definições – Regras de Formação dos Símbolos de Sinais e Grandezas Elétricas

I	Identificador que caracteriza o sinal/grandezas. Composto de uma letra, maiúscula ou minúscula.	Identificadores mais comuns: I/i – Corrente V/v – Tensão P/p – Potência
comp	Complemento do identificador I. Tensões, correntes e potência da rede são os únicos sinais/grandezas que não possuem um complemento.	Complementos mais comuns: b – Relativo aos braços do conversor cc – Relativo ao lado CC do conversor
subíndice	Caracteres alfanuméricos ou gráficos que completam a caracterização do símbolo. Possui os caracteres necessários para garantir a caracterização precisa do sinal/grandezas e pode incluir as seguintes informações: - Sequência do sinal; - Fase/linha à qual pertence o sinal; - Posição física do sinal no braço do conversor; - Orientação de fase do sinal em relação à tensão da rede.	Subíndices mais comuns: Sequência: p (pos.), n (neg.), z (zero) Fase/Linha: a, b, c ou ab, bc, ca ou x onde x representa um conjunto de valores possíveis: x= a, b, c ou x= ab, bc, ca Posição Física: 1, 2, 3, ..., N ou i onde i representa um conjunto de valores possíveis: i=1,2, 3, ..., N Orientação de Fase: (em fase), ⊥ (em quadratura) Sinais PWM (multinível ou não): ≡
índice	Normalmente utilizado para identificar sinais de referência. Também pode ser utilizado para identificar sinais internos das malhas de controle.	* - Identifica um sinal de referência externa ou produzido pelo próprio sistema de controle do conversor. ' - Identifica um sinal das malhas de controle.

Ainda com relação ao formato dos símbolos deve-se observar os seguintes aspectos.

Tabela 2. 5 – Definições – Aspectos Adicionais dos Símbolos de Sinais e Grandezas Elétricas

Valores instantâneos	O identificador é formado por uma letra minúscula (i).
Valores CC, médios, de pico	O identificador é formado por uma letra maiúscula (I).
Fasor	O identificador é formado por uma letra maiúscula. Identificador e complemento sobrepostos por um ponto (I_{comp}).
Vetor	O identificador é formado por uma letra maiúscula. Identificador e complemento sobrepostos por uma seta (\vec{I}_{comp}).
Matriz	O símbolo é apresentado em negrito (I_{comp}^* _{subíndice})

A identificação de partes e componentes do conversor segue um formato equivalente.

$I_{d_{subíndice}}$

A Tabela 2.6 fornece os detalhes de formação dos campos de identificação e subíndice.

Tabela 2. 6 – Definições – Regras de Formação dos Símbolos de Componentes e Partes do Conversor

Id	Acrônimo que identifica o tipo de parte ou componente.	Acrônimos mais comuns: SM/sm – Submódulo C – Capacitor L – Indutor R - Resistor
subíndice	Caracteres alfanuméricos que completam a caracterização do símbolo. Possui os caracteres necessários para garantir a caracterização precisa da parte/componente e pode incluir as seguintes informações: - Fase/linha à qual pertence o componente; - Posição física do componente no braço do conversor.	Subíndices mais comuns: Fase/Linha: a, b, c ou ab, bc, ca ou x onde x representa um conjunto de valores possíveis: x= a, b, c ou x= ab, bc, ca Posição Física: 1, 2, 3, ..., N ou i onde i representa um conjunto de valores possíveis: i=1,2, 3, ..., N

3. Efeito das Componentes Simétricas de Tensão e Corrente nas Potências e nas Tensões CC

O controle das tensões CC no conversor está baseado no intercâmbio de potência ativa com o sistema ao qual está conectado e, também, entre os submódulos que compõem seus braços.

Em sistemas balanceados esse controle é relativamente fácil e se resume em compensar perdas, normalmente pequenas em relação à potência administrada, injetando ou drenando corrente ativa de sequência positiva na rede.

A operação em sistemas desbalanceados, no entanto, desestabiliza o fluxo de potência nos braços do conversor, o que compromete o equilíbrio e requer estratégias mais elaboradas para a regulação e balanceamento das tensões CC⁹.

Analisar como tensão e corrente, com suas componentes simétricas, afetam a potência injetada ou drenada pelo conversor (total e por braço) é base para a compreensão dessas estratégias de controle.

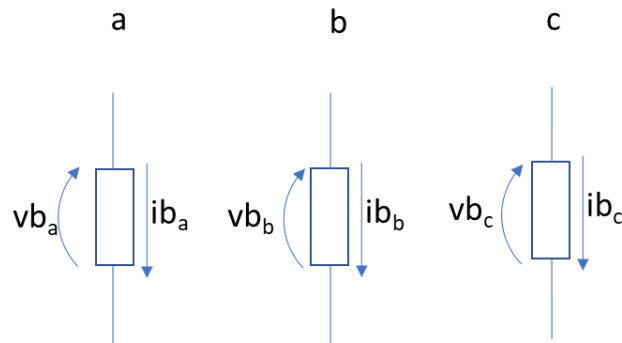
Neste capítulo, no item 3.1, analisa-se o comportamento da potência produzida pela combinação de tensão e corrente de mesma sequência ou sequências distintas observando e identificando as situações e condições em que há troca de energia com a rede. No item 3.2 verifica-se a possibilidade de aplicação de parte das combinações analisadas no controle da tensão CC nos braços e submódulos do conversor conectado à rede a três fios. O item 3.3 analisa a aplicação dos conceitos estudados na equalização das tensões CC dos submódulos de cada braço do conversor.

3.1. Comportamento da Potência Individual e Trifásica no Conversor

A Figura 3.1 apresenta três bipolos que representam os braços de um conversor independentemente da forma como se conectam à rede (Δ ou Y, 3 ou 4 fios).

⁹ Em conversores trifásicos com um barramento CC comum, não há preocupação com balanceamento da tensão CC uma vez que um único barramento serve os três braços. Inclusive, em sistemas a 3 fios a soma do desbalanço das potências é nulo o que, em princípio, não afeta a tensão CC. Em conversores com barramentos CC separados, como é o caso dos MMCCs, não há troca de energia pelo lado CC e o desbalanço de potência causa desequilíbrio entre as tensões CC dos braços do conversor.

Figura 3.1 – Bipolos Representando os Braços do Conversor



Fonte: Próprio autor

As tensões e correntes são decompostas em componentes de sequência positiva (índice p), negativa (n) e zero (z) notando que, para a simplificação da análise, apenas a corrente de sequência positiva é decomposta em suas componentes em fase (subíndice ||) e quadratura (subíndice ⊥) com a tensão da rede, conforme mostrado em (3.1) e (3.2).

$$\vec{Vb} = \begin{bmatrix} vb_a \\ vb_b \\ vb_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vb_{ap} \\ vb_{bp} \\ vb_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vb_{an} \\ vb_{bn} \\ vb_{cn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vb_z \\ vb_z \\ vb_z \end{bmatrix} = \vec{Vb}_p + \vec{Vb}_n + \vec{Vb}_z \quad (3.1)$$

$$\vec{Ib} = \begin{bmatrix} ib_a \\ ib_b \\ ib_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ib_{ap||} \\ ib_{bp||} \\ ib_{cp||} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ib_{ap\perp} \\ ib_{bp\perp} \\ ib_{cp\perp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ib_{an} \\ ib_{bn} \\ ib_{cn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ib_z \\ ib_z \\ ib_z \end{bmatrix} = \vec{Ib}_{p||} + \vec{Ib}_{p\perp} + \vec{Ib}_n + \vec{Ib}_z \quad (3.2)$$

A potência instantânea total é dada por:

$$p(t) = pb_a(t) + pb_b(t) + pb_c(t) \quad (3.3)$$

Reescrevendo (3.3) como produto escalar dos vetores de tensão e corrente obtém-se:

$$p(t) = vb_a ib_a + vb_b ib_b + vb_c ib_c = \vec{Vb} \cdot \vec{Ib} \quad (3.4)$$

$$p(t) = \vec{Vb}_p \cdot \vec{Ib}_{p||} + \vec{Vb}_p \cdot \vec{Ib}_{p\perp} + \vec{Vb}_p \cdot \vec{Ib}_n + \vec{Vb}_p \cdot \vec{Ib}_z + \vec{Vb}_n \cdot \vec{Ib}_{p||} + \vec{Vb}_n \cdot \vec{Ib}_{p\perp} + \vec{Vb}_n \cdot \vec{Ib}_n + \vec{Vb}_n \cdot \vec{Ib}_z + \vec{Vb}_z \cdot \vec{Ib}_{p||} + \vec{Vb}_z \cdot \vec{Ib}_{p\perp} + \vec{Vb}_z \cdot \vec{Ib}_n + \vec{Vb}_z \cdot \vec{Ib}_z \quad (3.5)$$

A potência média total, por sua vez, é dada por:

$$P = Pb_a + Pb_b + Pb_c \quad (3.6)$$

Onde:

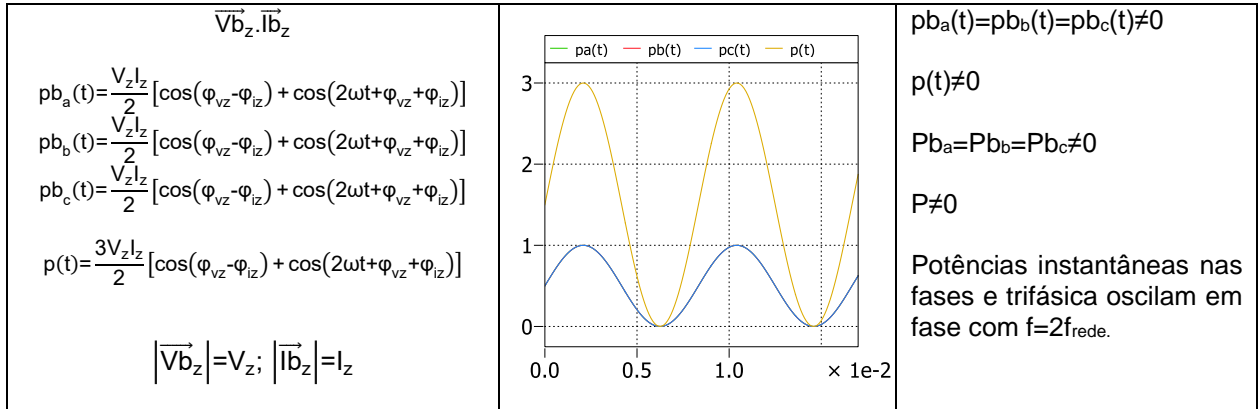
$$Pb_x = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_x(t) dt \text{ sendo } x = a, b, c \quad (3.7)$$

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam uma análise dos valores instantâneos e médios das parcelas de potência que compõem a equação (3.5).

A Tabela 3.1 apresenta as parcelas de potência produzidas por tensões e correntes de mesma sequência.

Tabela 3.1 - Produtos de Mesma Sequência

Parcela Analisada	Forma de Onda	Comentários
$\vec{V}_{b_p} \cdot \vec{I}_{b_{p\parallel}}$ $pb_a(t) = \frac{V_p I_{p\parallel}}{2} [1 + \cos(2\omega t)]$ $pb_b(t) = \frac{V_p I_{p\parallel}}{2} \left[1 + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_p I_{p\parallel}}{2} \left[1 + \cos\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right]$ $p(t) = \frac{3}{2} V_p I_{p\parallel}$ $ \vec{V}_{b_p} = V_p; \vec{I}_{b_{p\parallel}} = I_{p\parallel}$		$pb_a(t) = pb_b(t) = pb_c(t) \neq 0$ $p(t) \neq 0$ $P_{b_a} = P_{b_b} = P_{b_c} \neq 0$ $P \neq 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f = 2f_{rede}$ defasadas em 120° . A potência instantânea trifásica é constante.
$\vec{V}_{b_p} \cdot \vec{I}_{b_{p\perp}}$ $pb_a(t) = \frac{V_p I_{p\perp}}{2} \cos\left(2\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right)$ $pb_b(t) = \frac{V_p I_{p\perp}}{2} \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \pm \frac{\pi}{2}\right)$ $pb_c(t) = \frac{V_p I_{p\perp}}{2} \cos\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \pm \frac{\pi}{2}\right)$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_{b_p} = V_p; \vec{I}_{b_{p\perp}} = I_{p\perp}$		$pb_a(t) = pb_b(t) = pb_c(t) \neq 0$ $p(t) = 0$ $P_{b_a} = P_{b_b} = P_{b_c} = 0$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f = 2f_{rede}$ defasadas em 120° .
$\vec{V}_{b_n} \cdot \vec{I}_{b_n}$ $pb_a(t) = \frac{V_n I_n}{2} [\cos(-\varphi_{in}) + \cos(2\omega t + \varphi_{in})]$ $pb_b(t) = \frac{V_n I_n}{2} \left[\cos(-\varphi_{in}) + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi_{in}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_n I_n}{2} \left[\cos(-\varphi_{in}) + \cos\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi_{in}\right) \right]$ $p(t) = \frac{3}{2} V_n I_n \cos(-\varphi_{in})$ $ \vec{V}_{b_n} = V_n; \vec{I}_{b_n} = I_n$		$pb_a(t) = pb_b(t) = pb_c(t) \neq 0$ $p(t) \neq 0$ $P_{b_a} = P_{b_b} = P_{b_c} \neq 0$ $P \neq 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f = 2f_{rede}$ defasadas em 120° . A potência instantânea trifásica é constante.



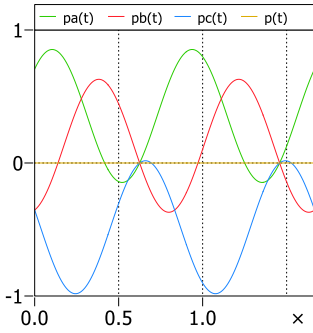
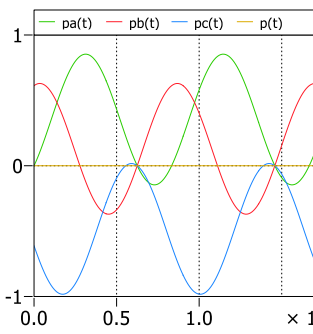
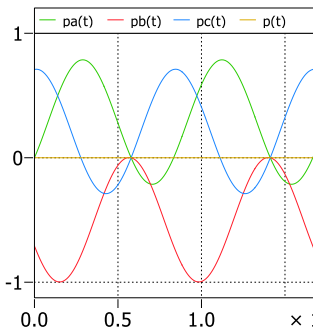
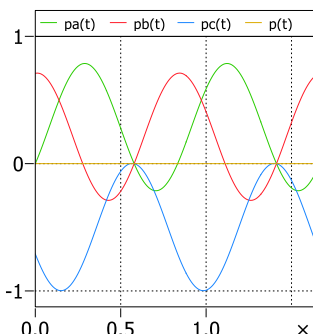
A análise das parcelas de potência produzidas por componentes de mesma seqüência mostra que:

- Correntes e tensões de mesma seqüência geram potência ativa trifásica e permitem a transferência de energia entre rede e conversor. A energia transferida, no entanto, é igualmente distribuída. As potências médias nas fases são iguais.
- No caso particular de correntes e tensões de seqüência zero verifica-se a característica pulsante da potência trifásica instantânea. Deve-se notar ainda que, em sistemas a três fios, essa combinação não é possível.
- Correntes e tensões de mesma seqüência, mas em quadratura, não produzem fluxo de potência ativa entre rede e conversor.

A Tabela 3.2 apresenta as parcelas de potência produzidas por tensões e correntes de seqüências diferentes, onde uma delas é de seqüência zero.

Tabela 3.2 - Produtos de Seqüência Zero e Seqüência Positiva ou Negativa

Parcela Analisada	Forma de Onda	Comentários
$\vec{V}_{b_z} \cdot \vec{I}_{b_{p }}$ $pb_a(t) = \frac{V_z I_{p }}{2} [\cos(\varphi_{v_z}) + \cos(2\omega t + \varphi_{v_z})]$ $pb_b(t) = \frac{V_z I_{p }}{2} \left[\cos\left(\varphi_{v_z} + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{v_z} - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_z I_{p }}{2} \left[\cos\left(\varphi_{v_z} - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{v_z} + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_{b_z} = V_z; \quad \vec{I}_{b_{p }} = I_{p }$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) = 0$ $P_{b_a} \neq P_{b_b} \neq P_{b_c}$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f = 2f_{rede}$ defasadas em 120° .

$\vec{V}_z \cdot \vec{I}_{p\perp}$ $pb_a(t) = \frac{V_z I_{p\perp}}{2} \left[\cos\left(\varphi_{vz} \mp \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{vz} \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]$ $pb_b(t) = \frac{V_z I_{p\perp}}{2} \left[\cos\left(\varphi_{vz} + \frac{2\pi}{3} \mp \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{vz} - \frac{2\pi}{3} \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_z I_{p\perp}}{2} \left[\cos\left(\varphi_{vz} - \frac{2\pi}{3} \mp \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{vz} + \frac{2\pi}{3} \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_z = V_z; \vec{I}_{p\perp} = I_{p\perp}$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) = 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f=2f_{rede}$ defasadas 120° .
$\vec{V}_z \cdot \vec{I}_{n}$ $pb_a(t) = \frac{V_z I_n}{2} \left[\cos(\varphi_{vz} - \varphi_{in}) + \cos(2\omega t + \varphi_{vz} + \varphi_{in}) \right]$ $pb_b(t) = \frac{V_z I_n}{2} \left[\cos\left(\varphi_{vz} - \frac{2\pi}{3} - \varphi_{in}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{vz} + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{in}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_z I_n}{2} \left[\cos\left(\varphi_{vz} + \frac{2\pi}{3} - \varphi_{in}\right) + \cos\left(2\omega t + \varphi_{vz} - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{in}\right) \right]$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_z = V_z; \vec{I}_n = I_n$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) = 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f=2f_{rede}$ defasadas em 120° .
$\vec{V}_p \cdot \vec{I}_z$ $pb_a(t) = \frac{V_p I_z}{2} \left[\cos(-\varphi_{iz}) + \cos(2\omega t + \varphi_{iz}) \right]$ $pb_b(t) = \frac{V_p I_z}{2} \left[\cos\left(-\frac{2\pi}{3} - \varphi_{iz}\right) + \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{iz}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_p I_z}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_{iz}\right) + \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{iz}\right) \right]$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_p = V_p; \vec{I}_z = I_z$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) = 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f=2f_{rede}$ defasadas em 120° .
$\vec{V}_n \cdot \vec{I}_z$ $pb_a(t) = \frac{V_n I_z}{2} \left[\cos(-\varphi_{iz}) + \cos(2\omega t + \varphi_{iz}) \right]$ $pb_b(t) = \frac{V_n I_z}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_{iz}\right) + \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{iz}\right) \right]$ $pb_c(t) = \frac{V_n I_z}{2} \left[\cos\left(-\frac{2\pi}{3} - \varphi_{iz}\right) + \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{iz}\right) \right]$ $p(t) = 0$ $ \vec{V}_n = V_n; \vec{I}_z = I_z$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) = 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c$ $P = 0$ Potências instantâneas nas fases oscilam com $f=2f_{rede}$ defasadas em 120° .

A combinação de componentes de sequência zero com componentes de sequência positiva ou negativa não gera potência ativa trifásica. Não há fluxo de potência entre conversor e rede. Entretanto, a troca de energia entre fases acontece e as potências médias geradas em cada fase são diferentes entre si e variam de acordo com amplitude e fase da sequência zero injetada.

A Tabela 3.3 apresenta parcelas de potência produzidas por tensões e correntes de seqüências diferentes, sendo uma positiva e outra negativa.

Tabela 3.3 - Produtos de Sequências Positiva e Negativa

Parcela Analisada	Forma de Onda	Comentários
$\vec{V}_{b_p} \cdot \vec{I}_{b_n}$ $pb_a(t) = \frac{V_p I_n}{2} [\cos(-\varphi_{in}) + \cos(2\omega t + \varphi_{in})]$ $pb_b(t) = \frac{V_p I_n}{2} [\cos(-\frac{4\pi}{3} - \varphi_{in}) + \cos(2\omega t + \varphi_{in})]$ $pb_c(t) = \frac{V_p I_n}{2} [\cos(\frac{4\pi}{3} - \varphi_{in}) + \cos(2\omega t + \varphi_{in})]$ $p(t) = \frac{3}{2} V_p I_n \cos(2\omega t + \varphi_{in})$ $ \vec{V}_{b_p} = V_p; \vec{I}_{b_n} = I_n$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) \neq 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c \neq 0$ $P = 0$ Potências instantâneas individuais e trifásica oscilam com $f = 2f_{rede}$ em fase.
$\vec{V}_{b_n} \cdot \vec{I}_{b_p}$ $pb_a(t) = \frac{V_n I_p}{2} [\cos(\varphi_{vn}) + \cos(2\omega t + \varphi_{vn})]$ $pb_b(t) = \frac{V_n I_p}{2} [\cos(-\frac{4\pi}{3} - \varphi_{vn}) + \cos(2\omega t + \varphi_{vn})]$ $pb_c(t) = \frac{V_n I_p}{2} [\cos(\frac{4\pi}{3} - \varphi_{vn}) + \cos(2\omega t + \varphi_{vn})]$ $p(t) = \frac{3}{2} V_n I_p \cos(2\omega t + \varphi_{vn})$ $ \vec{V}_{b_n} = V_n; \vec{I}_{b_p} = I_p$		$pb_a(t) \neq pb_b(t) \neq pb_c(t)$ $p(t) \neq 0$ $Pb_a \neq Pb_b \neq Pb_c \neq 0$ $P = 0$ Potências instantâneas individuais e trifásica oscilam com $f = 2f_{rede}$ em fase.

A combinação de componentes de tensão e corrente de seqüências positiva e negativa produz comportamentos similares aos observados na combinação com seqüência zero. A potência média trifásica é nula e as potências médias nas fases não são. Importante notar, no entanto, que diferente dos casos de combinação com seqüência zero, nessas combinações a característica pulsante da potência trifásica instantânea constitui um fator indesejado.

3.2. Manejo do Fluxo de Potência Para o Controle das Tensões CC nos Braços do Conversor Conectado à Rede de Três Fios

Perdas e desbalanços no sistema e a própria necessidade de operar injetando correntes desbalanceadas afetam as tensões CC nos braços do conversor e, por isso, é necessário um sistema de controle que as regule e as mantenha equilibradas.

Pelo exposto no item anterior observa-se que:

- A injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão gera fluxo de potência equilibrado (igual nas três fases) entre conversor e rede (vide Tabela 3.1).
- A injeção de sequência zero (tensão ou corrente), gera fluxos de potência distintos nos braços do conversor cuja soma é nula, ou seja, a potência trifásica é igual a zero (vide Tabela 3.2).
- A injeção de corrente de sequência oposta à da tensão mesmo produzindo resultados parecidos aos da injeção de sequência zero introduz desbalanço na corrente injetada e uma componente pulsante na potência trifásica (vide Tabela 3.3), ambos efeitos considerados indesejados.

Com base nessas constatações é possível compor uma arquitetura de controle das tensões CC nos braços do conversor que:

- Para a Regulação da Média Global das tensões CC (vide Figura 1.2 e subitem 1.1.b – Capítulo 1), utiliza-se da injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão para promover um fluxo equilibrado de potência ativa nos três braços do conversor. O fato da potência trifásica produzida ser distribuída igualmente nos braços garante que a ação de Regulação da Média não interfira no Balanceamento das tensões CC.
- Como uma rede com tensões equilibradas é a condição padrão e desejada (é esperado que a proporção de sequência positiva seja consistentemente maior que a de sequência negativa) a estratégia se apoia na injeção de corrente ativa de sequência positiva.
- Para realizar o Balanceamento das tensões CC dos braços (vide Figura 1.2 e subitem 1.1.b – Capítulo 1), faz uso da injeção de sequência zero para controlar o fluxo de potência individual em cada braço. Tal estratégia é bastante adequada

uma vez que, em ambos os casos, injeção de tensão na configuração Y e corrente na configuração Δ , não afeta as correntes na rede e não produz fluxo de potência trifásica. Garante-se que a ação de Balanceamento não interfere na Regulação da Média Global das tensões CC.

A injeção de corrente de sequência negativa como estratégia de Balanceamento das tensões CC não é utilizada neste trabalho uma vez que:

- Em uma condição em que o sistema é solicitado a injetar corrente de sequência positiva, uma estratégia com essa introduz desbalanços na corrente injetada.
- Em uma condição em que o sistema é solicitado a injetar corrente de sequência negativa de forma contínua tal estratégia não funcionaria, pois a injeção da corrente solicitada provocaria desbalanceamento das tensões CC que levaria à injeção de corrente de sequência negativa oposta para compensá-lo. Ou seja, haveria um efeito de cancelamento que impediria o conversor de operar na condição descrita.

Há, no entanto, exemplos onde o a sequência negativa é utilizada no balanceamento das tensões CC. São aplicações que podem conviver com os efeitos das características comentadas acima como em [36] ou em [37] que utiliza uma abordagem que combina injeção de sequência zero e sequência negativa dependendo do nível de desbalanço presente no sistema. Há também situações mais específicas onde a injeção de sequência zero é utilizada com outra finalidade como, por exemplo, em estratégias de tolerância a falha como mostra [38]. Nesses casos a estratégia de Balanceamento pode fazer o uso alternativo da injeção de sequência negativa.

Nos itens seguintes, através de simulações usando o *software* Matlab¹⁰, faz-se uma verificação simplificada das estratégias propostas acima. Nas simulações a tensão média do lado CC de cada braço do conversor é dada por (3.8)¹¹.

$$V_{c_x} = \sqrt{v_{c_x}(t_i)^2 + \frac{2}{C_{eq}} \int_{t_i}^t p_{b_x}(t) dt} \quad (3.8)$$

¹⁰O Apêndice C apresenta os métodos, incluindo *scripts* do software MATLAB, utilizados nas simulações.

¹¹Com o objetivo de simplificação, as perdas no conversor e queda de tensão nos indutores de acoplamento foram desconsideradas.

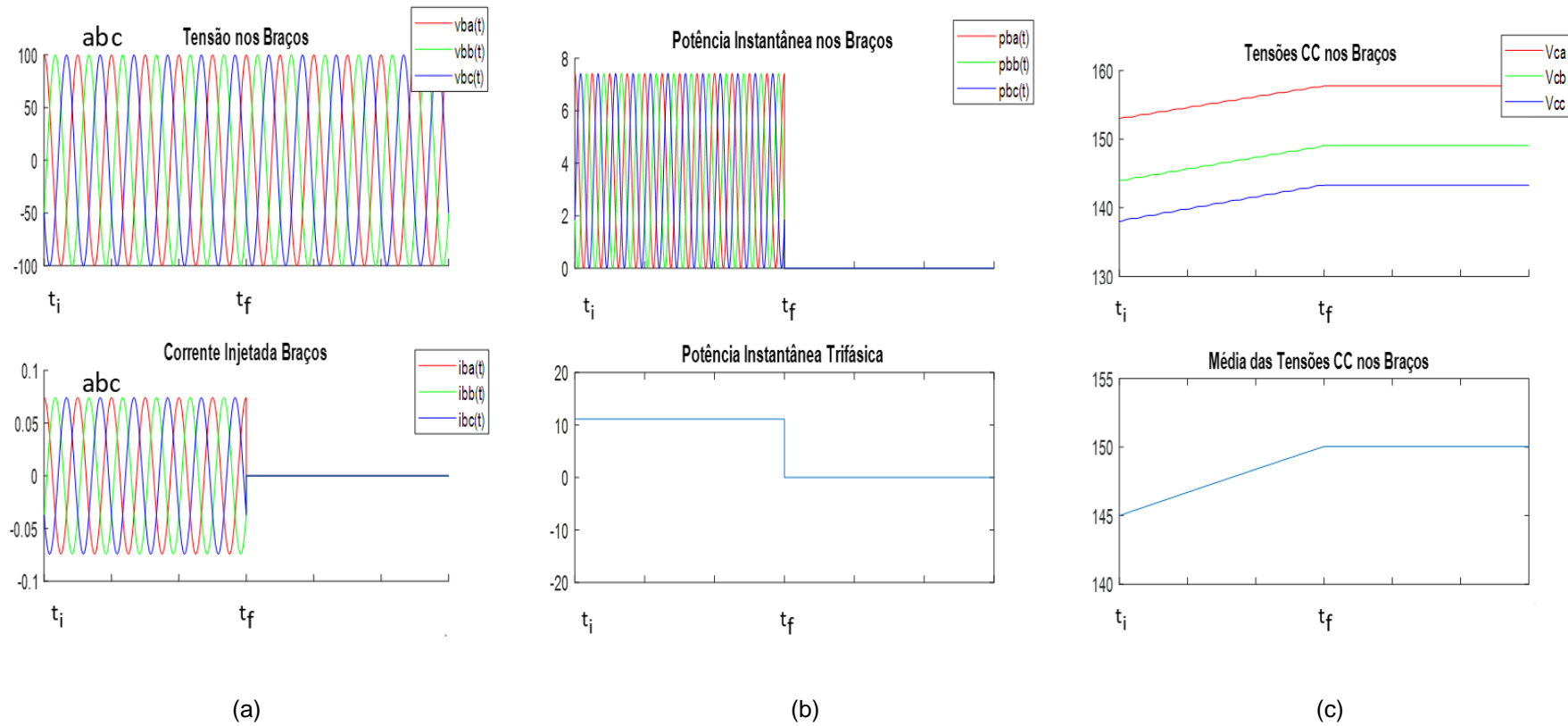
Na equação, $x=a,b,c$, $p_{bx}(t)$ é a potência instantânea e C_{eq} a capacitância equivalente no lado CC do braço x do conversor.

3.2.1. Regulação da Média das Tensões CC nos Braços do Conversor Via Injeção de Corrente de Mesma Sequência da Tensão

Na primeira simulação, explorando o observado na Tabela 3.1, corrente de mesma sequência e fase da tensão é injetada (Figura 3.2 (a)) com o objetivo de gerar potência ativa (Figura 3.2(b)) necessária para levar a média das tensões CC dos braços a um nível de referência (Figura 3.2 (c)). Nota-se que:

- A média das tensões CC nos braços, no início do processo, encontra-se abaixo do valor de referência de 150V (Figura 3.2 (c) – gráfico inferior).
- A injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão no intervalo $t_i \rightarrow t_f$ (Figura 3.2(a) – gráfico inferior) gera a potência necessária (Figura 3.2(b)) para levar a média ao nível estabelecido pela referência (Figura 3.2(c) – gráfico inferior).
- Importante notar que as tensões CC de cada braço permanecem desequilibradas ao longo de todo o processo (Figura 3.2(c) – gráfico superior) pois, como constatado no item 3.1, a injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão distribui a energia igualmente entre as fases não permitindo uma ação de balanceamento das tensões.

Figura 3.2 – Regulação da Média da Tensão CC dos Braços - Injeção de Corrente de Mesma Sequência e Fase da Tensão



Fonte: Próprio autor

3.2.2. Balanceamento das Tensões CC dos Braços Via Injeção de Corrente de Sequência Zero

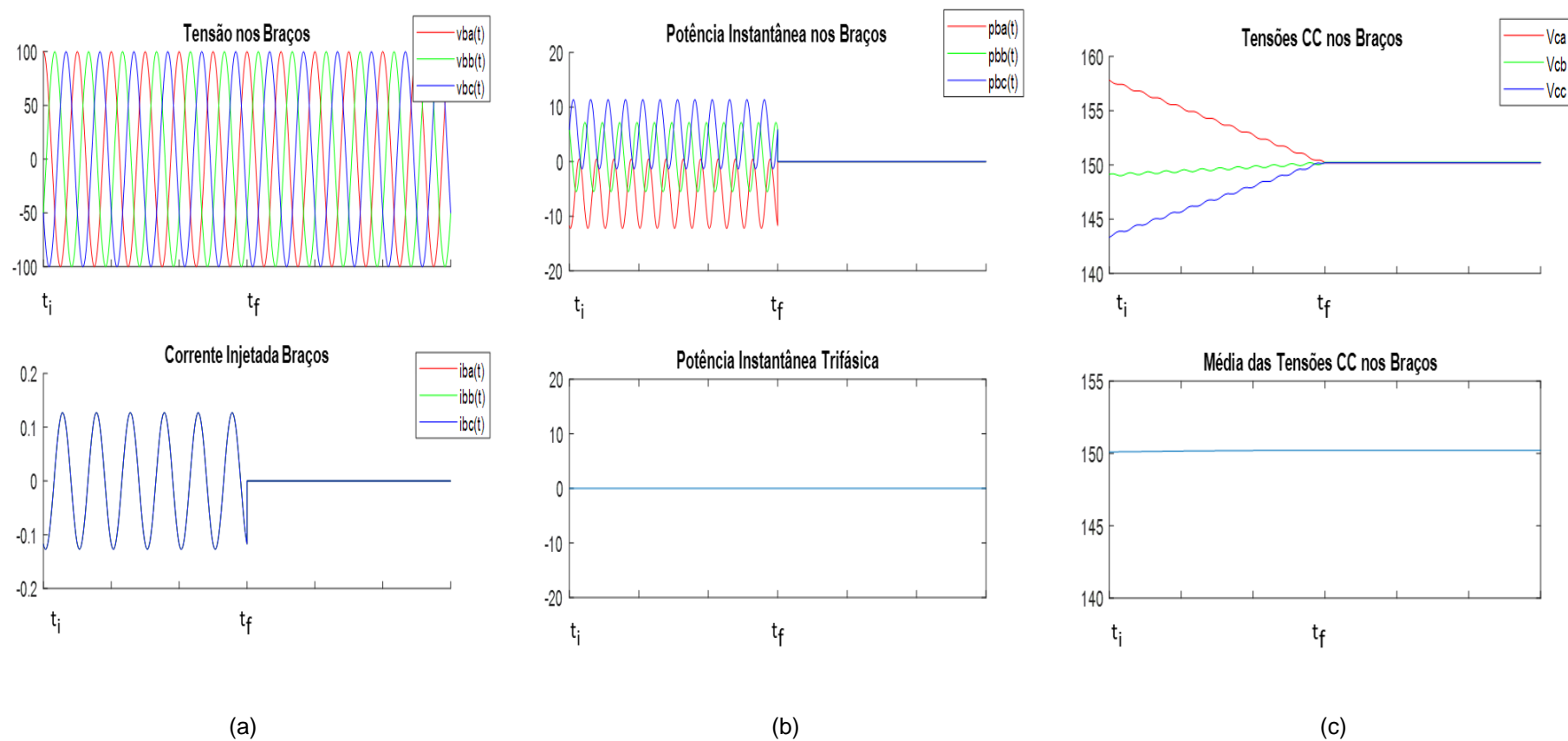
Nesta segunda simulação optou-se por analisar o cenário em que a tensão é de sequência positiva e se injeta corrente de sequência zero reproduzindo uma condição adequada à configuração Δ que permite a circulação interna de corrente de sequência zero no conversor sem afetar a corrente na rede. É importante ressaltar que o cenário dual, não apresentado aqui, onde a corrente é de sequência positiva e impõe-se tensão de sequência zero, é aplicável à configuração Y e produz resultados semelhantes.

Sendo assim, com base no observado na Tabela 3.2 (4ª linha), corrente de sequência zero é injetada (Figura 3.3(a)) com o objetivo de promover o fluxo de potência nas fases (Figura 3.3(b)) necessário para balancear as tensões CC nos braços do conversor (Figura 3.3(c)). Nota-se que:

- Embora a média das tensões CC nos braços já se encontre no nível de referência de 150V (Figura 3.3(c) – gráfico inferior), cada braço apresenta um nível de tensão CC diferente no início do processo (Figura 3.3(c) – gráfico superior).
- A injeção de corrente de sequência zero (Figura 3.3(a)– gráfico inferior) no intervalo $t_i \rightarrow t_f$ gera níveis médios de potência distintos em cada fase (Figura 3.3(b) – gráfico superior) necessários para promover o balanceamento das tensões CC dos braços (Figura 3.3(c) – gráfico superior).
- A média das tensões CC dos braços permanece inalterada ao longo de todo o processo (Figura 3.3(c) – gráfico inferior) pois, como também constatado no item 3.1, a potência trifásica é nula (Figura 3.3(b) - gráfico inferior).
- Como já comentado, constata-se um resultado relevante a ser utilizado no controle das tensões CC (item 4.3), que é o desacoplamento entre as ações de: i) variar o valor da Média Global das tensões CC dos braços através da injeção de corrente de sequência positiva em fase com tensão fundamental de sequência positiva da tensão na rede e ii) obter o Balanceamento das tensões CC em cada braço através de injeção de corrente de sequência zero às referências de tensão dos conversores no caso Δ (tensão de sequência zero no caso Y). Adicionalmente verifica-se que a injeção de sequência zero acima

descrita não afeta as correntes de linha, ou seja, não afeta a ação de controle da Malha de Corrente.

Figura 3.3 – Balançamento das Tensões CC dos Braços - Injeção de Corrente de Sequência Zero



Fonte: Próprio autor

3.2.3. Balanceamento das Tensões CC dos Braços Via Injeção de Corrente de Sequência Oposta à da Tensão

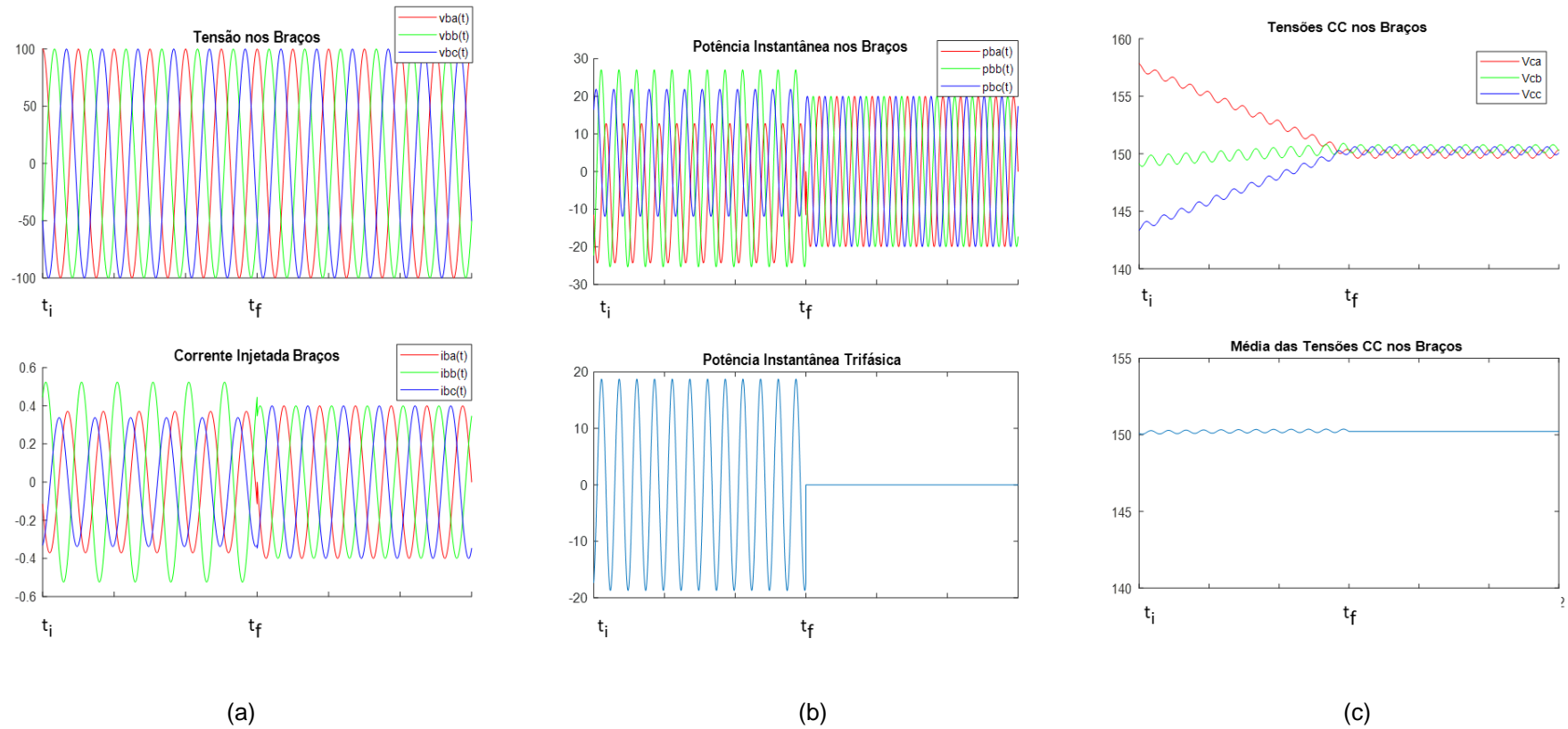
Nesta terceira simulação, com base no verificado na Tabela 3.3, o balanceamento das tensões CC dos braços (Figura 3.4(c)) é feito pela injeção de corrente com sequência oposta (negativa) à da tensão (Figura 3.4(a)) e seus efeitos indesejados são apontados.

- A Figura 3.4(c) mostra que o método produz o balanceamento das tensões nos braços (gráfico superior da figura) em linha com o nível de 150V estipulado para a média (gráfico inferior da figura).
- Durante o intervalo $t_i \rightarrow t_f$, em que ocorre a injeção de corrente de sequência negativa, observa-se na Figura 3.4(b) (gráfico inferior) que a potência trifásica produzida, apesar de apresentar um valor médio nulo, tem característica pulsante. A Figura 3.4(c) (gráfico inferior) mostra que essa característica pulsante da potência trifásica introduz *ripple* na tensão CC média dos braços e, embora não evidenciado nesta simulação simplificada, provoca distorção harmônica na corrente injetada¹².
- Outro aspecto a ser notado é que a injeção de uma componente de corrente de sequência oposta (negativa) à da tensão necessariamente introduz desbalanços na corrente. A Figura 3.4(a) (gráfico inferior) evidencia esse fato. Note que a corrente injetada¹³ se encontra desbalanceada no intervalo, $t_i \rightarrow t_f$, em que sequência negativa está presente.

¹² A distorção introduzida demanda estratégias de compensação trazendo mais complexidade ao sistema de controle.

¹³ Nesta simulação a corrente injetada inclui uma componente reativa de sequência positiva. Esse artifício foi utilizado para evidenciar com mais clareza o efeito de desbalanceamento provocado pela injeção de sequência negativa no intervalo em que está presente.

Figura 3.4 – Balanceamento das tensões CC dos Braços - Injeção de Corrente de Sequência Oposta à da Tensão



Fonte: Próprio autor

Do observado nessas três primeiras simulações, conclui-se que um sistema de controle pode atingir os objetivos de Regulação da Média Global e Balanceamento das tensões CC nos braços do conversor atuando, de forma paralela e desacoplada¹⁴, respectivamente, através da injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão e da injeção de sequência zero (tensão no caso Y, corrente no caso Δ).

Observou-se também que a injeção de corrente de sequência oposta à da tensão embora permita o balanceamento das tensões CC nos braços, apresenta características que devem ser observadas ao ser utilizada em estratégias de balanceamento. A primeira delas é a característica pulsante da potência trifásica que irá introduzir distorção harmônica na corrente da rede e a segunda é a de introduzir desbalanço na corrente injetada.

¹⁴ No capítulo 4, no detalhamento das arquiteturas de controle, mostra-se que para garantir esse desacoplamento é fundamental que as malhas de Balanceamento tenham como referência a média das tensões CC dos braços do conversor que será regulada pelas malhas de Regulação da Média Global do sistema de controle.

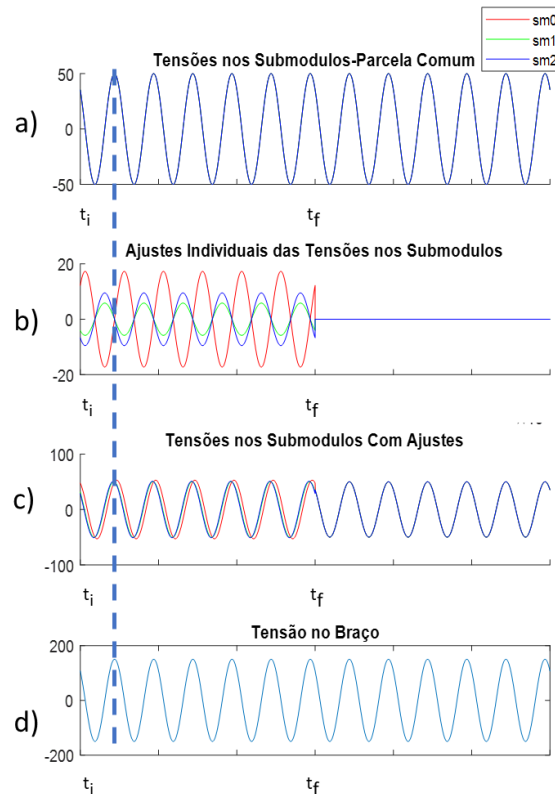
3.3. Equalização das Tensões CC dos Submódulos Via Imposição de Tensão em Fase com a Corrente

Em um MMCC, dado que cada braço é composto por uma associação em série de vários submódulos, regular e balancear a tensão CC total dos braços não é suficiente para garantir o bom funcionamento do conversor. A equalização das tensões CC nos submódulos de cada braço também é parte necessária dos objetivos do sistema de controle do conversor.

A equalização das tensões CC dos submódulos é realizada promovendo-se o fluxo de potência ativa entre os submódulos de um mesmo braço. Esse objetivo é atingido através da imposição de tensão em fase com a corrente no braço de forma tal que a tensão produzida em cada submódulo seja ajustada individualmente e a soma desses ajustes seja nula, não alterando a tensão total produzida pelo braço. Assim, garante-se que a média e o equilíbrio das tensões CC totais dos braços e a operação da malha de corrente não sejam afetados. Esse procedimento é apresentado na simulação a seguir onde três submódulos sm_0 , sm_1 , sm_2 , compondo um braço do conversor têm, inicialmente, suas tensões CC em níveis distintos. Através da imposição de ajustes individuais às tensões produzidas em cada submódulo suas tensões CC são equalizadas.

A Figura 3.5 apresenta as tensões geradas em cada submódulo. A Figura 3.5(a) mostra a parcela da tensão comum aos submódulos gerada pela tensão de referência produzida pela malha de corrente. Os ajustes individuais são apresentados na Figura 3.5(b). As tensões resultantes em cada submódulo, com os ajustes adicionados, são apresentadas na Figura 3.5(c). A tensão total no braço, ou a soma das tensões geradas pelos submódulos, é mostrada na Figura 3.7(d).

Figura 3. 5 – Tensões nos Submódulos: Parcela Comum (a), Ajustes Individuais (b), (c)=(a)+(b); Tensão no Braço (d)



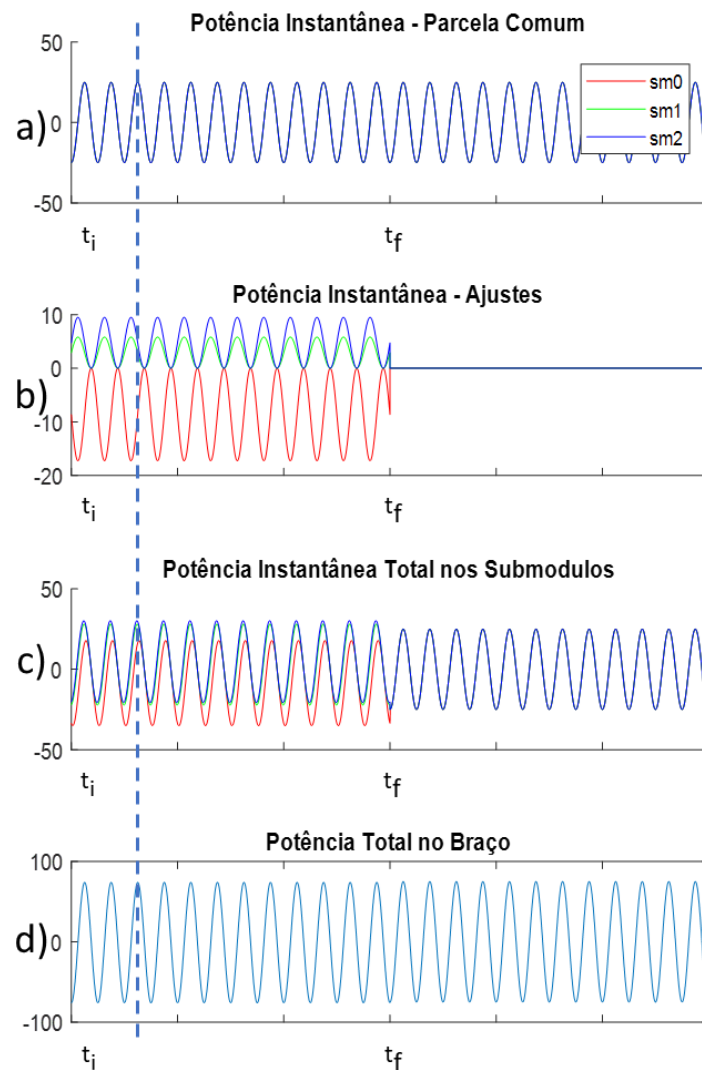
Fonte: Próprio autor

A análise da Figura 3.5 mostra que:

- Os ajustes individuais, mostrados na Figura 3.5(b), aplicados no intervalo $t_i \rightarrow t_f$, estão em quadratura com a parcela comum da tensão como mostra a Figura 3.5(a) (vide linha pontilhada). Ou seja, em fase com a corrente no braço.
- A tensão total no braço, como se vê na Figura 3.5(d), não sofre alterações. Esta é uma condição importante para que não haja distorção na corrente injetada.

A Figura 3.6 apresenta o comportamento das potências instantâneas em cada submódulo e no braço. Na Figura 3.6(a) é apresentada a potência produzida pela parcela comum da tensão em cada submódulo. Na Figura 3.6(b) se vê a potência produzida pelos ajustes individuais. Na Figura 3.6(c) observa-se a potência produzida em cada submódulo, (a)+(b). Já na Figura 3.6(d) tem-se a potência total produzida no braço.

Figura 3. 6 – Potência Instantânea nos Submódulos: Parcela Comum (a), Ajustes Individuais (b), (c)=(a)+(b); Potência Instantânea no Braço (d)



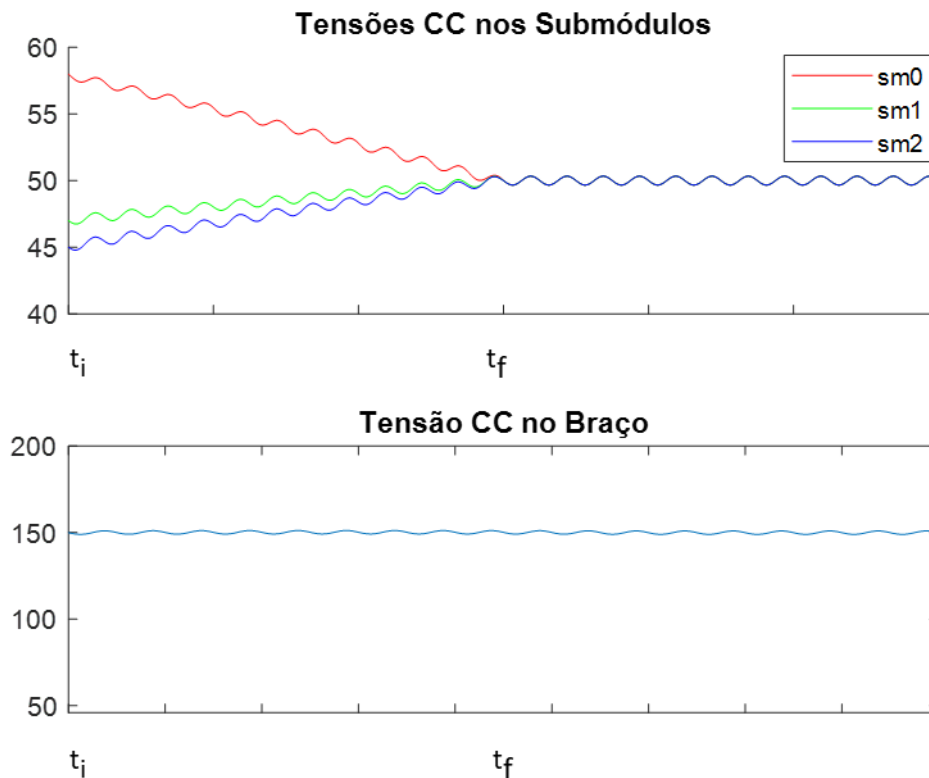
Fonte: Próprio autor

Observa-se que:

- Os ajustes individuais, aplicados no intervalo $t_i \rightarrow t_f$, fazem com que cada submódulo produza níveis médios de potência distintos que levam a tensão CC a aumentar (carga do capacitor) ou diminuir (descarga do capacitor).
- Como a soma dos ajustes individuais é instantaneamente nula, a potência média total produzida não sofre alterações como mostra a Figura 3.6(d).

Completando a simulação, a Figura 3.7 apresenta o comportamento da tensão CC em cada submódulo bem como a tensão CC total no braço. Comparando o comportamento das tensões CC em cada submódulo com o gráfico (b) da Figura 3.6 observa-se que o submódulo sm0, que apresenta uma tensão CC acima de 50V, é levado a injetar potência (média do ajuste < 0). Já os submódulos sm1 e sm2, que apresentam tensões CC abaixo de 50V, são levados a drenar potência (média do ajuste > 0). Estabelece-se um fluxo de potência entre os submódulos do braço onde sm0 fornece a potência demandada por sm1 e sm2. Esse processo continua até o ponto em que as tensões CC nos três submódulos se igualam. Já a tensão CC total no braço, como se espera, permanece inalterada ao longo de todo o processo.

Figura 3.7 – Tensões CC nos Submódulos e no Braço



Fonte: Próprio autor

3.4. Conclusões Parciais do Capítulo 3

Neste capítulo analisou-se o comportamento das parcelas de potência produzidas pelas combinações de tensões e correntes de sequências positiva, negativa e zero. Também se verificou como esse comportamento pode ser utilizado para o controle da

tensão CC nos braços de conversores. Com base nas análises e verificações realizadas, para sistemas conectados à rede de três fios, conclui-se que:

- A Regulação das Tensões CC dos braços é viabilizada controlando-se o fluxo de potência trifásica entre rede e conversor. A injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão promove um fluxo equilibrado de potência ativa nos três braços do conversor o que permite regular a Média Global das Tensões.
- O Balanceamento das Tensões CC dos braços é realizado controlando-se o fluxo de potência em cada braço do conversor. A injeção de tensão de sequência zero, na configuração Y, ou corrente de sequência zero, na configuração Δ , permite esse controle e, por não produzir potência trifásica (soma das potências produzidas nos braços é nula), garante que a ação de Balanceamento não interfira na Regulação da Média Global das tensões.
- A injeção de corrente de sequência negativa, como base para uma estratégia de balanceamento das tensões CC dos braços, não é tão comum quanto a de injeção de sequência zero, mas é possível verificar sua utilização em condições específicas como as apresentadas no item 3.2. É importante notar que tais estratégias precisam levar em conta as características inerentes dessa combinação (comportamento pulsante da potência trifásica, introdução de desbalanços na corrente) que podem constituir fatores indesejados para a operação do conversor.
- A Equalização Individual das Tensões CC dos submódulos de um braço é realizada controlando-se a potência ativa produzida em cada submódulo individualmente. O controle se dá através da imposição de ajustes individuais de tensão em fase com a corrente do braço para cada submódulo.

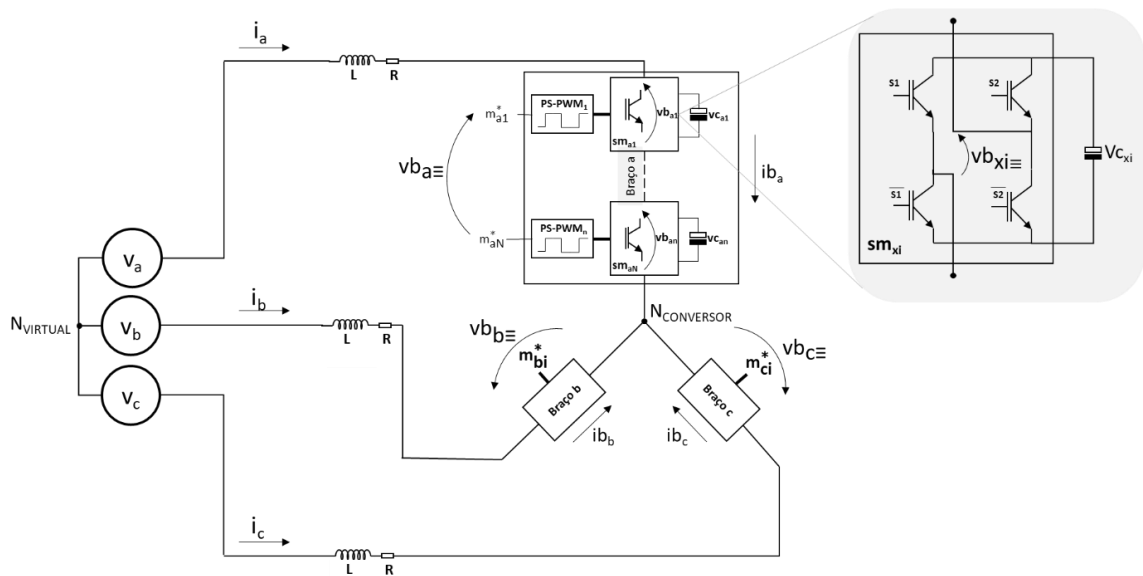
No Capítulo 4, são definidas arquiteturas de controle para conversores conectados em Y a 3 fios e em Δ que implementam as abordagens descritas acima.

4. Arquitetura de Controle

Neste capítulo é descrita a arquitetura de controle estudada neste trabalho e aplicada a um conversor MMCC conectado à rede nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC).

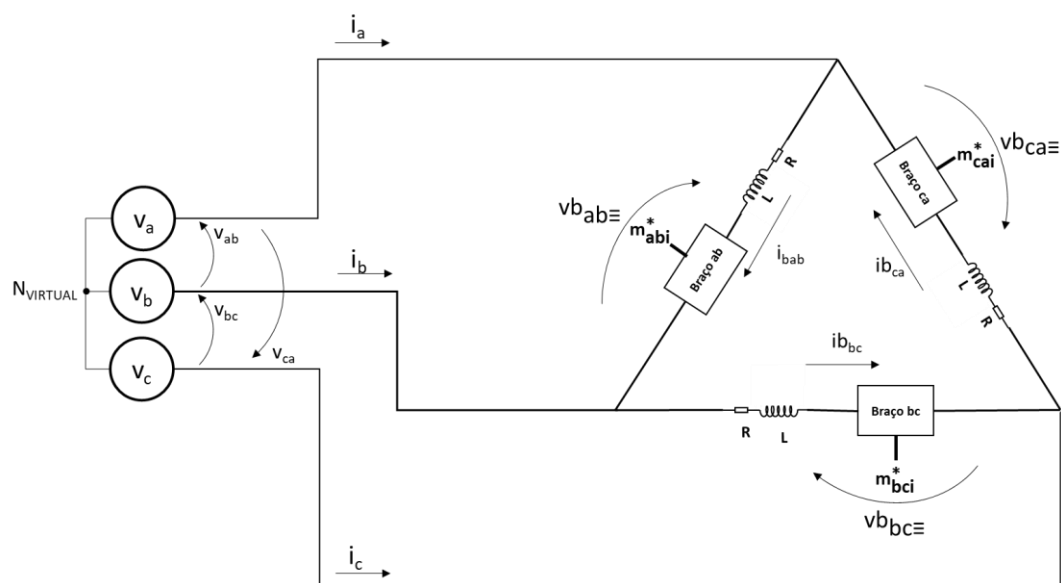
As figuras 4.1 e 4.2 apresentam os modelos de conversores MMCC, já vistos de forma resumida no Capítulo 1, conectados a 3 fios em Y(SSBC) e Δ (SDBC) respectivamente.

Figura 4. 1 – Conversor Conectado em Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

Figura 4. 2 – Conversor Conectado em Δ (SDBC)



Fonte: Próprio autor

Em ambas as configurações cada braço é composto pela associação em série de N submódulos, sm_{xi} , baseados em pontes H como mostra o destaque da Figura 4.1. Cada submódulo recebe um sinal de modulação específico, m_{xi}^* , e produz em sua saída um sinal PWM¹⁵ de tensão, $vb_{xi\equiv}$, de 3 níveis, cuja média local é $vb_{xi} = m_{xi}^* v_{cxi}$. Em cada braço, é sintetizado um sinal de tensão PWM multinível, $vb_{x\equiv}$, com até $2N+1$ níveis, cuja média local é $vb_x = \sum_{i=1}^N m_{xi}^* v_{cxi}$.

O conversor é conectado à rede através de um circuito de acoplamento RL série. Na configuração Y(SSBC) as correntes de linha, i_x , na rede, são iguais às correntes de fase, ib_x , no conversor. Na configuração Δ (SDBC) as relações entre correntes nas linhas da rede e de fase, nos braços do conversor, são dadas por (4.1) e (4.2).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ib_{ab} \\ ib_{bc} \\ ib_{ca} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} ib_{ab} \\ ib_{bc} \\ ib_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ib_z \\ ib_z \\ ib_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

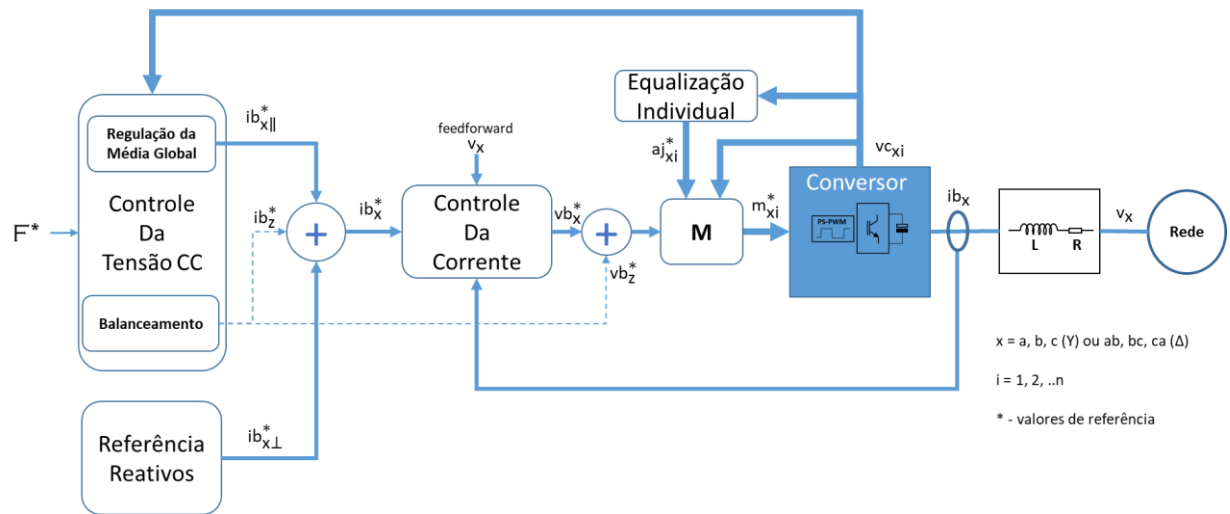
Para um conversor MMCC operando como STATCOM, os objetivos básicos de controle a serem atingidos são:

- Injetar corrente reativa na rede de acordo com uma referência, ib_{xL}^* , através do ajuste da tensão em seus braços, vb_x , gerada pela modulação das tensões CC nos submódulos de cada braço, $vb_x = \sum_{i=1}^N m_{xi}^* v_{cxi}$
- Regular as tensões individuais v_{cxi} nos submódulos de cada braço.

Estes dois objetivos representam a imposição de 2 correntes, no caso Y(SSBC), ou 3 correntes, no caso Δ (SDBC), e $3N$ tensões a partir de $3N$ entradas, m_{xi}^* , caracterizando um sistema subatuado. Esse problema é solucionado por meio de um sistema que combina malhas atuando em cascata e em paralelo. Sua arquitetura é apresentada na Figura 4.3.

¹⁵ Como comentado no Capítulo 1, item 1.1, a arquitetura faz uso da modulação PWM com portadoras deslocadas em fase (PS-PWM).

Figura 4. 3 – Arquitetura de Controle - Organização



Fonte: Próprio autor

O sistema é dividido em blocos que atuam de forma desacoplada¹⁶. O Controle da Corrente contém a malha responsável pelo rastreamento das correntes injetadas na rede. O Controle da Tensão CC garante a regulação das tensões CC nos braços do conversor fazendo uso de uma variável de controle F_x que não é necessariamente a tensão CC nos braços mas, sim, uma grandeza a ela relacionada e que está ligada à modelagem da planta. Como será visto no Capítulos 5, F_x assume o valor da somatória dos quadrados das tensões CC dos submódulos de cada braço, $F_x = \sum_{i=1}^N v_{c_{xi}}^2$, no modelo de controle desenvolvido. O bloco acomoda as malhas que: i) regulam média aritmética de $F_{x=a,b,c}$ com base na referência F^* (Regulação da Média Global) e ii) realizam o balanceamento nos braços garantindo que $F_a=F_b=F_c$ (Balanceamento). O bloco de Equalização Individual realiza o balanceamento das tensões CC dos submódulos de cada braço. O Bloco M produz os índices de modulação PWM para cada submódulo de cada braço do conversor a partir de referências produzidas pelos três blocos anteriores.

Os blocos cascadeados, Controle da Corrente e Regulação da Média Global, formam um primeiro laço de controle que atua na corrente ativa, $ib_{x||}^*$, injetada pelo conversor. Como se observa, a referência para o Controle da Corrente, ib_x^* , conta, além de $ib_{x||}^*$, com uma componente reativa, $ib_{x\perp}^*$, produzida externamente. O bloco de

¹⁶ No Capítulo 5 são explicitadas as hipóteses em que se baseia essa premissa e, no Capítulo 7, as simulações verificam sua validade na prática.

Balanceamento, na configuração Δ (SDBC), adiciona uma terceira componente de sequência zero, ib_z^* , à referência¹⁷.

A equalização das tensões CC individuais dos submódulos de cada braço é realizada pelo bloco de Equalização Individual. Este bloco constitui um segundo laço atuando em paralelo com aquele formado pelos blocos de Controle da Corrente e de Controle da Tensão CC.

O bloco de modulação, M, tem como entradas as saídas dos blocos de controle descritos acima e entrega ao conversor os sinais moduladores, m_{xi}^* , dos módulos PS-PWM que acionam os submódulos de cada braço do conversor.

A seguir cada bloco é descrito em mais detalhes.

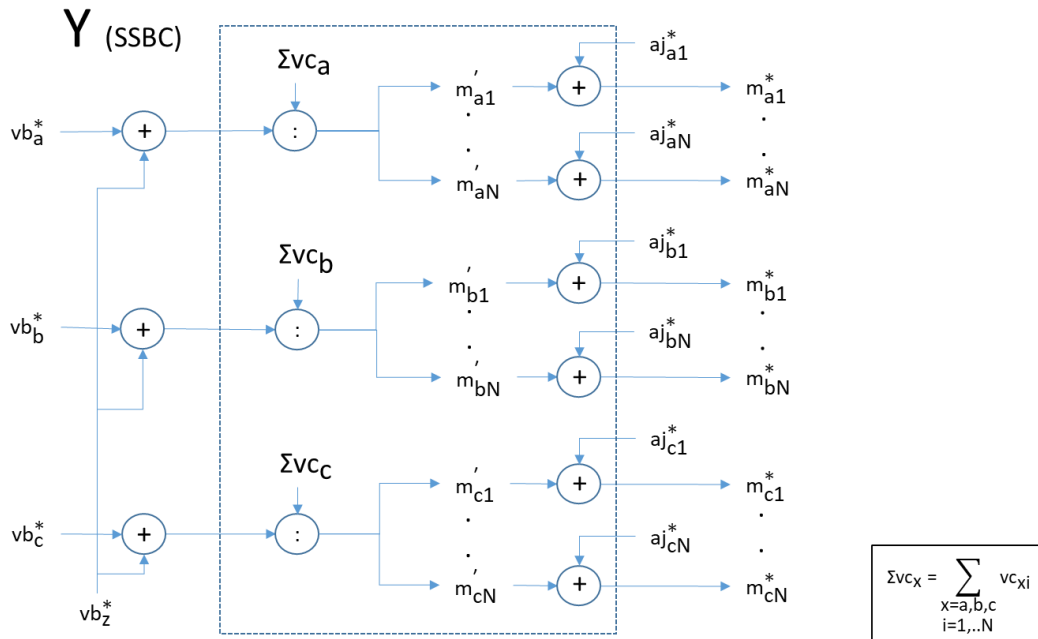
4.1. Bloco de Modulação – M

O bloco M é responsável pela geração dos sinais de modulação individuais, m_{xi}^* , para cada módulo PS-PWM dos braços do conversor. Recebe as referências de tensão de braço produzidas pelo bloco de Controle da Corrente, vb_x^* , às quais, no caso da configuração em Y, soma-se uma referência de sequência zero, vb_z^* , produzida pelo bloco de Balanceamento. O sinal resultante é normalizado pela tensão CC nos braços do conversor, Σvc_x , e ajustado individualmente pelo sinal, aj_{xi}^* , proveniente do bloco de Equalização Individual. Os sinais individuais devidamente ajustados são entregues, então, aos módulos PS-PWM dos braços do conversor.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam a organização do bloco para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). Percebe-se que a estrutura é a mesma para as duas configurações.

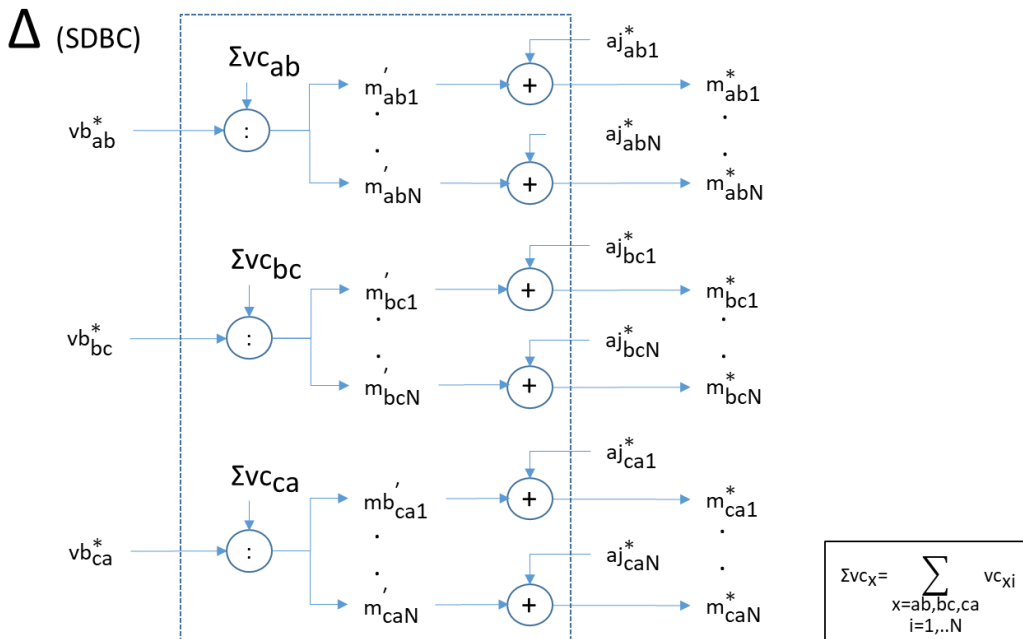
¹⁷ No caso da configuração em Y a injeção de sequência zero se dá através de uma componente de tensão adicionada às referências de tensão, vb_x^* , produzidas pelo Controle da Corrente.

Figura 4.4 – Bloco de Modulação – Configuração Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

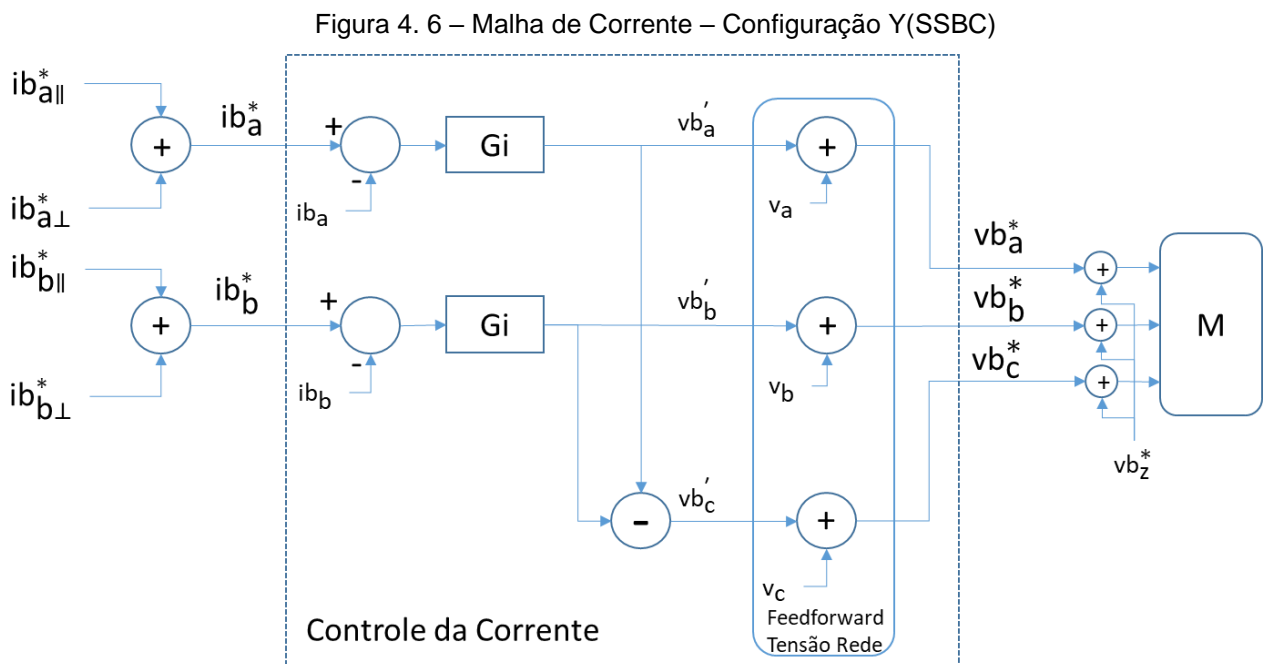
Figura 4.5 – Bloco de Modulação – Configuração Δ(SDBC)



Fonte: Próprio autor

4.2. Bloco de Controle da Corrente

Este bloco controla a corrente injetada operando no sistema de coordenadas abc. Tem como entrada uma referência de corrente que combina as componentes reativa, $ib_{x\perp}^*$, gerada externamente, e as produzidas pelo bloco de Controle da Tensão CC ($ib_{x\parallel}^*$ e ib_z^*). Produz em sua saída os sinais de referência para as tensões nos braços, vb_x^* . A organização das malhas nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) é apresentada a seguir.

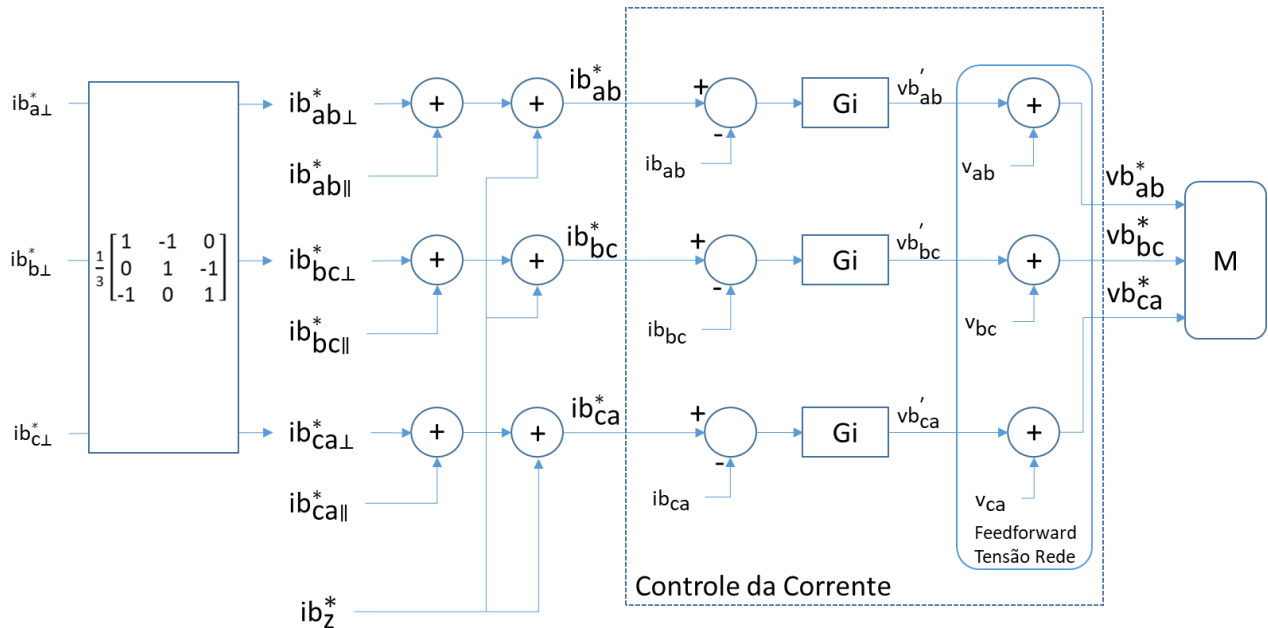


Fonte: Próprio autor

A malha da configuração Y(SSBC), apresentada na Figura 4.6, é definida com base em [31] que, levando em consideração que o sistema é a 3 fios e, portanto, a soma das três correntes é nula, demonstra que apenas duas tensões são suficientes para impor as três correntes (a corrente ib_c não é rastreada pois $ib_c = -ib_a - ib_b$). É possível, como se demonstra no Capítulo 5, a partir de uma transformação linear das duas tensões, vb'_a e vb'_b , produzidas pelos controladores, obter a terceira tensão $vb'_c = -vb'_a - vb'_b$ e garantir o desacoplamento entre as fases. Ainda, segundo [32], no caso do conversor trifásico de 2 níveis a três fios, a tensão de sequência zero poderia ser injetada para aumentar a amplitude das tensões produzidas pelo conversor e minimizar o *ripple* das correntes, não alterando o rastreamento das correntes. Entretanto, na configuração Y(SSBC), como mostrado no item 3, dado que o barramento CC não é comum às três fases, essa estratégia produzirá diferentes

valores de potência em cada braço e causará desbalanço nas respectivas tensões CC. Este grau de liberdade será usado no item 4.1.1 para corrigir desbalanços nas tensões CC com base nos conceitos discutidos no Capítulo 3 (vide 3.1, 3.2 e 3.2.2). A compensação do distúrbio causado pela tensão da rede é realizada através da estratégia de *feedforward*.

Figura 4.7 – Malha de Corrente – Configuração Δ (SDBC)



Fonte: Próprio autor

A configuração em Δ (SDBC) (Figura 4.7), quando comparada à configuração Y(SSBC), apresenta particularidades que devem ser observadas. A referência de corrente reativa para cada braço, $i_{b_{xL}}^*$ ($x=ab, bc, ca$), é gerada a partir das correntes linha da rede desejadas, i_{xL}^* ($x=a, b, c$). O sistema permite que sejam impostas três correntes independentes em seus braços, requerendo três malhas de controle que são naturalmente desacopladas. A possibilidade de se injetar três correntes permite a injeção de corrente de sequência zero circulante no delta como indicado na equação (4.2). Na arquitetura de controle estudada neste trabalho, a componente de sequência zero, $i_{b_z}^*$, que compõe a referência de corrente da malha é produzida pelo bloco de Balanceamento das tensões CC dos braços.

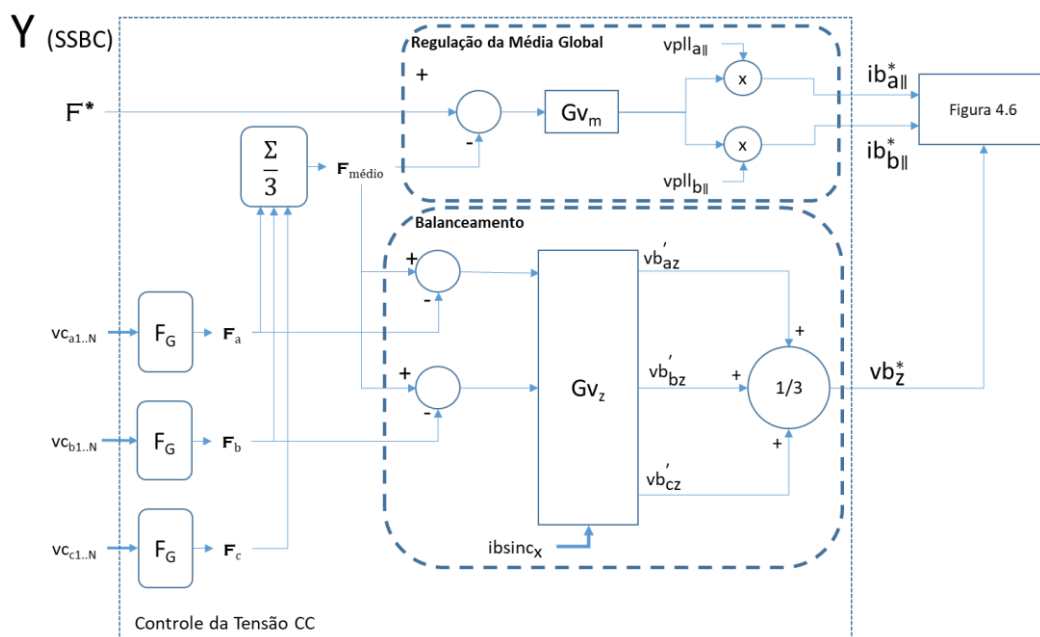
4.3. Bloco de Controle da Tensão CC

Este é o bloco que realiza a Regulação da Média Global e o Balanceamento de F_x ¹⁸. É parte do mesmo laço de controle em que se encontra o bloco de Controle da Corrente com o qual trabalha em cascata. Provê a referência de corrente ativa, $ib_{x||}^*$, que proporciona a regulação da média global de F_x e, as referências de corrente, ib_z^* e tensão, vb_z^* , de sequência zero, que viabilizam o balanceamento de F_x nas configurações Δ (SDBC) e Y(SSBC), respectivamente.

Na arquitetura estudada, a média global de F_x é regulada com base em uma referência fixa, F^* , e utiliza a injeção de corrente ativa de sequência positiva para promover o fluxo de potência trifásica entre rede e conversor (vide item 3.2.1). O balanceamento de F_x é realizado tendo como referência dinâmica a própria média global de F_x , $F_{médio}$, e faz uso da injeção de tensão, no caso Y(SSBC), ou corrente, no caso Δ (SDBC), de sequência zero para produzir fluxos de potência individuais nos braços do conversor (vide item 3.2.2) cuja soma é nula (potência trifásica é igual a zero).

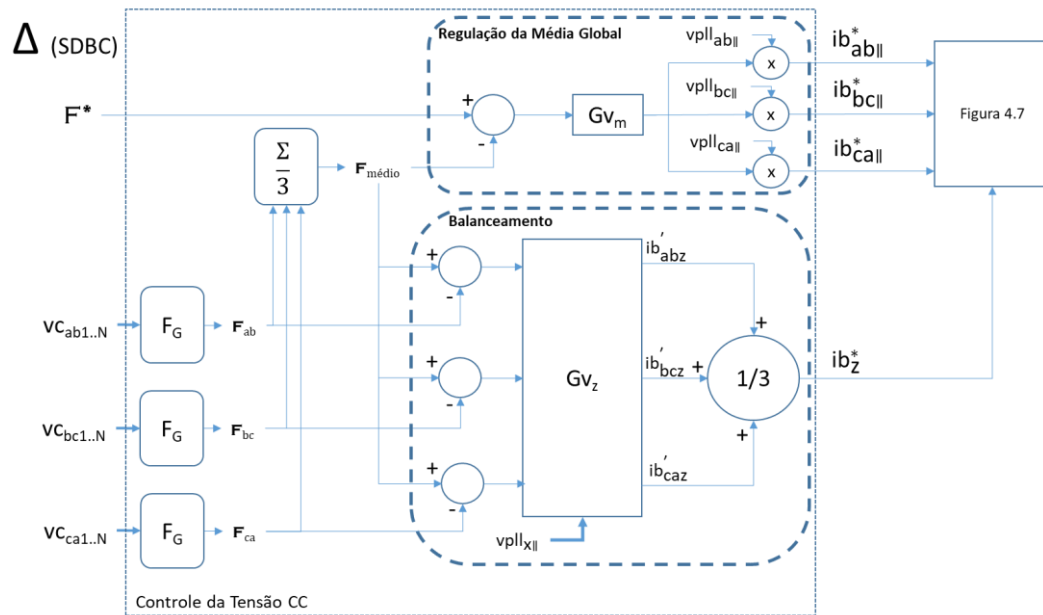
As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam o arranjo do bloco para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC).

Figura 4.8 – Controle da Tensão CC Y(SSBC) – Regulação da Média Global e Balanceamento



Fonte: Próprio autor

¹⁸ Reforçando os conceitos, a média global de F_x é dada pela média aritmética de F_a , F_b e F_c (caso Y) ou de F_{ab} , F_{bc} e F_{ca} (caso Δ). O balanceamento de F_x indica que $F_a=F_b=F_c$ (caso Y) ou $F_{ab}=F_{bc}=F_{ca}$ (caso Δ)

Figura 4.9 – Controle da Tensão CC Δ (SDBC) – Regulação da Média Global e Balanceamento

Fonte: Próprio autor

Os quadros pontilhados nas figuras identificam as malhas de Regulação Média Global e de Balanceamento. Como comentado no início deste capítulo, a grandeza controlada, F_x , não é propriamente a tensão CC nos braços, mas sim uma grandeza de controle a ela relacionada. F_G é a função que produz F_x a partir das tensões CC dos submódulos de cada respectivo braço¹⁹. Observa-se que as malhas são desacopladas uma em relação à outra e atuam em paralelo e não injetam corrente de sequência negativa na rede.

Como visto no Capítulo 3, a regulação da média global das tensões CC dos braços ou, nesse caso, da variável de controle a elas relacionada, F_x , requer injeção de corrente de sequência positiva em fase com a tensão da rede. Sendo assim, as malhas de Regulação da Média Global (quadros pontilhados na parte superior das figuras) comparam a média aritmética instantânea de F_x , $F_{médio}$, a uma referência F^* . O erro obtido é introduzido em um controlador, Gv_m , que produz um sinal equivalente à amplitude da corrente ativa de sequência positiva a ser injetada nos braços. Este sinal multiplica sinais PLL, $vpll_{x||}$, $x=a, b$ (Y) ou $x=ab, bc, ca$ (Δ), de amplitude unitária e mesma frequência e fase da tensão da rede. Nas saídas das malhas têm-se, portanto, as componentes de corrente de sequência positiva, em fase com a correspondente

¹⁹ No Capítulo 5, F_x assume o valor da somatória dos quadrados das tensões CC dos submódulos do braço, $f_x = \sum_{i=1}^N vc_{xi}^2$.

tensão da rede que devem compor as referências para as malhas de controle de corrente.

Voltando ao Capítulo 3, o balanceamento das tensões CC dos braços, ou de F_x , pode ser realizado pela injeção de sequência zero. Na configuração Y(SSBC) adiciona-se uma componente de tensão de sequência zero, vb_z^* , ao sinal de referência dos moduladores PS-PWM. Na configuração Δ (SDBC), adiciona-se uma componente de corrente de sequência zero, ib_z^* , à referência da malha de corrente.

As malhas de Balanceamento (quadros pontilhados maiores das figuras) comparam F_x à sua própria média, $F_{m\u00e9dio}^{20}$. Os erros obtidos na comparação de F_x com $F_{m\u00e9dio}$, onde $x=a, b$ (Y) ou $x=ab, bc, ca$ (Δ), são utilizados pelo controlador Gv_z para determinar a potência necessária em cada braço para compensar o desbalanço detectado. A partir das pot\u00eancias, o controlador produz sinais de tensão, vb_{xz}' (Y), ou de corrente, ib_{xz}' (Δ), cuja m\u00e9dia aritm\u00e9tica produz a componente de sequência zero de tensão, vb_z^* (Y), ou de corrente, ib_z^* (Δ), a ser imposta/injetada. Nesse processo, como indicado nas Figuras 4.8 e 4.9, o controlador Gv_z faz uso dos sinais de referência, $ibsinc_x$ (Y) e $vpll_{xll}$ (Δ), de mesma frequ\u00eancia e fase da corrente nos bra\u00e7os e tensão da rede respectivamente.

Importante notar que as malhas de Regula\u00e7\u00e3o da M\u00e9dia Global e de Balanceamento s\u00e3o organizadas para que n\u00e3o interfiram uma na outra. A malha de Regula\u00e7\u00e3o da M\u00e9dia Global, produz um fluxo de pot\u00eancia equilibrado, igual nos tr\u00eas bra\u00e7os do conversor e, portanto, n\u00e3o altera o balan\u00e7o das tens\u00f5es CC. Por outro lado, a malha de Balanceamento n\u00e3o deve produzir fluxo de pot\u00eancia trif\u00e1sica, ou seja, a soma dos fluxos de pot\u00eancia nos bra\u00e7os deve ser nula para que n\u00e3o altere a M\u00e9dia Global das tens\u00f5es CC.

Para que essa condi\u00e7\u00e3o seja respeitada, na configura\u00e7\u00e3o Y(SSBC), a malha, em linha com a abordagem adotada na malha de Controle da Corrente, determina a tens\u00e3o de sequência zero a partir do controle das tens\u00f5es CC de apenas dois bra\u00e7os do conversor. Essa abordagem se explica atrav\u00e9s do racioc\u00ednio descrito a seguir.

²⁰ Nota-se que a grandeza controlada pelas malhas de regula\u00e7\u00e3o passa a ser a refer\u00eancia para as malhas de balanceamento. Esta \u00e9 uma condi\u00e7\u00e3o necess\u00e1ria para garantir o desacoplamento entre as malhas do sistema de controle.

As potências instantâneas produzidas em cada braço pela tensão de sequência zero imposta, vb_z^* , são dadas por (4.3), (4.4) e (4.5).

$$pc_{z_a} = vb_z^* \cdot ib_a \quad (4.3)$$

$$pc_{z_b} = vb_z^* \cdot ib_b \quad (4.4)$$

$$pc_{z_c} = vb_z^* \cdot ib_c \quad (4.5)$$

Como a malha de Controle da Corrente impõe duas correntes, ib_a e ib_b , e ib_c é determinada a partir de uma combinação linear, $ib_c = (-ib_a - ib_b)$, pode-se escrever:

$$pc_{z_a} = vb_z^* \cdot ib_a \quad (4.6)$$

$$pc_{z_b} = vb_z^* \cdot ib_b \quad (4.7)$$

$$pc_{z_c} = vb_z^* \cdot (-ib_a - ib_b) = -pc_{z_a} - pc_{z_b} \quad (4.8)$$

Como a soma das potências instantâneas deve ser nula, a potência a ser produzida no braço 'c' necessariamente precisa ser igual ao oposto da soma das potências a serem produzidas nos braços 'a' e 'b' como mostra (4.8)²¹.

A malha de Balanceamento, então, segue raciocínio exposto no sentido inverso. A partir dos erros detectados nos braços 'a' e 'b', determina pc_{z_a} e pc_{z_b} e, a partir delas, gera pc_{z_c} , através da combinação linear, $pc_{z_c} = -(pc_{z_a} + pc_{z_b})$. Com as três potências produz a tensão de sequência zero, vb_z^* , que satisfaz (4.6), (4.7) e (4.8).

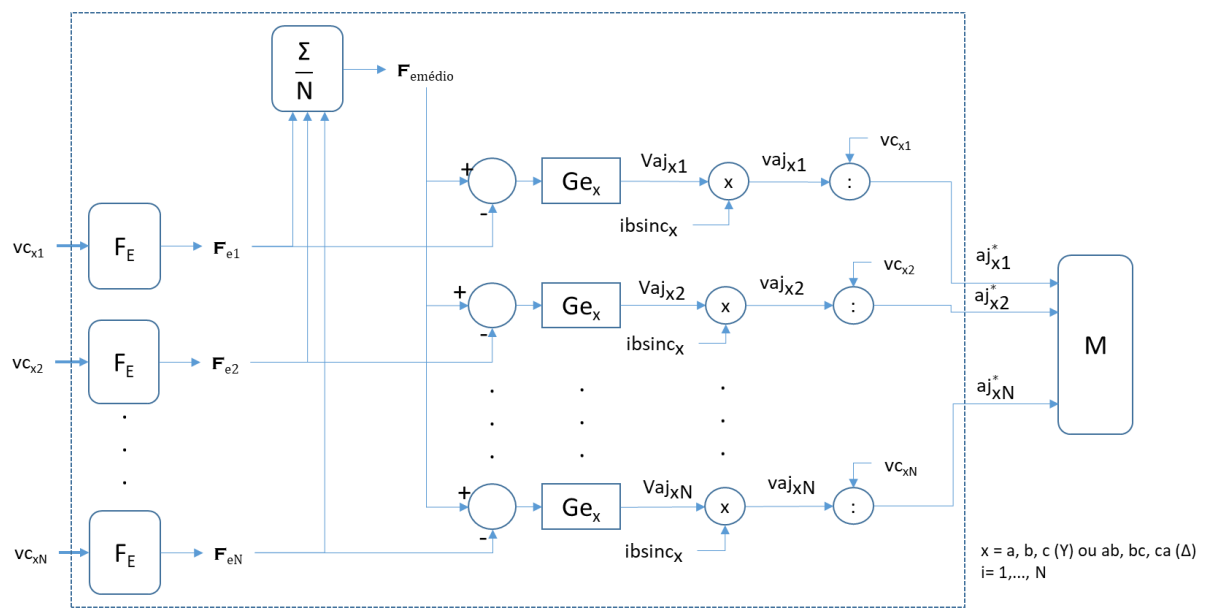
No caso da configuração Δ (SDBC) como há um grau de liberdade a mais e cada braço pode impor correntes arbitrárias (vide item 4.2) para garantir o balanceamento, a malha precisa controlar o fluxo de potência nos três braços.

²¹ Note que não é possível garantir essa condição caso pc_{z_c} seja determinada a partir do monitoramento da tensão no braço 'c'. Na prática, qualquer desbalanço provocado pela tolerância de componentes, precisão de sensores, e outras fontes de variabilidade no funcionamento dos braços do conversor comprometem a condição de soma nula das potências instantâneas.

4.4. Bloco de Equalização Individual

Este é o bloco que realiza a equalização das tensões CC individuais dos submódulos de cada braço controlando a distribuição de potência ativa entre os submódulos de um mesmo braço (Capítulo 3, item 3.2.5). Compõe o segundo laço de controle do sistema e opera em paralelo com o laço do qual fazem parte os blocos de Controle da Corrente e de Controle da Tensão CC. A Figura 4.10 apresenta sua organização para um braço x do conversor. A organização é a mesma independente da configuração de conexão do conversor à rede, Y(SSBC) e Δ (SDBC).

Figura 4. 10 – Bloco de Equalização Individual



Fonte: Próprio autor

As grandezas F_{ei} ($i=1, 2, \dots, N$) não são necessariamente as tensões CC nos submódulos, mas grandezas de controle relacionadas a elas. F_E é a função que produz f_{ei} a partir das tensões CC dos submódulos. Em relação à variável do Controle da Tensão CC, F_x , pode-se afirmar que $F_x = \sum_{i=1}^N F_{ei}$ ou que, em regime, $F_{ei} = \frac{F_x}{N}$.

O bloco contém uma malha de controle para cada um dos N submódulos de cada braço. Essas malhas comparam F_{ei} à média aritmética $F_{emédio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{ei}$. O uso da média como referência é condição necessária para garantir que a somatória dos ajustes individuais seja nula e não haja interferência com as malhas de Controle da Tensão CC. Dessa forma, garante-se que a ação de equalização realize apenas a

distribuição de potência ativa entre os submódulos e não provoque alterações na tensão total do braço e na corrente injetada.

Os erros produzidos pelas comparações são introduzidos nos controladores, G_{ex} . Os sinais, $V_{aj_{xi}}$, produzidos pelos controladores, modulam sinais unitários, ib_{sinc_x} , de mesma frequência e fase da corrente de cada braço gerando, $v_{aj_{xi}}$, que ajustam individualmente os sinais de modulação de cada submódulo (vide figuras 4.4 e 4.5 no item 4.1). Importante notar que os ajustes, $v_{aj_{xi}}$, estão em fase com a corrente o que permite a distribuição individualizada de potência ativa entre os submódulos.

Os sinais de ajuste, aj_{xi}^* de fato entregues ao bloco de modulação, M , nada mais são que as tensões de ajuste, $v_{aj_{xi}}$, normalizadas pelas tensões CC, $v_{c_{xi}}$, dos respectivos submódulos.

4.5. Conclusões Parciais do Capítulo 4

Neste capítulo foi descrita a arquitetura que permite atingir os dois objetivos básicos de controle de um conversor MMCC operando como STATCOM: i) injetar corrente reativa de acordo com uma referência e; ii) regular as tensões individuais de cada submódulo que compõe os braços do conversor.

Foi visto que o sistema é subatuado (número de variáveis a controlar > número de entradas de controle) e, para atingir tais objetivos, a arquitetura distribui a ação de controle em malhas atuando em cascata e em paralelo e de forma desacoplada. Essas malhas estão organizadas em dois laços de controle que atuam em paralelo. O primeiro realiza a Injeção de Corrente, a Regulação da Média e Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor. O segundo laço promove a equalização individual das tensões CC de cada submódulo que compõe os braços do conversor.

Fazendo uso das combinações entre as componentes simétricas da tensão e corrente estudadas no Capítulo 3, a Regulação da Média das tensões CC dos braços do conversor é realizada através da injeção de corrente de sequência positiva em fase com a tensão dos braços e o seu Balanceamento através da imposição de tensão de sequência zero, na configuração Y(SSBC), ou da injeção de corrente de sequência zero, na configuração Δ (SDBC).

Deve-se observar que as malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento trabalham de forma desacoplada. A primeira produz fluxo de potência entre o

conversor e a rede e o distribui igualmente nos braços. Dessa forma, altera a média sem afetar o balanço das tensões CC. A segunda malha produz fluxos de potência diferentes nos braços cuja soma é nula. Portanto, somente altera o balanço sem afetar a média das tensões CC.

A Equalização Individual das tensões CC é realizada por malhas que produzem ajustes individuais nos índices de modulação de cada submódulo. Esses ajustes, em fase com a corrente através dos braços do conversor, promovem um fluxo de potência ativa entre os submódulos levando suas tensões CC ao equilíbrio. Deve-se observar, também, que a soma desses ajustes é nula o que garante a ação desacoplada dessa malhas.

No Capítulo 5 são modeladas as plantas e definidas as implementações detalhadas das malhas de controle.

5. Modelagem

Neste capítulo é realizada a modelagem das plantas das malhas estabelecidas na arquitetura de controle descrita no Capítulo 4 que permitirá, no Capítulo 6, a escolha dos controladores a serem utilizados e o ajuste dos seus parâmetros com base em critérios específicos de desempenho. No item 5.1 modela-se a planta das malhas de Controle da Corrente para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). No item 5.2 faz-se a modelagem da planta para as malhas do Controle da Tensão CC. Por último, a planta das malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos de cada braço é modelada no item 5.3.

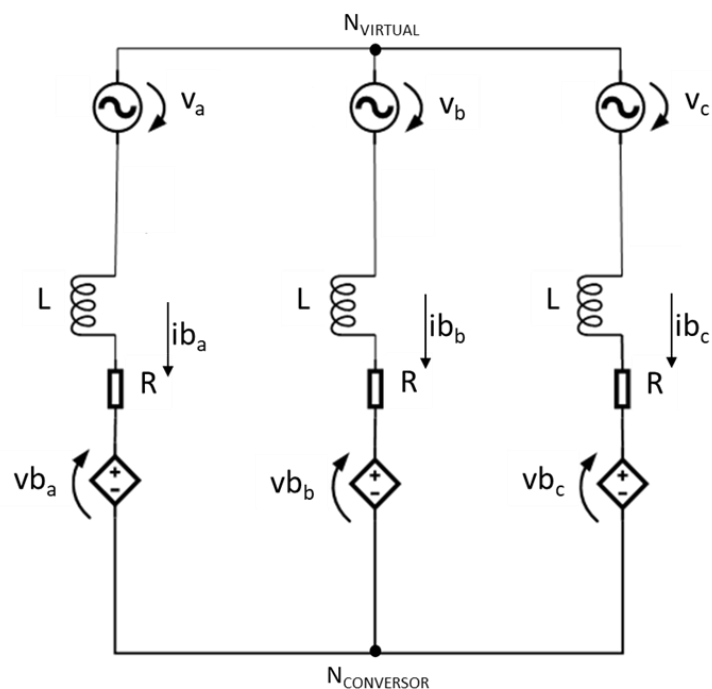
5.1. Controle da Corrente Injetada

Os modelos apresentados a seguir estabelecem a relação entre as correntes, ib_x , e tensões, vb_x , nos braços do conversor, nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). Esses modelos consideram o conversor uma fonte ideal que reproduz fielmente as tensões de referência impostas.

5.1.1. Configuração Y(SSBC)

A Figura 5.1 apresenta o circuito equivalente do conversor conectado à rede em Y(SSBC).

Figura 5.1 – Circuito Equivalente do Conversor Conectado em Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

As tensões de fase da rede, medidas em relação a um neutro virtual adequado, N_{VIRTUAL} , são apresentadas em (5.1). Apresentam soma instantaneamente nula e, portanto, considera-se que as tensões da rede não possuem sequência zero (vide Apêndice B).

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

As médias locais das tensões multinível geradas nos braços do conversor são representadas por v_{b_a} , v_{b_b} e v_{b_c} que podem ser decompostas nas componentes apresentadas em (5.2).

$$\mathbf{vb} = \begin{bmatrix} v_{b_a} \\ v_{b_b} \\ v_{b_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{b_a}^* + v_{b_z}^* \\ v_{b_b}^* + v_{b_z}^* \\ v_{b_c}^* + v_{b_z}^* \end{bmatrix} = \mathbf{vb}^* + \mathbf{vz}^* \quad (5.2)$$

De acordo com a arquitetura proposta no item 4.2 (Figura 4.6), $v_{b_a}^*$, $v_{b_b}^*$, $v_{b_c}^*$ são as parcelas de soma instantaneamente nula provenientes da Malha de Corrente (vide item 4.2) e $v_{b_z}^*$ é a parcela de sequência zero proveniente da Malha de Balanceamento das tensões CC nos braços do conversor (vide item 4.3).

As correntes nas fases, ou nos braços do conversor, são iguais às correntes de linha da rede e estão representadas em (5.3). Importante ressaltar que, por se tratar de um sistema a 3 fios, a soma das correntes é nula.

$$\mathbf{ib} = \begin{bmatrix} i_{b_a} \\ i_{b_b} \\ i_{b_c} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Conforme apresentado em [39], aplicando-se a primeira e segunda leis de Kirchhoff ao circuito, pode-se escrever as equações das malhas de corrente conforme apresentado no sistema abaixo.

$$\mathbf{R} \mathbf{ib} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \mathbf{ib} = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{vb}) \quad (5.4)$$

onde

$$\mathbf{B} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Substituindo (5.2) em (5.4) obtém-se:

$$R \mathbf{ib} + L \frac{d}{dt} \mathbf{ib} = \mathbf{B.v} - \mathbf{B.}(\mathbf{vb}^* + \mathbf{vz}^*) \quad (5.6)$$

Nota-se que a parcela $\mathbf{B.vz}^*$ é nula. Além disso, $\mathbf{B.v} = \mathbf{v}$ e $\mathbf{B.vb}^* = \mathbf{vb}^*$ uma vez que \mathbf{v} e \mathbf{vb}^* têm soma instantânea nula. Assim, (5.6) pode ser reescrita na forma apresentada em (5.7)

$$R \mathbf{ib} + L \frac{d}{dt} \mathbf{ib} = \mathbf{v} - \mathbf{vb}^* \quad (5.7)$$

Na Figura 4.6 nota-se que \mathbf{vb}_x^* é composto pelos sinais produzidos pelos controladores da malha, \mathbf{vb}_x' , e pelo *feedforward* das tensões de fase da rede \mathbf{v}_x , ou seja:

$$\mathbf{vb}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{vb}_a^* \\ \mathbf{vb}_b^* \\ \mathbf{vb}_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{vb}_a' \\ \mathbf{vb}_b' \\ \mathbf{vb}_c' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \mathbf{vb}' + \mathbf{v} \quad (5.8)$$

Portanto, fazendo a substituição de (5.8) em (5.7) chega-se a:

$$R \mathbf{ib} + L \frac{d}{dt} \mathbf{ib} = \mathbf{v} - \mathbf{vb}' - \mathbf{v} \quad (5.9)$$

Ou, simplesmente:

$$R \mathbf{ib} + L \frac{d}{dt} \mathbf{ib} = -\mathbf{vb}' \quad (5.10)$$

Onde se eliminou o distúrbio causado pelas tensões da rede, \mathbf{v}^{22} .

Do exposto no item 4.2 sabe-se que, devido à impossibilidade de se impor três correntes, apenas dois controladores são utilizados e a terceira ação de controle, na fase c, pode ser definida por $\mathbf{vb}_c' = -\mathbf{vb}_a' - \mathbf{vb}_b'$ (Figura 4.6) conforme proposto por [32]. Portanto, a partir de (5.10) chega-se a:

$$R \begin{bmatrix} \mathbf{ib}_a \\ \mathbf{ib}_b \\ \mathbf{ib}_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{ib}_a \\ \mathbf{ib}_b \\ \mathbf{ib}_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{vb}_a' \\ \mathbf{vb}_b' \\ -\mathbf{vb}_a' - \mathbf{vb}_b' \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Analisando (5.11) conclui-se que:

²² Sabe-se que, na prática, este cancelamento não é perfeito [39], mas este fato não será considerado nesta formulação.

- A imposição de $vb'_c = -vb'_a - vb'_b$ resulta em um sistema reduzido (5.12), desacoplado, de ordem 2, que permite estabelecer malhas de controle independentes para as fases a e b.

$$R \begin{bmatrix} ib'_a \\ ib'_b \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ib'_a \\ ib'_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} vb'_a \\ vb'_b \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

- $Rib'_c + L \frac{dib'_c}{dt} = -vb'_a - vb'_b$. Ou seja, ib'_c é função de vb'_a e vb'_b . Portanto, controlando as fases a e b, garante-se o controle da fase c.

Portanto, para uma fase x, onde x = a, b, tem-se:

$$\frac{dib'_x}{dt} + \frac{R}{L} ib'_x = -\frac{1}{L} vb'_x \quad (5.13)$$

Fazendo a transformada de Laplace de (5.13) considerando as condições iniciais nulas, obtém-se:

$$sIb'_x(s) + \frac{R}{L} Ib'_x(s) = -\frac{1}{L} Vb'_x(s) \quad (5.14)$$

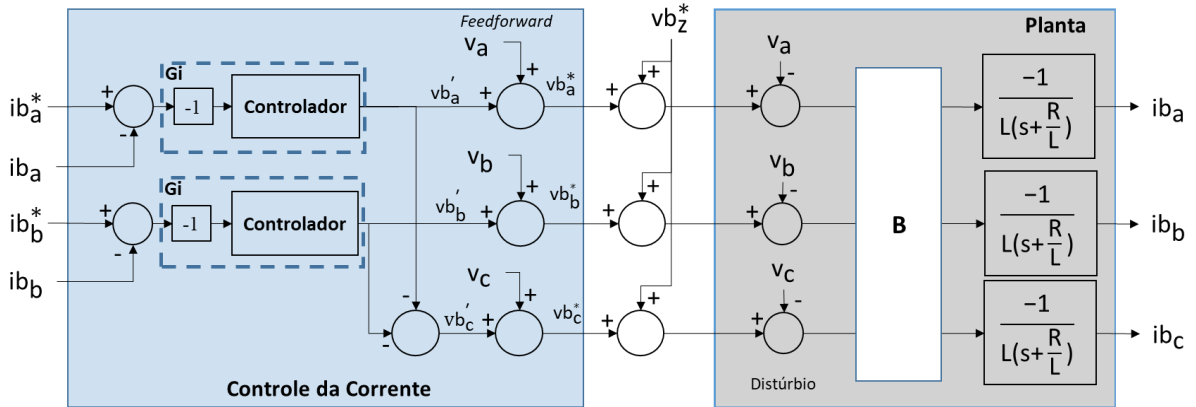
$$Ib'_x(s) = -\frac{Vb'_x(s)}{L(s + \frac{R}{L})} \quad (5.15)$$

De (5.15) extrai-se a função de transferência da planta.

$$\frac{Ib'_x(s)}{Vb'_x(s)} = \frac{-1}{L(s + \frac{R}{L})} \quad (5.16)$$

A Figura 5.2 apresenta o sistema de controle em malha fechada da corrente injetada pelo conversor conectado à rede em Y(SSBC). Os retângulos pontilhados na figura indicam os componentes dos controladores G_i da Figura 4.6 do Capítulo 4, que apresenta a arquitetura do Controle da Corrente para esta configuração.

Figura 5.2 - Controle da Corrente no Conversor - Y(SSBC)

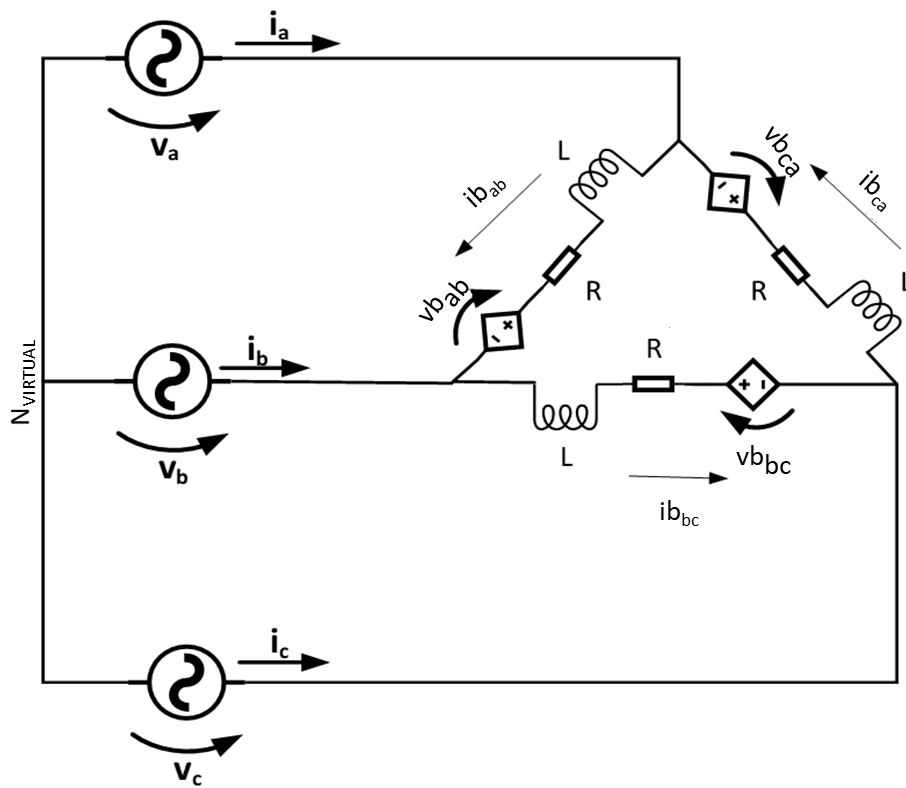


Fonte: Próprio Autor

5.1.2. Configuração Δ (SDBC)

A Figura 5.3 apresenta circuito equivalente do conversor conectado à rede em Δ (SDBC).

Figura 5.3 – Circuito Equivalente – Conversor Conectado em Δ (SDBC)



Fonte: Próprio Autor

As tensões de fase da rede são representadas por v_a , v_b e v_c . A partir das tensões de fase são definidas as tensões de linha utilizadas na modelagem.

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

As médias locais das tensões produzidas pelos braços do conversor são dadas por vb_{ab} , vb_{bc} , vb_{ca} e, como mostra (5.18), são iguais às referências produzidas pela malha de corrente (Figura 4.7).

$$\mathbf{vb} = \begin{bmatrix} vb_{ab} \\ vb_{bc} \\ vb_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vb_{ab}^* \\ vb_{bc}^* \\ vb_{ca}^* \end{bmatrix} = \mathbf{vb}^* \quad (5.18)$$

As correntes em cada braço, ib_{ab} , ib_{bc} e ib_{ca} possuem componentes de soma instantânea nula, ib'_{ab} , ib'_{bc} , ib'_{ca} e de sequência zero, ib_z , como mostra (5.19).

$$\mathbf{ib} = \begin{bmatrix} ib_{ab} \\ ib_{bc} \\ ib_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ib'_{ab} + ib_z^* \\ ib'_{bc} + ib_z^* \\ ib'_{ca} + ib_z^* \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

O sistema de equações relacionando corrente e tensões nos braços do conversor é apresentado em (5.20)

$$L \frac{d\mathbf{ib}}{dt} + R \mathbf{ib} = \mathbf{v} - \mathbf{vb} \quad (5.20)$$

Com base em (5.18), substituindo \mathbf{vb} por \mathbf{vb}^* chega-se (5.21).

$$L \frac{d\mathbf{ib}}{dt} + R \mathbf{ib} = \mathbf{v} - \mathbf{vb}^* \quad (5.21)$$

Neste sistema não há acoplamento. Assim, para um braço x do conversor onde $x=ab$, bc , ca tem-se:

$$L \frac{dib_x}{dt} + R ib_x = v_x - vb_x^* \quad (5.22)$$

Na arquitetura apresentada no item 4.2 (Figura 4.7) observa-se que vb_x^* inclui o *feedforward* da tensão da rede ($vb_x^* = vb'_x + v_x$). Reescreve-se, então, (5.22) chegando a (5.23).

$$L \frac{dib_x}{dt} + R ib_x = v_x - vb'_x - v_x \quad (5.23)$$

Ou, simplesmente:

$$\frac{di_{b_x}}{dt} + \frac{R}{L} i_{b_x} = -\frac{1}{L} v_{b_x}' \quad (5.24)$$

Fazendo a transformada de Laplace da equação e considerando condições iniciais nulas, obtém-se:

$$s i_{b_x}(s) + \frac{R}{L} i_{b_x}(s) = -\frac{1}{L} V_{b_x}'(s) \quad (5.25)$$

Isolando $i_{b_x}(s)$ chega-se a:

$$i_{b_x}(s) = \frac{-V_{b_x}'(s)}{L(s + \frac{R}{L})} \quad (5.26)$$

A função de transferência da planta é apresentada a seguir.

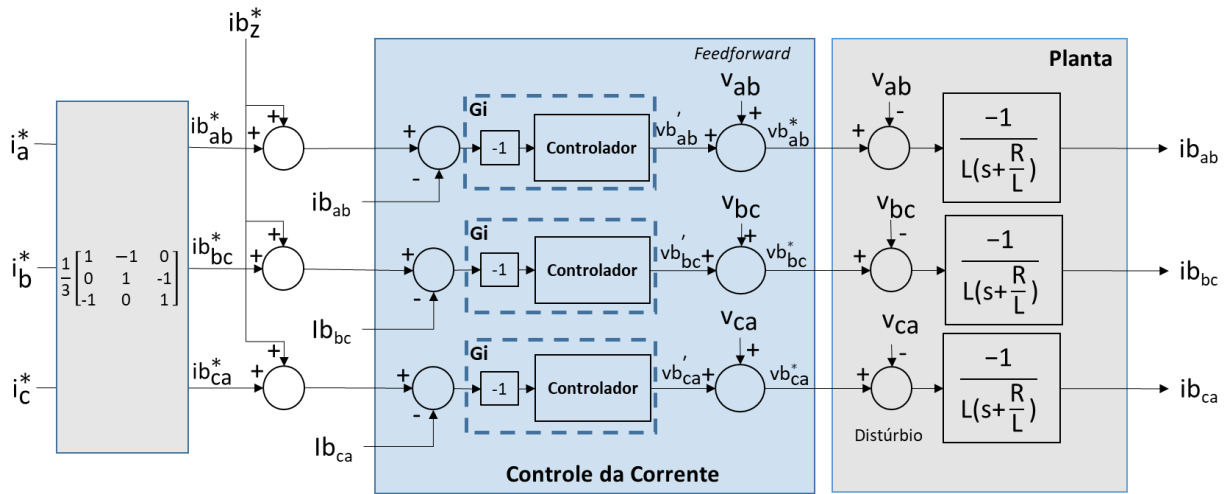
$$\frac{i_{b_x}(s)}{V_{b_x}'(s)} = \frac{-1}{L(s + \frac{R}{L})} \quad (5.27)$$

A Figura 5.4 apresenta o sistema de controle em malha fechada da corrente injetada pelo conversor conectado à rede em Δ (SDBC). Note nos retângulos pontilhados a indicação dos componentes dos controladores G_i da Figura 4.7 do Capítulo 4, que apresenta a arquitetura do Controle de Corrente para esta configuração.

Como as referências de interesse são as correntes ortogonais de linha, usa-se a transformação (5.28) para se obter as referências de fase para os braços. É importante frisar que esta transformação produz referências cuja soma instantânea é nula (não possuem sequência zero). A parcela de sequência zero da referência, $i_{b_z}^*$, como já discutido no item 4.2 é introduzida pela malha de Balanceamento das tensões CC dos braços (vide item 4.3).

$$\begin{bmatrix} i_{b_{ab}} \\ i_{b_{bc}} \\ i_{b_{ca}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Figura 5.4 - Controle da Corrente no Conversor – Δ(SDBC)



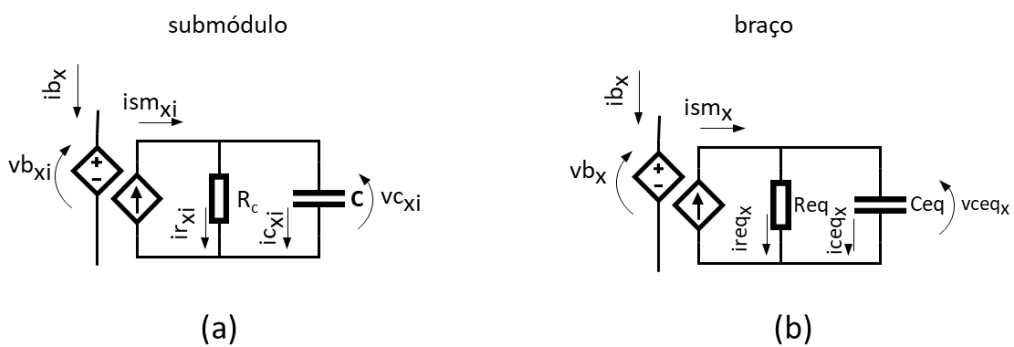
Fonte: Próprio Autor

5.2. Controle das Tensões CC nos Braços do Conversor

Neste item é realizada a modelagem da planta das malhas de controle das tensões CC nos braços do conversor. Após uma breve descrição dos circuitos equivalentes do braço do conversor e dos submódulos que o compõem, os modelos são definidos para a malha de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC.

A Figura 5.5 apresenta os circuitos equivalentes para um único submódulo (a) e para um braço (b) de um conversor composto de N submódulos conectados em cascata.

Figura 5.5 - Circuitos Equivalentes – Submódulo (a) e Braço do Conversor (b)



$x=a,b,c$ (Y) ou ab, bc, ca (Δ)

$i= 1, 2, \dots, N$

Fonte: Próprio autor

As relações entre as grandezas observadas nos dois circuitos, e estabelecidas em detalhe no Apêndice A, encontram-se sumarizadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Circuito Equivalente – Relações entre Grandezas

Submódulo	Braço
C	$C_{eq} = \frac{C}{N}$
R_c	$R_{eq} = NR_c$
$v_{b_{xi}} = m_{xi} v_{c_{xi}}$	$v_{b_x} = m_x v_{c_{eq_x}}$
$i_{s_{m_{xi}}} = m_{xi} i_{b_x}$	$i_{s_{m_x}} = m_x i_{b_x}$
Em regime:	
$m_{xi} = m_x$ $v_{c_{xi}} = v_{c_x}$ $i_{s_{m_{xi}}} = i_{s_{m_x}}$ $v_{c_{eq_x}} = N v_{c_x}$	

Importante notar que o circuito equivalente apresentado é comum para as duas topologias Y(SSBC) e Δ (SDBC) e considera que as malhas de corrente são ideais e injetam fielmente a corrente demandada pelos sistemas de controle do conversor.

No circuito equivalente para um braço x do conversor, apresentado na Figura 5.5(b), a corrente no lado CC é dada por:

$$i_{s_{m_x}} = i_{c_{eq_x}} + i_{r_{eq_x}} \quad (5.29)$$

Considerando as relações indicadas na Tabela 5.1 pode-se escrever:

$$i_{c_{eq_x}} + i_{r_{eq_x}} = m_x i_{b_x} \quad (5.30)$$

A equação (5.30) pode ser reescrita colocando a corrente no lado CC do conversor em função da tensão no capacitor:

$$C_{eq} \frac{dv_{c_{eq_x}}}{dt} + \frac{v_{c_{eq_x}}}{R_{eq}} = m_x i_{b_x} \quad (5.31)$$

E, sabendo que $m_x = \frac{v_{b_x}}{v_{c_{eq_x}}}$:

$$C_{eq} \frac{dv_{c_{eq_x}}}{dt} + \frac{v_{c_{eq_x}}}{R_{eq}} = \frac{v_{b_x}}{v_{c_{eq_x}}} i_{b_x} \quad (5.32)$$

Fazendo uso das relações apresentadas na Tabela 5.1, (5.32) é reescrita com os valores de $v_{c_{eq_x}}$, R_{eq} e C_{eq} colocados em função v_{c_x} , R_c e C.

$$\frac{C}{N} \frac{N dv_{c_x}}{dt} + \frac{N v_{c_x}}{NR_c} = \frac{v_{b_x}}{N v_{c_x}} i_{b_x} \quad (5.33)$$

Multiplicando ambos os lados por Nvc_x chega-se a:

$$C vc_x \frac{Ndv_c x}{dt} + \frac{Nvc_x^2}{R_c} = vb_x ib_x \quad (5.34)$$

Mas $vc_x \frac{dv_c x}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv_c x^2}{dt}$, então:

$$\frac{C}{2} \frac{Ndv_c x^2}{dt} + \frac{Nvc_x^2}{R_c} = vb_x ib_x \quad (5.35)$$

Se $\lambda c_x = Nvc_x^2$ e $vb_x ib_x = pc_x$ tem-se:

$$\frac{C}{2} \frac{d\lambda c_x}{dt} + \frac{\lambda c_x}{R_c} = pc_x \quad (5.36)$$

Multiplicando ambos os lados por $2/C$, obtém-se (5.37).

$$\frac{d\lambda c_x}{dt} + 2 \frac{\lambda c_x}{R_c C} = \frac{2}{C} pc_x \quad (5.37)$$

Observa-se que a mudança de variável, $\lambda c_x = Nvc_x^2$, produz uma equação diferencial linear que estabelece a relação entre a potência instantânea no braço, pc_x , e a soma do quadrado das tensões CC dos submódulos do braço do conversor, λc_x .

Voltando ao Capítulo 4, em seu item 4.3, nota-se que λc_x é a grandeza efetivamente controlada, F_x , e a função F_G , que a produz a partir das tensões nos capacitores dos submódulos do braço x, é $F_G = \sum_{i=1}^N vc_{xi}^2 = Nvc_x^2$.

Considerando que λc_x e pc_x são compostas de uma componente média, global, comum aos braços, e de uma componente de balanceamento específica para cada braço reescreve-se (5.37) como segue:

$$\frac{d(\lambda c_{glb} + \lambda c_{bal_x})}{dt} + 2 \frac{(\lambda c_{glb} + \lambda c_{bal_x})}{R_c C} = \frac{2}{C} (Pc_{glb} + Pc_{bal_x}) \quad (5.38)$$

Onde deve-se levar em conta que:

$$\lambda c_{glb} = \frac{1}{3} \sum_x \lambda c_x \quad (5.39)$$

$$\lambda c_{bal_x} = \lambda c_x - \lambda c_{glb} \quad (5.40)$$

E, portanto:

$$\sum_x \lambda c_{bal_x} = 0 \quad (5.41)$$

onde $x=a,b,c$ (Y) ou $x=ab,bc,ca$ (Δ).

Controlando λ_{c_glb} injeta-se ou drena-se potência ativa trifásica na rede distribuindo-a igualmente nos braços ($P_{c_glb} = \frac{P_{3\phi}}{3}$). Controlando $\lambda_{c_bal_x}$, e considerando que $\sum \lambda_{c_bal_x}$ é nula, promove-se fluxo de potência nos braços sem alterar P_{c_glb} , ou seja, $\sum P_{c_bal_x}$ também é nula.

Pode-se, então, aplicar o teorema da superposição em (5.38) produzindo as equações diferenciais (5.42) e (5.43) a partir das quais, respectivamente, desenvolvem-se os modelos para Regulação da Média Global e Balanceamento das tensões CC nos braços.

$$\frac{d\lambda_{c_glb}}{dt} + 2 \frac{\lambda_{c_glb}}{R_c C} = \frac{2}{C} P_{c_glb} \quad (5.42)$$

$$\frac{d\lambda_{c_bal_x}}{dt} + 2 \frac{\lambda_{c_bal_x}}{R_c C} = \frac{2}{C} P_{c_bal_x} \quad (5.43)$$

5.2.1. Regulação da Média Global das Tensões CC dos Braços

Fazendo a transformada de Laplace de (5.42), considerando condições iniciais nulas, obtém-se:

$$s \lambda_{c_glb}(s) + 2 \frac{\lambda_{c_glb}(s)}{R_c C} = \frac{2}{C} P_{c_glb}(s) \quad (5.44)$$

ou

$$\frac{\lambda_{c_glb}(s)}{P_{c_glb}(s)} = \frac{2/C}{\left(s + \frac{2}{R_c C}\right)} \quad (5.45)$$

A equação (5.45) apresenta a função de transferência da planta da Malha de Regulação da Média Global das tensões CC nos braços. Entretanto, a potência não é uma grandeza diretamente acessível. É necessário controlá-la através de uma outra grandeza diretamente controlável, no caso, a corrente no braço. É necessário, portanto, estabelecer uma forma de obter uma referência para a corrente a ser injetada. Para isso, primeiramente, é importante estudar a potência gerada nos braços do conversor.

Assumindo a presença de componentes de sequência positiva e negativa nas tensões e correntes nos braços do conversor, como indicam (5.46) e (5.47), a potência

instantânea em cada braço do conversor é dada por (5.48) onde os subíndices p e n denotam sinais de sequência positiva e negativa respectivamente.

$$vb_x = vb_{xp} + vb_{xn} \quad (5.46)$$

$$ib_x = ib_{xp} + ib_{xn} \quad (5.47)$$

$$pc_x = vb_x ib_x = (vb_{xp} ib_{xp}) + (vb_{xp} ib_{xn}) + (vb_{xn} ib_{xp}) + (vb_{xn} ib_{xn}) \quad (5.48)$$

A potência instantânea trifásica é então dada por (5.49).

$$pc_{3\phi} = \sum_x pc_x = \sum_x (vb_{xp} ib_{xp}) + \sum_x (vb_{xp} ib_{xn}) + \sum_x (vb_{xn} ib_{xp}) + \sum_x (vb_{xn} ib_{xn}) \quad (5.49)$$

Onde $x=a, b, c$ (Y) e $x=ab, bc, ca$ (Δ)

Com base na análise realizada no Capítulo 3, em relação aos termos que compõem $pc_{3\phi}$, pode-se afirmar que:

- O termo $\sum_x (vb_{xp} ib_{xn}) + (vb_{xn} ib_{xp})$, por ser composto de produtos de sinais de seqüências opostas, tem nível médio nulo.
- Os termos $\sum_x (vb_{xp} ib_{xp})$ e $\sum_x (vb_{xn} ib_{xn})$ envolvem o produto de sinais de mesma seqüência e, matematicamente, podem produzir níveis médios diferentes de zero. Em princípio, a ação sobre qualquer um desses dois termos, ou mesmo sobre uma combinação de ambos, pode satisfazer o objetivo de promover fluxo controlado de potência entre rede e conversor. A arquitetura de controle estabelecida é que determina a abordagem a ser utilizada.

A arquitetura proposta no item 4.3 concentra a Regulação da Média Global das tensões CC nos braços na injeção de corrente de corrente de seqüência positiva. Ou seja, a ação de controle se dá através do termo $\sum_x (vb_{xp} ib_{xp})$ e será descrita a seguir.

Considerando, portanto, a arquitetura de controle adotada, a potência média trifásica injetada ou drenada pelo conversor é dada por (5.50).

$$Pc_{3\phi} = \langle pc_{3\phi} \rangle = \langle \sum_x (vb_{xp} ib_{xp}) \rangle \quad (5.50)$$

$Pc_{3\phi}$ é dada por (5.51).

$$Pc_{3\phi} = 3 \frac{Vb_p I b_p}{2} \cos(\varphi_v - \varphi_i) \quad (5.51)$$

Onde V_{b_p} e I_{b_p} são as amplitudes (pico) da tensão e corrente nos braços e φ_v e φ_i suas respectivas fases. Assumindo a fase da tensão no braço igual a zero pode-se considerar que o termo $I_{b_p} \cos(\varphi_v - \varphi_i)$ igual a $I_{b_{p||}}$ que constitui a amplitude da componente da corrente em fase com a tensão no braço. Assim, (5.51) pode ser reescrita como mostra (5.52).

$$P_{C_{3\phi}} = 3 \frac{V_{b_p} I_{b_{p||}}}{2} \quad (5.52)$$

De acordo com a função de transferência apontada em (5.45) o que se busca controlar é a parcela P_{c_glb} que nada mais é que a média aritmética das potências médias injetadas nos braços do conversor como indica (5.53)

$$P_{c_glb} = \frac{1}{3} P_{C_{3\phi}} = \frac{V_{b_p} I_{b_{p||}}}{2} \quad (5.53)$$

Portanto, a partir de (5.53), conhecendo V_{b_p} , pode-se extrair a amplitude da componente de corrente a ser injetada como mostra (5.54)

$$\frac{P_{c_glb}}{\frac{V_{b_p}}{2}} = \frac{\frac{V_{b_p} I_{b_{p||}}}{2}}{\frac{V_{b_p}}{2}} = I_{b_{p||}} \quad (5.54)$$

A referência para a componente da corrente de sequência positiva, em fase com a tensão no braço, é produzida multiplicando a amplitude obtida em (5.54) por um sinal unitário, $v_{p||_{x||}}$, em fase com a tensão da rede (vide figuras 5.6 e 5.7).

$$i_{b_{x||}}^* = I_{b_{p||}} v_{p||_{x||}} \quad (5.55)$$

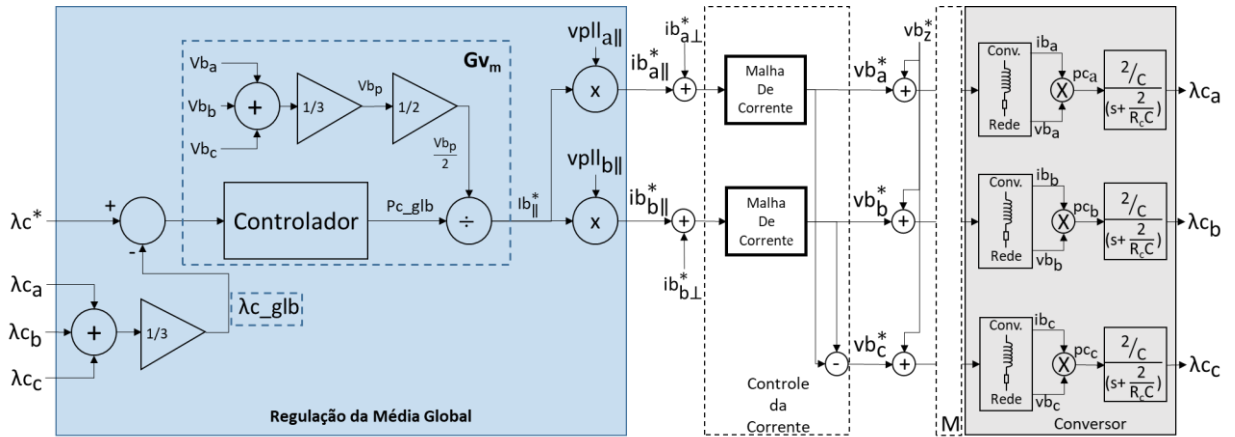
Voltando à função de transferência apresentada em (5.45), e aplicando o processo descrito acima para produzir uma referência de corrente de sequência positiva em fase com a tensão no braço, é possível compor uma malha de controle que regule λ_{c_glb} e, com isso, a Média Global das tensões CC nos braços do conversor.

As figuras 5.6 e 5.7 apresentam a organização da malha de controle para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). Os retângulos pontilhados identificam os componentes do controlador G_{v_m} e o sinal λ_{c_glb} que equivale a $F_{médio}$ nas figuras 4.8 e 4.9 do capítulo anterior.

Um ponto a ser destacado na organização da malha está na aproximação feita para se determinar o valor da amplitude V_{b_p} . Na arquitetura proposta, a média das amplitudes das tensões nos braços é utilizada como uma aproximação. É fato que tal

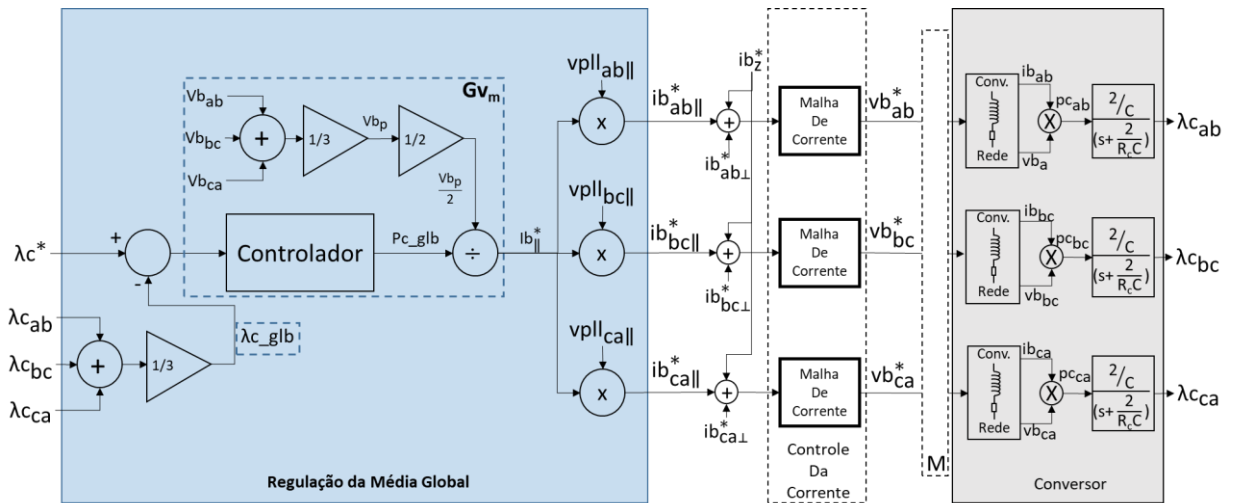
aproximação perde precisão em situações em que o conversor é levado a injetar sequência negativa. Por isso, o desempenho dessa abordagem será avaliado em situações de desbalanço no Capítulo 6.

Figura 5.6 - Controle da Tensão CC – Regulação da Média das Tensões CC dos Braços – Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

Figura 5.7 - Controle da Tensão CC – Regulação da Média das Tensões CC dos Braços – Δ(SDBC)



Fonte: Próprio autor

5.2.2. Balanceamento das Tensões CC dos Braços

Fazendo a transformada de Laplace de (5.43), considerando as condições iniciais nulas, obtém-se a função de transferência indicada em (5.56).

$$s\lambda_{c_bal_x}(s) + 2 \frac{\lambda_{c_bal_x}(s)}{R_c C} = \frac{2}{C} P_{c_bal_x}(s) \tag{5.56}$$

Ou

$$\frac{\lambda_{c_bal_x}(s)}{P_{c_bal_x}(s)} = \frac{2/C}{(s + \frac{2}{R_c C})} \quad (5.57)$$

A modelagem realizada a seguir estabelece uma forma de controlar $P_{c_bal_x}$ através da injeção de sequência zero para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC).

No caso Y(SSBC), sendo $V_x \cos(\omega t + \varphi_{vx})$ as tensões de fase e $I_{bx} \cos(\omega t + \varphi_{ix})$ as correntes de linha na rede, desconsideradas perdas, a potência média, P_{c_x} , produzida em cada braço é dada pelas equações (5.58), (5.59) e (5.60).

$$P_{c_a} = \langle V_a \cos(\omega t + \varphi_{va}) I_{ba} \cos(\omega t + \varphi_{ia}) \rangle = \frac{V_a I_{ba}}{2} \cos(\varphi_{va} - \varphi_{ia}) \quad (5.58)$$

$$P_{c_b} = \langle V_b \cos(\omega t + \varphi_{vb}) I_{bb} \cos(\omega t + \varphi_{ib}) \rangle = \frac{V_b I_{bb}}{2} \cos(\varphi_{vb} - \varphi_{ib}) \quad (5.59)$$

$$P_{c_c} = \langle V_c \cos(\omega t + \varphi_{vc}) I_{bc} \cos(\omega t + \varphi_{ic}) \rangle = \frac{V_c I_{bc}}{2} \cos(\varphi_{vc} - \varphi_{ic}) \quad (5.60)$$

Importante notar que na operação como STATCOM, P_{c_x} somente não é nula quando há desbalanço (presença de sequência negativa) na tensão ou na corrente e, como visto no Capítulo 3, existe uma tensão de sequência zero, $v_{bz}^* = V_{bz} \cos(\omega t + \varphi_{vz})$, que produz valores médios de potência, $P_{c_bal_x}$, que podem compensar P_{c_x} produzida por tais desbalanços. Portanto, pode-se afirmar que:

$$-P_{c_a} = P_{c_bal_a} = \langle V_{bz}^* \cos(\omega t + \varphi_{vz}^*) I_{ba} \cos(\omega t + \varphi_{ia}) \rangle = \frac{V_{bz}^* I_{ba}}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ia}) \quad (5.61)$$

$$-P_{c_b} = P_{c_bal_b} = \langle V_{bz}^* \cos(\omega t + \varphi_{vz}^*) I_{bb} \cos(\omega t + \varphi_{ib}) \rangle = \frac{V_{bz}^* I_{bb}}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ib}) \quad (5.62)$$

$$-P_{c_c} = P_{c_bal_c} = \langle V_{bz}^* \cos(\omega t + \varphi_{vz}^*) I_{bc} \cos(\omega t + \varphi_{ic}) \rangle = \frac{V_{bz}^* I_{bc}}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ic}) \quad (5.63)$$

A seguir propõe-se um método instantâneo para determinação de $v_{bz}^* = V_{bz} \cos(\omega t + \varphi_{vz})$.

Multiplicando (5.58), (5.59) e (5.60) por um sinal, ibsinc_x , de amplitude unitária e de mesma frequência e fase da correspondente corrente injetada obtém-se:

$$\frac{V_a I_{ba}}{2} \cos(\varphi_{va} - \varphi_{ia}) \text{ibsinc}_a = \frac{V_a I_{ba}}{2} \cos(\varphi_{va} - \varphi_{ia}) \cos(\omega t + \varphi_{ia}) = \frac{V_a I_{ba}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{va}) + \frac{V_a I_{ba}}{4} \cos(-\omega t + \varphi_{va} - 2\varphi_{ia}) \quad (5.64)$$

$$\frac{V_b I_{bb}}{2} \cos(\varphi_{vb} - \varphi_{ib}) \text{ibsinc}_b = \frac{V_b I_{bb}}{2} \cos(\varphi_{vb} - \varphi_{ib}) \cos(\omega t + \varphi_{ib}) = \frac{V_b I_{bb}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{vb}) + \frac{V_b I_{bb}}{4} \cos(-\omega t + \varphi_{vb} - 2\varphi_{ib}) \quad (5.65)$$

$$\frac{V_c I_{bc}}{2} \cos(\varphi_{vc} - \varphi_{ic}) \text{ibsinc}_c = \frac{V_c I_{bc}}{2} \cos(\varphi_{vc} - \varphi_{ic}) \cos(\omega t + \varphi_{ic}) = \frac{V_c I_{bc}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{vc}) + \frac{V_c I_{bc}}{4} \cos(-\omega t + \varphi_{vc} - 2\varphi_{ic}) \quad (5.66)$$

Dividindo cada equação por $I_{bx}/4$ obtém-se:

$$vb'_a = V_a \cos(\omega t + \varphi_{va}) + V_a \cos(-\omega t + \varphi_{va} - 2\varphi_{ia}) \quad (5.67)$$

$$vb'_b = V_b \cos(\omega t + \varphi_{vb}) + V_b \cos(-\omega t + \varphi_{vb} - 2\varphi_{ib}) \quad (5.68)$$

$$vb'_c = V_c \cos(\omega t + \varphi_{vc}) + V_c \cos(-\omega t + \varphi_{vc} - 2\varphi_{ic}) \quad (5.69)$$

Fazendo a média aritmética de (5.67), (5.68) e (5.69) nota-se que, para o primeiro termo das equações, a média é igual a zero²³. Pode-se verificar que a média do segundo termo somente é diferente de zero quando há desbalanceamento, seja na tensão da rede, seja na corrente injetada. Este sinal, produzido pela média aritmética de (5.67), (5.68) e (5.69), que não é nulo apenas na presença de desbalanceamentos, é representado por (5.70).

$$vb'_z = \frac{vb'_a + vb'_b + vb'_c}{3} = Vb'_z \cos(\omega t + \varphi'_{vz}) \quad (5.70)$$

Se utilizado como referência de sequência zero em uma malha fechada, que busca compensar o desbalanço nas tensões CC dos braços provocado por Pc_x , vb'_z , tenderá a vb_z^* uma vez que esta será a única solução que satisfaz as igualdades apresentadas em (5.71), (5.72) e (5.73):

$$\frac{Vb'_z lb_a}{2} \cos(\varphi'_{vz} - \varphi_{ia}) = -\frac{V_a lb_a}{2} \cos(\varphi_{va} - \varphi_{ia}) = \frac{Vb_z^* lb_a}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ia}) \quad (5.71)$$

$$\frac{Vb'_z lb_b}{2} \cos(\varphi'_{vz} - \varphi_{ib}) = -\frac{V_b lb_b}{2} \cos(\varphi_{vb} - \varphi_{ib}) = \frac{Vb_z^* lb_b}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ib}) \quad (5.72)$$

$$\frac{Vb'_z lb_c}{2} \cos(\varphi'_{vz} - \varphi_{ic}) = -\frac{V_c lb_c}{2} \cos(\varphi_{vc} - \varphi_{ic}) = \frac{Vb_z^* lb_c}{2} \cos(\varphi_{vz}^* - \varphi_{ic}) \quad (5.73)$$

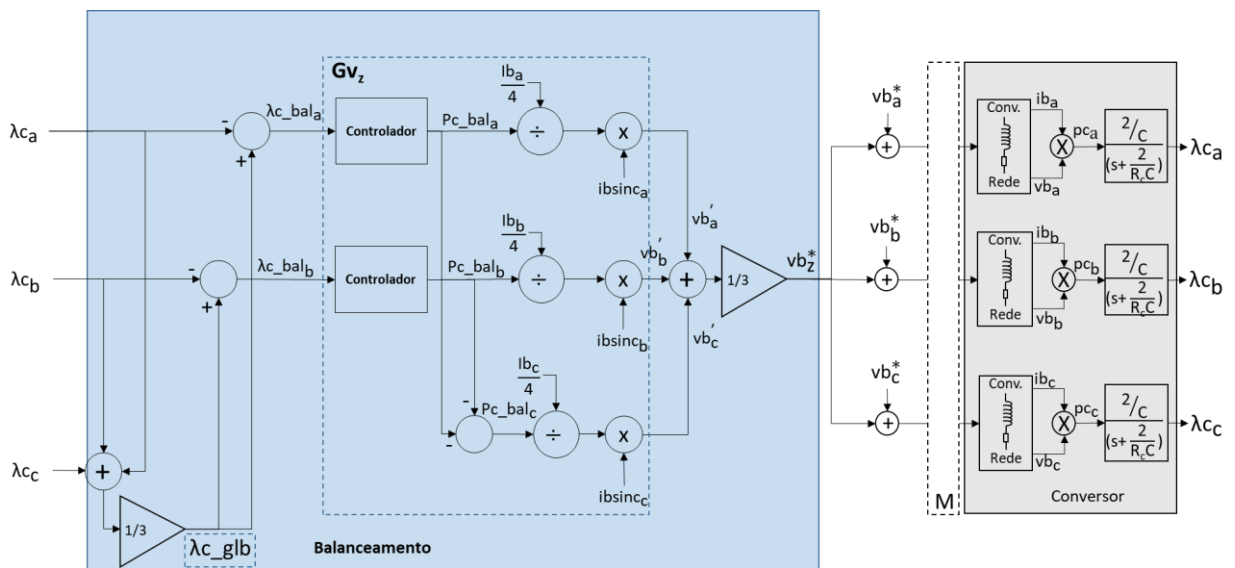
O raciocínio acima, mostra que, tendo Pc_{bal_x} , pode-se obter a referência para a tensão de sequência zero, vb_z^* , a ser imposta nos braços do conversor. Conhecendo a relação entre λc_{bal_x} e Pc_{bal_x} , evidenciada em (5.57), e sabendo que $\lambda c_{bal_x} = \lambda c_x - \lambda c_{glb}$, como mostra (5.40), é possível projetar uma malha de controle que, partindo de λc_x , determina Pc_{bal_x} e, dela, deriva a referência de sequência zero buscada.

A Figura 5.8 apresenta a organização da Malha de Balanceamento das tensões CC dos braços. Os retângulos pontilhados identificam os componentes do bloco Gv_z e o sinal λc_{glb} , que equivale a $F_{médio}$, na Figura 4.8 do capítulo anterior. Como a

²³ O sistema é a 3 fios, as tensões da rede não contêm sequência zero, portanto a soma das tensões é nula.

arquitetura prevê, apenas dois braços, 'a' e 'b' são monitorados. Os sinais obtidos nas saídas dos controladores, $P_{c_bal_a}$ e $P_{c_bal_b}$, são proporcionais ao delta de potência a ser compensado em cada um dos respectivos braços. Com base neles, a malha calcula o delta de potência no braço c, $P_{c_bal_c} = -P_{c_bal_a} - P_{c_bal_b}$, garantindo que a soma dos três sinais seja nula. Com $P_{c_bal_a}$, $P_{c_bal_b}$ e $P_{c_bal_c}$, seguindo o raciocínio descrito acima, a malha produz o sinal de tensão de sequência zero necessário.

Figura 5.8 - Controle da Tensão CC – Balanceamento das Tensões CC nos Braços – Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

Na configuração Δ (SDBC) um raciocínio similar (dual) pode ser aplicado.

Sendo $V_x \cos(\omega t + \varphi_{v_x})$, as tensões de linha da rede e $I_{b_x} \cos(\omega t + \varphi_{i_x})$ as correntes de fase nos braços do conversor, desconsideradas perdas, a potência média, P_{c_x} , produzida em cada braço é dada pelas equações (5.74), (5.75) e (5.76).

$$P_{c_{ab}} = \langle V_{ab} \cos(\omega t + \varphi_{v_{ab}}) I_{b_{ab}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ab}}) \rangle = \frac{V_{ab} I_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) \quad (5.74)$$

$$P_{c_{bc}} = \langle V_{bc} \cos(\omega t + \varphi_{v_{bc}}) I_{b_{bc}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{bc}}) \rangle = \frac{V_{bc} I_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) \quad (5.75)$$

$$P_{c_{ca}} = \langle V_{ca} \cos(\omega t + \varphi_{v_{ca}}) I_{b_{ca}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ca}}) \rangle = \frac{V_{ca} I_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) \quad (5.76)$$

Partindo da premissa que existe uma tensão de sequência zero, $i_{b_z}^* = I_{b_z} \cos(\omega t + \varphi_{i_z})$, que produz valores médios de potência, $P_{c_bal_x}$, que compensam P_{c_x} produzida por tais desbalanços, pode-se afirmar que:

$$-P_{C_{ab}} = P_{C_bal_{ab}} = \langle I_{b_z}^* \cos(\omega t + \varphi_{i_z}^*) V_{ab} \cos(\omega t + \varphi_{v_{ab}}) \rangle = \frac{I_{b_z}^* V_{ab}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{ab}}) \quad (5.77)$$

$$-P_{C_{bc}} = P_{C_bal_{bc}} = \langle I_{b_z}^* \cos(\omega t + \varphi_{i_z}^*) V_{bc} \cos(\omega t + \varphi_{v_{bc}}) \rangle = \frac{I_{b_z}^* V_{bc}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{bc}}) \quad (5.78)$$

$$-P_{C_{ca}} = P_{C_bal_{ca}} = \langle I_{b_z}^* \cos(\omega t + \varphi_{i_z}^*) V_{ca} \cos(\omega t + \varphi_{v_{ca}}) \rangle = \frac{I_{b_z}^* V_{ca}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{ca}}) \quad (5.79)$$

A seguir propõe um método instantâneo para determinação de $ib_z^* = I_{b_z} \cos(\omega t + \varphi_{i_z})$.

Multiplicando (5.74), (5.75) e (5.76) por um sinal, v_{pll_x} , de amplitude unitária de mesma frequência e fase da tensão de linha da rede chega-se a (5.80), (5.81) e (5.82).

$$v_{pll_{ab}} \frac{V_{ab} I_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) = \cos(\omega t + \varphi_{v_{ab}}) \frac{V_{ab} I_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) = \frac{V_{ab} I_{b_{ab}}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ab}}) + \frac{V_{ab} I_{b_{ab}}}{4} \cos(\omega t + 2\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) \quad (5.80)$$

$$v_{pll_{bc}} \frac{V_{bc} I_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) = \cos(\omega t + \varphi_{v_{bc}}) \frac{V_{bc} I_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) = \frac{V_{bc} I_{b_{bc}}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{i_{bc}}) + \frac{V_{bc} I_{b_{bc}}}{4} \cos(\omega t + 2\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) \quad (5.81)$$

$$v_{pll_{ca}} \frac{V_{ca} I_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) = \cos(\omega t + \varphi_{v_{ca}}) \frac{V_{ca} I_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) = \frac{V_{ca} I_{b_{ca}}}{4} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ca}}) + \frac{V_{ca} I_{b_{ca}}}{4} \cos(\omega t + 2\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) \quad (5.82)$$

Dividindo cada equação por $V_{b_x}/4$ obtém-se:

$$ib'_{ab} = I_{b_{ab}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ab}}) + I_{b_{ab}} \cos(-\omega t + 2\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) \quad (5.83)$$

$$ib'_{bc} = I_{b_{bc}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{bc}}) + I_{b_{bc}} \cos(-\omega t + 2\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) \quad (5.84)$$

$$ib'_{ca} = I_{b_{ca}} \cos(\omega t + \varphi_{i_{ca}}) + I_{b_{ca}} \cos(-\omega t + 2\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) \quad (5.85)$$

Fazendo a média aritmética de (5.83), (5.84) e (5.85) nota-se que, para o primeiro termo das equações, a média é igual a zero. Pode-se verificar também que, a média do segundo termo somente é diferente de zero quando há desbalanceamento, seja na tensão da rede, seja na corrente injetada. Este sinal, produzido pela média aritmética de (5.83), (5.84) e (5.85), que não é nulo apenas na presença de desbalanceamentos, é dado por (5.86).

$$ib'_z = \frac{ib'_{ab} + ib'_{bc} + ib'_{ca}}{3} = I_{b_z} \cos(\omega t + \varphi'_{i_z}) \quad (5.86)$$

Se utilizado como referência de sequência zero em uma malha fechada que busca compensar o desbalanço nas tensões CC dos braços provocado por P_{C_x} , ib'_z tenderá a ib_z^* uma vez que esta é a única solução que satisfaz as igualdades apresentadas em (5.87), (5.88) e (5.89):

$$\frac{I_{b_z}' V_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}' - \varphi_{v_{ab}}) = -\frac{V_{b_{ab}} I_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ab}} - \varphi_{i_{ab}}) = \frac{I_{b_z}^* V_{b_{ab}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{ab}}) \quad (5.87)$$

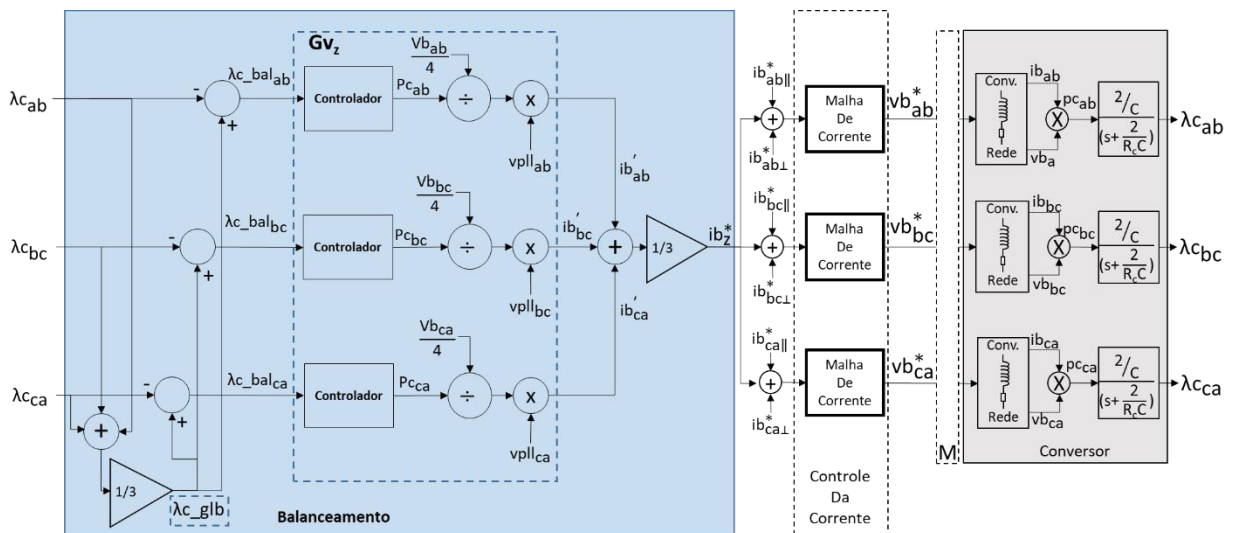
$$\frac{I_{b_z}' V_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}' - \varphi_{v_{bc}}) = -\frac{V_{b_{bc}} I_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{v_{bc}} - \varphi_{i_{bc}}) = \frac{I_{b_z}^* V_{b_{bc}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{bc}}) \quad (5.88)$$

$$\frac{I_{b_z}' V_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}' - \varphi_{v_{ca}}) = -\frac{V_{b_{ca}} I_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{v_{ca}} - \varphi_{i_{ca}}) = \frac{I_{b_z}^* V_{b_{ca}}}{2} \cos(\varphi_{i_z}^* - \varphi_{v_{ca}}) \quad (5.89)$$

Novamente, tendo $P_{c_bal_x}$, pode-se obter a referência para a corrente de sequência zero, $i_{b_z}^*$, a ser injetada pelos braços do conversor. Conhecendo a relação entre $\lambda_{c_bal_x}$ e $P_{c_bal_x}$ (5.57) e sabendo que $\lambda_{c_bal_x} = \lambda_{c_x} - \lambda_{c_glb}$ (5.40) projeta-se a malha de controle que, partindo de λ_{c_x} , produz $P_{c_bal_x}$ e dele a referência de sequência zero buscada.

A Figura 5.9 apresenta a organização da malha de Balanceamento para a configuração Δ (SDBC) que segue o mesmo racional já explicado na configuração Y(SSBC). Os retângulos pontilhados identificam os componentes do bloco de controlador G_{v_z} e o sinal λ_{c_glb} que equivale a $F_{m\u00e9dio}$ na Figura 4.9 do cap\u00edtulo anterior.

Figura 5.9 - Controle da Tens\u00e3o CC – Balanceamento das Tens\u00f5es CC nos Bra\u00e7os – Δ (SDBC)



Fonte: Pr\u00f3prio autor

5.3. Equalização Individual

Seguindo um raciocínio similar ao aplicado no item anterior, realiza-se neste item a modelagem para a Equalização Individual das tensões CC dos submódulos que compõem um braço do conversor. Como já observado no Capítulo 4, item 4.4, o modelo estabelecido é o mesmo para as duas topologias de conexão à rede, Y(SSBC) e Δ (SDBC).

Do circuito equivalente para um submódulo apresentado na Figura 5.5(a), observa-se que a equação das correntes em seu lado CC é dada por (5.90).

$$ism_{xi} = ic_{xi} + ir_{xi} = m_{xi} ib_x \quad (5.90)$$

Colocando as correntes do lado CC em função da tensão no capacitor, obtém-se:

$$C \frac{dvc_{xi}}{dt} + \frac{vc_{xi}}{R_c} = m_{xi} ib_x \quad (5.91)$$

Sabendo que $m_{xi} = \frac{vb_{xi}}{vc_{xi}}$ (vide Tabela 5.1):

$$C \frac{dvc_{xi}}{dt} + \frac{vc_{xi}}{R_c} = \frac{vb_{xi}}{vc_{xi}} ib_x \quad (5.92)$$

Multiplicando ambos os lados de (5.92) por vc_{xi} chega-se a:

$$C vc_{xi} \frac{dvc_{xi}}{dt} + \frac{vc_{xi}^2}{R_c} = vb_{xi} ib_x \quad (5.93)$$

Mas, $vc_{xi} \frac{dvc_{xi}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dvc_{xi}^2}{dt}$, então:

$$\frac{C}{2} \frac{dvc_{xi}^2}{dt} + \frac{vc_{xi}^2}{R_c} = vb_{xi} ib_x \quad (5.94)$$

Se $\lambda c_{xi} = vc_{xi}^2$ e $vb_{xi} ib_x = pc_{xi}$ tem-se:

$$\frac{C}{2} \frac{d\lambda c_{xi}}{dt} + \frac{\lambda c_{xi}}{R_c} = pc_{xi} \quad (5.95)$$

E, multiplicando ambos os lados de (5.95) por $2/C$, obtém-se:

$$\frac{d\lambda c_{xi}}{dt} + 2 \frac{\lambda c_{xi}}{R_c C} = \frac{2}{C} pc_{xi} \quad (5.96)$$

Do Capítulo 4, item 4.4, vê-se que λc_{xi} é a grandeza a ser efetivamente controlada, F_{ex} , e a função F_E , que a produz a partir da tensão no capacitor de cada submódulo do braço x, é $F_E = vc_{xi}^2$.

Como observado para um braço completo no item 5.2.1, para um único submódulo λc_{xi} e $p c_{xi}$ também são compostas de uma parcela média, comum a todos os submódulos de um mesmo braço e uma parcela de ajuste individual como indicado nas equações abaixo.

$$\lambda c_{xi} = \lambda c_{\text{médio}_x} + \lambda c_{aj_{xi}} \quad (5.97)$$

$$p c_{xi} = p c_{\text{média}_x} + p c_{aj_{xi}} \quad (5.98)$$

Em relação aos termos de (5.97) observa-se, também, que:

$$\lambda c_{\text{médio}_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda c_{xi} \quad (5.99)$$

$$\lambda c_{aj_{xi}} = \lambda c_{xi} - \lambda c_{\text{médio}_x} \quad (5.100)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda c_{aj_{xi}} = 0 \quad (5.101)$$

Pode-se, então, reescrever (5.96) fazendo uso de (5.97) e (5.98).

$$\frac{d(\lambda c_{\text{médio}_x} + \lambda c_{aj_{xi}})}{dt} + 2 \frac{(\lambda c_{\text{médio}_x} + \lambda c_{aj_{xi}})}{R_c C} = \frac{2}{C} (p c_{\text{média}_x} + p c_{aj_{xi}}) \quad (5.102)$$

Considerando que $\lambda c_{\text{médio}_x}$ e $p c_{\text{média}_x}$ são controlados pela ação da Malha de Regulação da Média Global das tensões CC dos braços e que a somatória das parcelas de ajuste individuais é nula, como observado no item 4.4 do capítulo anterior e indicado em (5.101), pode-se aplicar o princípio da superposição em (5.102) e, para a modelagem da Equalização Individual, considerar apenas os termos relativos aos ajustes individuais como mostra (5.103).

$$\frac{d\lambda c_{aj_{xi}}}{dt} + 2 \frac{\lambda c_{aj_{xi}}}{R_c C} = \frac{2}{C} p c_{aj_{xi}} \quad (5.103)$$

Fazendo a transformada de Laplace de (5.103), com condições iniciais nulas, obtém-se (5.104).

$$s\lambda c_{aj_{xi}}(s) + 2 \frac{\lambda c_{aj_{xi}}(s)}{R_c C} = \frac{2}{C} p c_{aj_{xi}}(s) \quad (5.104)$$

Ou,

$$\frac{\lambda c_{aj_{xi}}(s)}{p c_{aj_{xi}}(s)} = \frac{2/C}{\left(s + \frac{2}{R_c C}\right)} \quad (5.105)$$

No processo de equalização individual o uso da corrente para o controle indireto de $p c_{aj_{xi}}$ não é viável uma vez que a corrente é comum a todos os submódulos do braço.

A alternativa é atuar na tensão produzida em cada submódulo, vb_{xi} , adicionando a ela uma componente de ajuste em fase com a corrente no braço como mostra (5.106).

$$vb_{xi} = vbm_x + vaj_{xi} \quad (5.106)$$

A componente vbm_x , praticamente em fase com a tensão da rede, é uma N-ésima parte da tensão de braço imposta pela ação combinada das malhas de Controle da Corrente e de Controle da Tensão CC (Regulação da Média Global e Balanceamento) como mostra (5.107)²⁴.

$$vbm_x = \frac{1}{N} (vb_x^* + vb_z^*) \quad (5.107)$$

Já vaj_{xi} , em fase com a corrente no braço, é a componente a ser imposta pelas malhas de Equalização Individual e deve respeitar as condições estabelecidas em (5.108) e (5.109).

$$vaj_{xi} = vb_{xi} - vbm_x \quad (5.108)$$

$$\sum_{i=1}^N vaj_{xi} = 0 \quad (5.109)$$

Sendo a potência instantânea em um i-ésimo submódulo do braço x do conversor dada por:

$$pc_{xi} = vb_{xi} ib_x \quad (5.110)$$

Substituindo (5.106) em (5.110) chega-se a (5.111).

$$pc_{xi} = vbm_x ib_x + vaj_{xi} ib_x \quad (5.111)$$

Sendo o valor médio da potência instantânea, pc_{xi} , dado por (5.112).

$$Pc_{xi} = Pc_média_x + Pc_{aj_{xi}} \quad (5.112)$$

De (5.111) e (5.112) vê-se que:

$$Pc_média_x = \langle vbm_x ib_x \rangle \quad (5.113)$$

E que:

$$Pc_{aj_{xi}} = \langle vaj_{xi} ib_x \rangle = \frac{Vaj_{xi} Ib_x}{2} \quad (5.114)$$

Onde Vaj_{xi} e Ib_x são as amplitudes (pico) de vaj_{xi} e ib_x respectivamente.

²⁴ Importante notar que a componente de sequência zero, vb_z^* , incluída em (5.107), aplica-se apenas à configuração Y(SSBC). Vide Capítulo 4.

A parcela $P_{c_m\u00e9dia_x}$ é controlada pela Malha de Regulação da Média Global das tensões CC nos braços e não é de interesse para as malhas de Equalização Individual. O que se busca é o controle de $P_{caj_{xi}}$.

De (5.114), vê-se que a amplitude de $v_{aj_{xi}}$, $V_{aj_{xi}}$, pode ser extraída de $P_{caj_{xi}}$ se l_{bx} estiver disponível como indica (5.115).

$$\frac{P_{c_{xi}}}{\frac{l_{bx}}{2}} = \frac{\frac{V_{aj_{xi}} \cdot l_{bx}}{2}}{\frac{l_{bx}}{2}} = \frac{V_{aj_{xi}} \cdot l_{bx}}{l_{bx}} = V_{aj_{xi}} \quad (5.115)$$

A componente de ajuste a ser imposta, $v_{aj_{xi}}$, é produzida modulando um sinal unitário, ib_{sinc_x} , de mesma frequência e fase da corrente no braço com a amplitude obtida em (5.115).

$$v_{aj_{xi}} = V_{aj_{xi}} \cdot ib_{sinc_x} \quad (5.116)$$

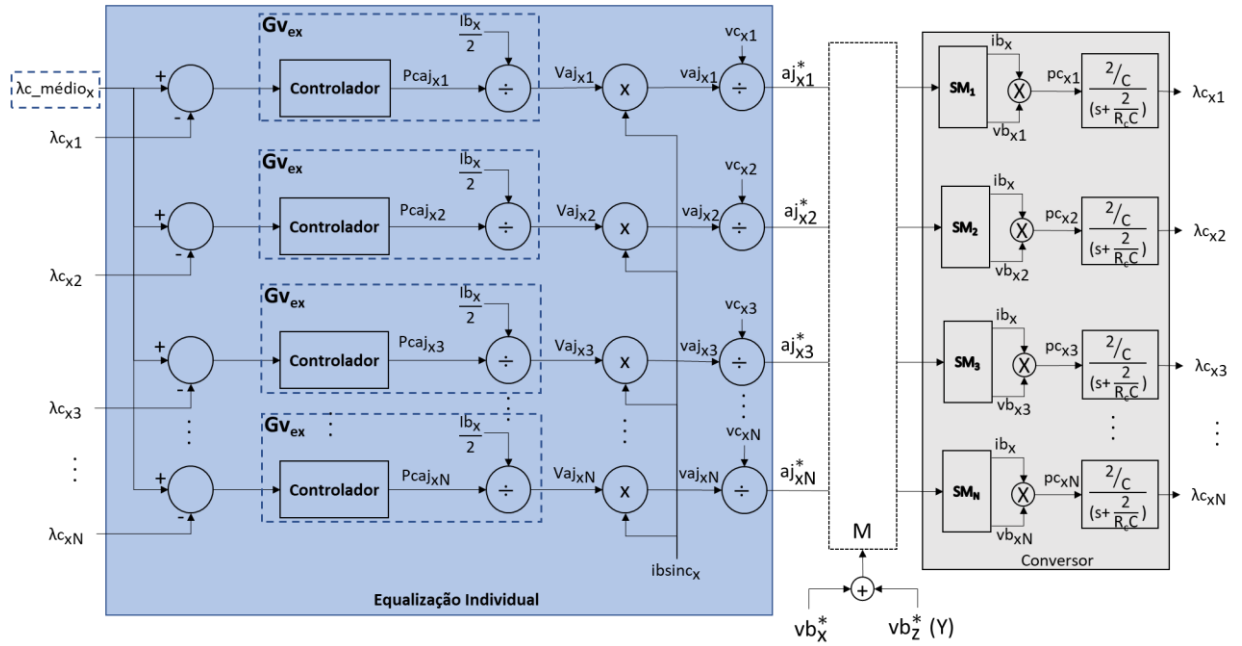
Importante notar que, de acordo com a arquitetura apresentada no item 4.4, o bloco de Equalização Individual entrega para o bloco de modulação, M, sinais de ajuste normalizados. Assim, as referências de ajuste individual, aj_{xi}^* , é obtido através da normalização de $v_{aj_{xi}}$ pelas tensões CC de cada submódulo, como indica (5.117).

$$aj_{xi}^* = \frac{v_{aj_{xi}}}{v_{c_{xi}}} \quad (5.117)$$

Portanto, conhecendo a relação entre $\lambda_{c_{xi}}$ e $p_{c_{xi}}$, estabelecida em (5.96), e sabendo que $\lambda_{caj_{xi}} = \lambda_{c_{xi}} - \lambda_{c_m\u00e9dio_x}$, como indicado em (5.100), compõe-se as malhas de controle que, partindo de $\lambda_{c_{xi}}$, produzem $P_{caj_{xi}}$ e, dele, os ajustes desejados para as tensões produzidas pelos submódulos.

A Figura 5.10 apresenta a organização das malhas de Equalização Individual para um braço do conversor conectado em Y(SSBC) ou Δ (SDBC). Os retângulos pontilhados identificam os componentes dos controladores $G_{v_{ex}}$ e o sinal $\lambda_{c_m\u00e9dio_x}$, que equivale a $F_{em\u00e9dio}$, na Figura 4.10 do capítulo anterior.

Figura 5. 10 – Equalização Individual – Malhas de Controle para Um Braço do Conversor



Fonte: Próprio autor

6. Projeto das Malhas de Controle

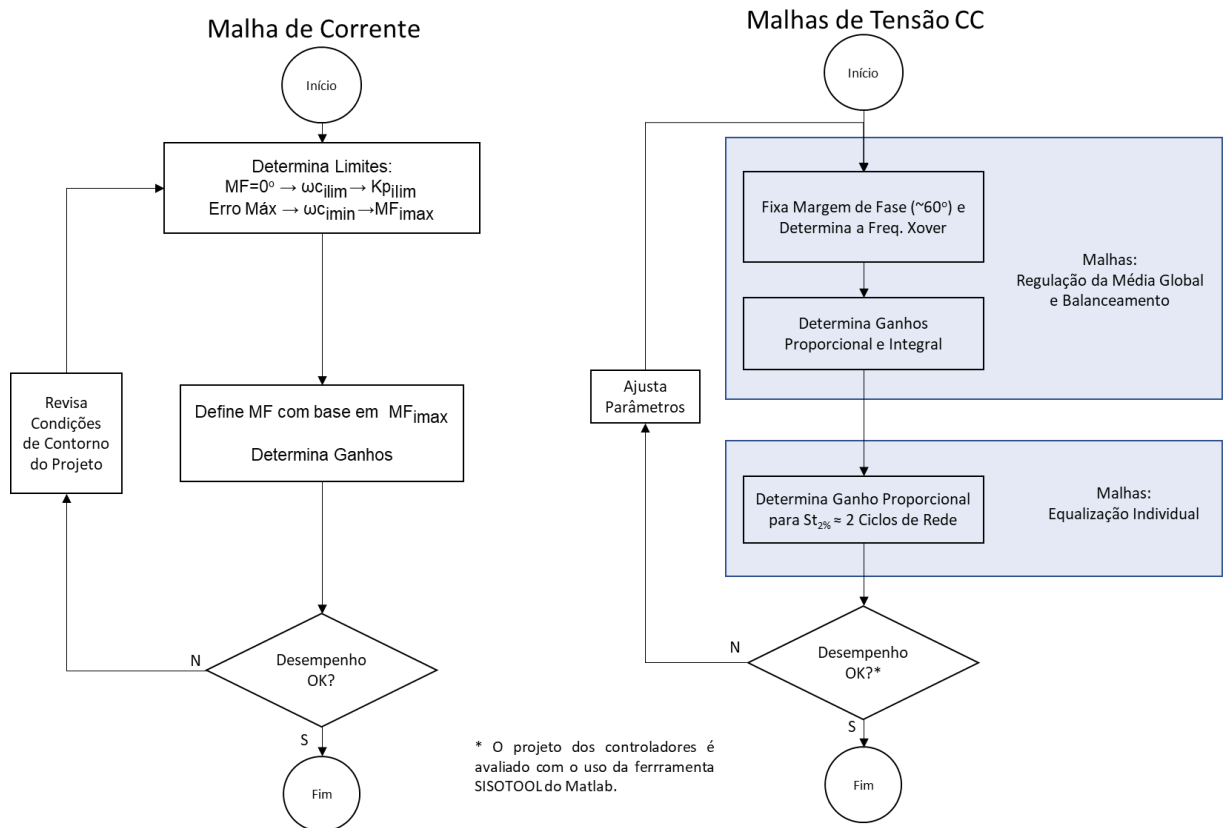
Neste capítulo realiza-se o projeto dos controladores das malhas do conversor. Os modelos apresentados no capítulo anterior são desenvolvidos no domínio de tempo contínuo ao passo que a implementação prática do conversor, baseada em circuitos digitais, realiza-se no domínio do tempo discreto e deve considerar os atrasos devidos à amostragem de sinais (*Zero Order Hold*) e ao cálculo (processamento dos sinais de entrada) presentes em sistemas de controle digitais.

Os projetos das malhas de Controle da Corrente injetada e das tensões CC dos braços (Regulação da Média Global e Balanceamento) tem inspiração no método estabelecido por [40]. O roteiro proposto parte da determinação da Frequência de *Crossover* da função de transferência de malha aberta²⁵ de cada bloco de controle com base em condições de contorno pré-definidas e, a partir dela, determina algebricamente os ganhos proporcional e integral dos controladores. As malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos são as mais simples do sistema de controle e o projeto resume-se no cálculo do ganho proporcional do controlador com base em um tempo de estabilização pré-determinado²⁶. O diagrama da Figura 6.1 descreve o método proposto.

²⁵ Para uma função de malha fechada da forma $\frac{G_a}{1+G_a}$, G_a é a **função de malha aberta**. A **frequência de crossover** de G_a é aquela em que $|G_a|=1$. **Margem de Fase** é a diferença que existe entre a fase que G_a apresenta na frequência de *crossover* e 180° , ou seja, indica o quão distante o sistema está da condição de instabilidade criada quando $G_a=1\angle 180^\circ$.

²⁶ As malhas de Equalização Individual dispensam o uso de filtros de 2ª Harmônica e o uso de controladores PI. Pelas condições em que operam (regulação CC, malhas relativamente lentas) também não têm o comportamento afetado pelo atraso de cálculo. Todos esses aspectos resultam em malhas simples, com funções de transferência de primeira ordem tornando o projeto do controlador igualmente simples.

Figura 6. 1 – Etapas do Projeto dos Controladores das Malhas de Controle



Fonte: Próprio autor

O projeto da Malha de Corrente, utiliza controladores PI e é abordado no item 6.1. Parte do estabelecimento de uma faixa aceitável para a operação do sistema cujos extremos são determinados:

- Pelo Ganho Proporcional Máximo que impõe um limite para a estabilidade do sistema.
- Por um erro de rastreamento em regime (amplitude e fase) considerado aceitável para uma determinada amplitude de corrente injetada, ambos estabelecidos como parâmetros do projeto.

A mínima Frequência de *Crossover* da função de transferência de malha aberta é determinada com base no erro de rastreamento estipulado. A partir dela, fazendo uso das fórmulas estabelecidas por [40], calculam-se a Margem de Fase da malha de controle e os ganhos Proporcional e Integral do controlador.

Procura-se manter a Margem de Fase superior a 50° . O desempenho do sistema com o ajuste calculado é avaliado fazendo da ferramenta SISOTOOL do Matlab e, se necessário, os parâmetros e condições de contorno do projeto são revisados.

O projeto das malhas de controle das tensões CC nos braços (Regulação da Média Global e Balanceamento), realizado no item 6.2, começa pela fixação da Margem de Fase do sistema em um nível que garanta boa estabilidade ($MF \approx 60^\circ$). A partir da Margem de Fase calcula-se a Frequência de *Crossover* e, com ela, os ganhos Proporcional e Integral dos controladores, fazendo uso de fórmulas definidas a partir do racional estabelecido por [40].

O item 6.3 trata do projeto das malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos. Como já comentado, o projeto é feito no tempo contínuo, sem considerar atrasos de cálculo o que resulta em um sistema simples, de primeira ordem. O controlador P, tem seu ganho calculado com base em um Tempo de Estabilização pré-estabelecido.

A Tabela 6.1 apresenta as especificações de operação do conversor que levam em conta características da plataforma modular para experimentos com conversores multinível desenvolvida pelo Laboratório de Eletrônica de Potência do PEA-EPUSP [41] onde pretende-se futuramente realizar a implementação prática e avaliação do desempenho das arquiteturas propostas.

Tabela 6. 1 - Conversor SSBC/SDBC – Valores Nominais

Parâmetro	Valor
Tensão de Fase da Rede – V_x	179,6V (pico)
Frequência da Rede – f_{rede}	60Hz
Número de Submódulos por Braço – N	4
Número de Níveis – n	9
Tensão CC dos Submódulos – V_c	85V (Y); 147V(Δ)
PWM – Métodos para Geração das Portadoras/Atualização da Moduladora	<i>Phase Shift / All-Cells Update</i> ²⁷
PWM – Frequência da Portadora Triangular – f_{tri}	2kHz
Frequência/Intervalo de Amostragem – f_s/T_s (modelos discretos)	16kHz/62,5 μ s
Capacitância Circuito CC do Submódulo – C	3.300uF(Y)/1.000uF(Δ)
Resistência Circuito CC do Submódulo - R_c	6.200 Ω
Indutância de Acoplamento – L	10mH(Y)/30mH(Δ)
Resistência do Indutor de Acoplamento – R	1 Ω (Y)/3 Ω (Δ)
Corrente de Linha Nominal Máxima	12.1A (pico)

Aspectos do projeto como o cálculo das Tensões CC de operação e dos valores dos capacitores dos submódulos são detalhados nos apêndices D e E.

6.1. Projeto da Malha de Controle da Corrente Injetada

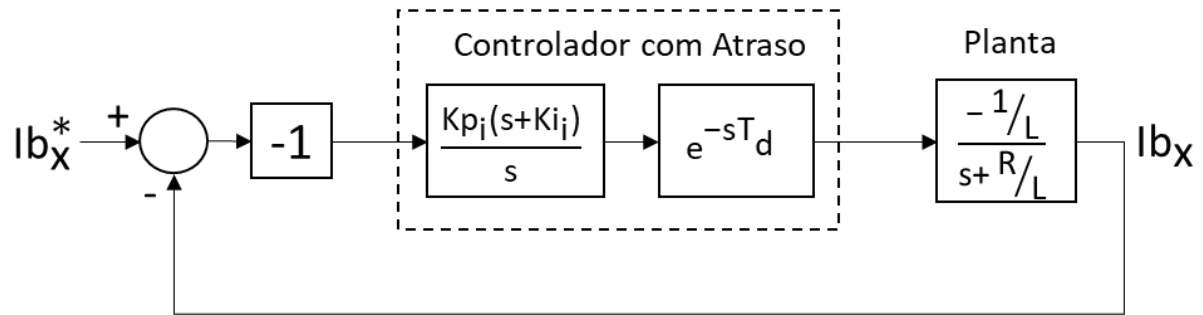
6.1.1. Determinação das Relações entre Margem de Fase, Frequência de Crossover e Ganhos do Controlador

A Figura 6.2 apresenta o diagrama simplificado da malha de Controle da Corrente injetada para um braço do conversor utilizando um controlador PI²⁸ e considerando o atraso de cálculo.

²⁷ Vide item 6.1.1

²⁸ Importante notar que o trabalho não tem como objetivo escolher o melhor controlador, mas sim apresentar a arquitetura de controle e a modelagem proposta. Dessa forma, optou-se por um controlador de implementação mais simples e que ainda apresenta um desempenho aceitável.

Figura 6. 2 – Malha de controle da Corrente Injetada – Diagrama simplificado com atraso de cálculo



Fonte: Próprio autor

No diagrama, considere:

Tabela 6. 2 – Parâmetros da Malha de Controle da Corrente Injetada com Atraso de Cálculo

Kp_i	Ganho Proporcional do Controlador
Ki_i	Ganho Integral do Controlador (inverso da constante de tempo do controlador)
T_d	Tempo total de atraso, $T_d = T_{ZOH} + T_{upd}$. T_{ZOH} :é o tempo de aquisição do dado de entrada. Equivale a 0,5 intervalo de amostragem, T_s . T_{upd} :é o tempo de atualização dos dados de saída. Equivale a um intervalo de amostragem T_s . Logo, $T_d = 1,5T_s$

Com referência ao tempo total de atraso, T_d , é importante mencionar que o sistema de controle proposto atualiza simultaneamente todos os sinais moduladores dos 3N submódulos que compõem os 3 braços do conversor nos pontos máximo e mínimo de todas as N portadoras PWM do sistema. Esta abordagem é denominada em [22] pelo termo “*All Cells Update*”. De acordo com o estudo realizado nessa referênica, a abordagem reduz o tempo total de atraso T_d resultando numa resposta mais rápida e estável do sistema quando comparada à abordagem “*One Cell Update*” em que o sinal modulador de cada submódulo é atualizado apenas nos pontos máximo e mínimo da sua respectiva portadora.

Do diagrama da Figura 6.2 extrai-se a função de malha aberta, $Ai(s)$, apresentada em (6.1)

$$Ai(s) = \frac{Kp_i (s+Ki_i)e^{-sT_d}}{L s(s+R/L)} \quad (6.1)$$

De (6.1) são extraídas as fórmulas para o módulo e fase de $A_i(s)$ indicadas em (6.2) e (6.3) respectivamente.

$$|A_i| = \frac{K_{p_i}}{\omega L} \frac{\sqrt{\omega^2 + K_{i_i}^2}}{\sqrt{\omega^2 + R^2/L^2}} \quad (6.2)$$

$$\angle A_i = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{K_{i_i}}\right) - \omega T_d - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{R/L}\right) \quad (6.3)$$

A margem de fase, MF_i , na Frequência de *Crossover*, ω_{c_i} , é dada por (6.4).

$$MF_i = \angle A_i + \pi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_i}}{K_{i_i}}\right) - \omega_{c_i} T_d + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_i}}{R/L}\right) \quad (6.4)$$

O método estabelecido por [40] busca maximizar os ganhos proporcional e integral do controlador para uma Margem de Fase pré-definida. Para isso, o método parte da Margem de Fase e determina algebricamente um valor máximo para a Frequência de *Crossover* e os valores máximos para os ganhos Proporcional e Integral do controlador. A Tabela 6.3 apresenta as fórmulas propostas por [40] que são derivadas de (6.2) e (6.4) e são utilizadas no projeto dos controladores.

Tabela 6.3 – Valores máximos para a frequência de crossover e ganhos do controlador segundo [40]

Equação Base	Fórmula	Premissas
(6.4)	$\omega_{c_i} = \frac{\frac{\pi}{2} - MF_i}{T_d}$	$\omega_{c_i} \gg R/L \rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_i}}{R/L}\right) \sim \frac{\pi}{2}$ ω_{c_i} é máximo quando $\tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_i}}{K_{i_i}}\right) = \frac{\pi}{2}$
(6.2)	$K_{p_i} = \omega_{c_i} L$	$\omega_{c_i} \gg R/L$ $\omega_{c_i} \gg K_{i_i}$
	$K_{i_i} = \frac{\omega_{c_i}}{10}$	$\tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_i}}{K_{i_i}}\right) \approx \frac{\pi}{2}$ Para garantir a condição acima, [40] propõe a relação de 1/10 entre ω_{c_i} e K_{i_i} .

6.1.2. Determinação da Faixa Aceitável de Operação e Fixação da Frequência de *Crossover* da Malha

Seguindo o fluxo descrito na Figura 6.1, dois aspectos são importantes para estabelecer uma faixa de ajuste.

O primeiro diz respeito à relação entre o crescimento do Ganho Proporcional e a perda de estabilidade. Valores máximos para a Frequência de *Crossover* e Ganho Proporcional podem ser derivados das relações estabelecidas no ítem anterior.

A arquitetura proposta neste trabalho prevê amostragens nos máximos e mínimos das portadoras PWM dos N submódulos de cada braço (*double update*). Portanto, a frequência de amostragem, f_s , em função da frequência das portadoras PWM, f_{tri} , e do número de submódulos, N, é dada por (6.5).

$$f_s = 2Nf_{tri} \quad (6.5)$$

Ou ainda, por (6.6), em função do número de níveis, n, do sinal multinível produzido pelo conversor onde $n=2N+1$.

$$f_s = (n-1)f_{tri} \quad (6.6)$$

Considerando que a perda da estabilidade se dá para uma Margem de Fase igual a zero pode-se determinar um valor limítrofe para a Máxima Frequência de *Crossover*, $\omega_{c_{ilim}}$, utilizando a primeira relação apontada na Tabela 6.3.

$$\omega_{c_{ilim}} = \left(\frac{\frac{\pi}{2} - MF}{T_d} \right) = \frac{\frac{\pi}{2}}{T_d} \quad (6.7)$$

Fazendo uso da definição de T_d apresentada na Tabela 6.2 rescreve-se (6.7).

$$\omega_{c_{ilim}} = \frac{\frac{\pi}{2}}{1,5T_s} = \frac{\pi}{3} f_s \approx f_s \quad (6.8)$$

Substituindo (6.6) em (6.8) obtém-se $\omega_{c_{ilim}}$ em função de f_{tri} .

$$\omega_{c_{ilim}} = (n-1)f_{tri} \quad (6.9)$$

A partir de (6.9) e das relações da Tabela 6.3 extrai-se o valor do Ganho Proporcional Limítrofe, Kp_{ilim} ²⁹.

$$Kp_{ilim} = \omega_{c_{ilim}} L = (n-1)f_{tri} L \quad (6.10)$$

²⁹ Observa-se, também, que a Frequência de *Crossover* Limite da malha é de 1/6 da frequência de amostragem pois, como indica (6.5), $\omega_{c_{ilim}} = \frac{\pi}{3} f_s \Rightarrow 2\pi f_{c_{ilim}} = \frac{\pi}{3} f_s \Rightarrow f_{c_{ilim}} = \frac{f_s}{6}$. O Apêndice F, que apresenta um método alternativo para determinar o limite máximo para o ganho proporcional, mostra em sua Figura F.5 o fenômeno da perda de controle com o crescimento do ganho proporcional. Nela, vê-se o aparecimento de uma componente na frequência de crossover na medida que o ganho proporcional se aproxima do seu limite máximo.

Considerando os valores atribuídos para f_{tri} , L e n na Tabela 6.1, o valor de $K_{p_{ilim}}$ é calculado e apresentado em (6.11) e (6.12) para as configurações $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$.

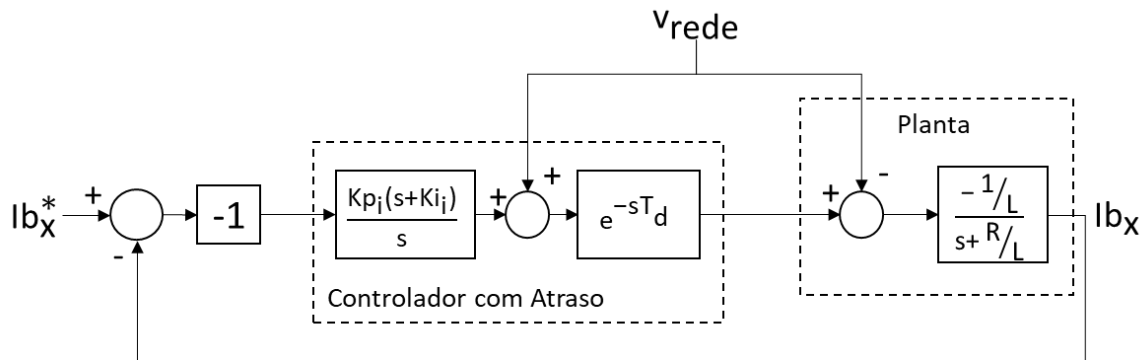
$$K_{p_{ilim}} = (9-1) \cdot 2000 \cdot 0,01 = 160 \text{ } Y(SSBC) \quad (6.11)$$

$$K_{p_{ilim}} = (9-1) \cdot 2000 \cdot 0,03 = 480 \text{ } \Delta(SDBC) \quad (6.12)$$

O segundo aspecto a ser considerado para determinação da faixa de ajuste é devido ao erro de rastreamento não nulo presente em malhas utilizando controladores PI para frequências diferentes de zero ($\omega \neq 0$).

No diagrama da Figura 6.3, além do atraso de cálculo, considera-se o distúrbio causado pela tensão da rede.

Figura 6.3 – Malha de Controle da Corrente Considerando o Atraso de Cálculo e Distúrbio da Rede



Fonte: Próprio autor

A partir do diagrama obtém-se a equação (6.13) onde são identificadas as funções de transferência de malha fechada da referência (parcela que multiplica $Ib_x^*(s)$) e do distúrbio da tensão da rede (parcela que multiplica $V_{rede}(s)$) considerando o atraso de cálculo.

$$Ib_x(s) = Ib_x^*(s) \frac{K_{p_i/L}(s+K_{i_i})e^{-sT_d}}{s^2 + s(R/L + K_{p_i/L}e^{-sT_d}) + K_{p_i}K_{i_i}/L e^{-sT_d}} + V_{rede}(s) \frac{1/L(e^{-sT_d}-1)}{s^2 + s(R/L + K_{p_i/L}e^{-sT_d}) + K_{p_i}K_{i_i}/L e^{-sT_d}} \quad (6.13)$$

Através de (6.13) e das relações da Tabela 6.3, pode-se calcular o erro de rastreamento (magnitude e fase) imposto à corrente injetada em função da Frequência de *Crossover* da malha. O Apêndice G desenvolve as equações e determina a mínima Frequência de *Crossover* da Malha de Corrente que garante erros menores que o máximo permitido para uma amplitude de corrente arbitrada. A Tabela 6.4 apresenta, para as configurações $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$, os valores da Frequência de *Crossover*

Mínima, $\omega_{C_{imin}}$, e da Margem de Fase Máxima, MF_{imax} , obtida considerando um erro máximo de $+5\%$ (magnitude) e $\pm 5^\circ$ (fase) para um nível de corrente definido como parâmetro de projeto³⁰.

Tabela 6. 4 – Frequência de *Crossover* Mínima / Margem de Fase Máxima Para Erro Máximo de Rastreamento (Vide Apêndice G)

Parâmetro	Y	Δ
$\omega_{C_{imin}}$ – Frequência Crossover Mínima	5456rd/s	5456rd/s
MF_{imax} – Margem de Fase Máxima	60,7°	60,7°
Amplitude da Corrente Injetada (Apico)	1,73A	1A

Como se espera, os valores obtidos de para a Frequência de *Crossover* e Margem de Fase são iguais uma vez que as configurações, Y(SSBC) e Δ (SDBC), são equivalentes³¹.

Observa-se também que a Margem de Fase obtida já é adequada. Não é baixa a ponto de comprometer a estabilidade do sistema, o que demandaria revisão das condições de contorno do projeto (erro máximo permitido, faixa de operação, característica do circuito de acoplamento) e, ao mesmo tempo não é alta, indicando um sistema excessivamente lento e amortecido, que exigiria uma elevação da Frequência de *Crossover* a ser utilizada no projeto.

Dessa forma, a Frequência de *Crossover*, ω_{C_i} , a ser utilizada no projeto dos controladores será igual à mínima determinada como indica (6.14).

$$\omega_{C_i} = \omega_{C_{imin}} \quad (6.14)$$

6.1.3. Determinação dos Ganhos e Verificação do Comportamento da Malha

Utilizando a Frequência de *Crossover* determinada no ítem anterior, e as relações da Tabela 6.3, os ganhos dos controladores são calculados e apresentados na Tabela 6.5 para as duas configurações.

³⁰ Como parâmetro de projeto foi definido que o módulo dos erros de rastreamento, amplitude e fase, não devem ser maiores que 5% e 5° respectivamente, dentro da faixa de operação que vai de 1,73A(pico) a 12,1A(pico) para a corrente de linha. O cálculo é realizado para os valores inferiores das faixas onde o erro relativo é maior.

³¹ Os circuitos de acoplamento foram dimensionados de modo que os modelos de Thevenin das configurações sejam equivalentes.

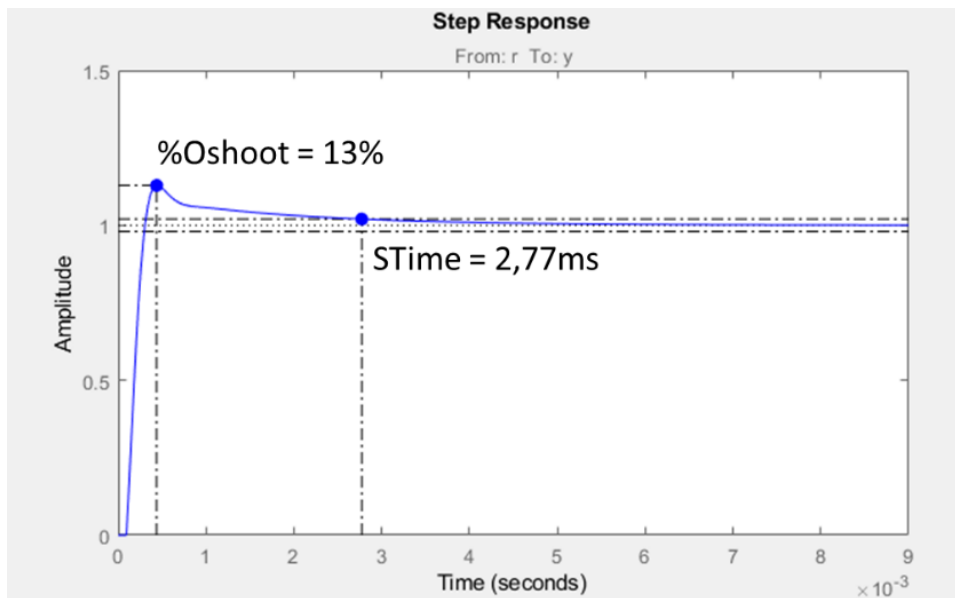
Tabela 6. 5 – Ganhos dos Controladores – Calculados a Partir da Frequência de Crossover Determinada

Ganho	Fórmula	Y(SSBC)	Δ (SDBC)
K_{p_i}	$K_{p_i} = \omega_{c_i} L$	55	164
K_{i_i}	$K_{i_i} = \frac{\omega_{c_i}}{10}$	546	546

A Figura 6.4 apresenta a resposta ao degrau das malhas, obtida com auxílio do *software* MATLAB, considerando os ajustes definidos acima.

Figura 6. 4 – Verificação do Comportamento da Malha de Controle da Corrente

Ajuste Conforme Tabela 6.3



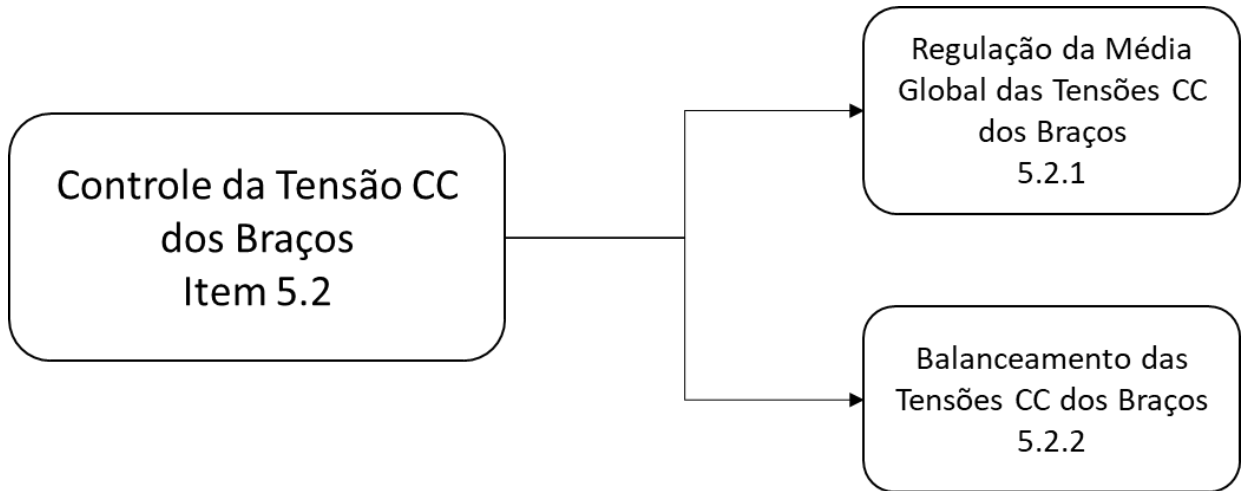
Fonte: Próprio autor

O comportamento criticamente amortecido com uma sobre-elevação relativamente baixa é bastante adequado. O tempo de estabilização é suficientemente menor que um ciclo de rede (1/6) e significativamente maior que o período de amostragem (45x). Definido o ajuste dos controladores da Malha de Corrente, o projeto das malhas de controle da Tensão CC dos braços do conversor é tratado a seguir.

6.2. Projeto das Malhas de Controle da Tensão CC dos Braços do Conversor

O Capítulo 5, em seu item 5.2, estabelece modelos para o conjunto de malhas que realizam o controle da Tensão CC dos braços do conversor como mostra a Figura 6.5.

Figura 6. 5 – Métodos de controle da Tensão CC dos braços do conversor



Fonte: Próprio autor

Recapitulando, a arquitetura divide o controle entre uma malha que realiza a Regulação da Média Global e outra que realiza o Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor.

O roteiro de projeto descrito neste item, também se baseia em [40], e parte de duas condições básicas.

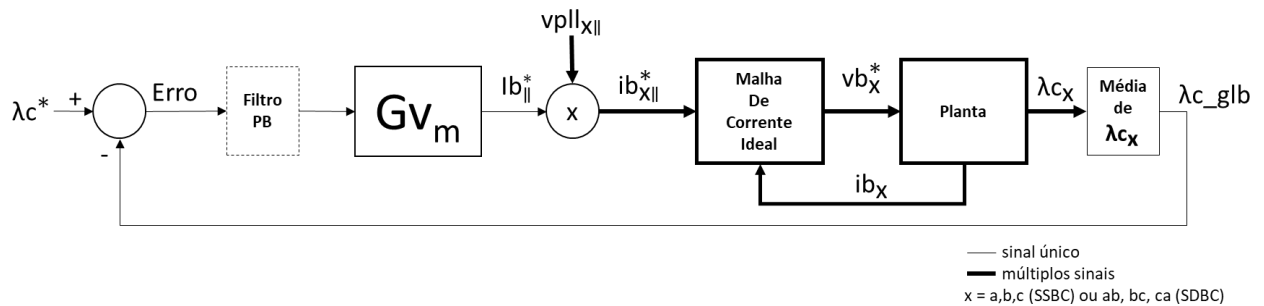
- As malhas incluem filtros para atenuação do *ripple* de 2ª Harmônica presente na Tensão CC. Embora, em condições equilibradas (operação apenas com sequência positiva) a filtragem possa ser dispensada, na operação com desbalanço (presença de sequência negativa na corrente injetada e/ou na tensão da rede) a filtragem é condição necessária para evitar aumento da distorção harmônica na corrente injetada e assegurar uso mais eficiente da faixa dinâmica de operação do conversor (vide item 6.2.1).
- As malhas envolvidas no balanceamento das tensões CC dos braços necessariamente fazem uso de controladores PI. Operando apenas com tensão de rede e correntes injetadas de sequência positiva é possível operar com controladores P desde que pequenos erros de regulação sejam aceitáveis. Contudo, havendo desbalanços na tensão da rede ou na corrente injetada, sem o uso de controladores PI, essas malhas não terão condições de atenuar de forma eficaz a perturbação gerada pela presença de sequência negativa no sistema e garantir o balanceamento (vide item 6.2.2).

A seguir, no item 6.2.1, explica-se o efeito da componente de 2ª Harmônica sobre o funcionamento das malhas de controle justificando o uso de Filtros Passa-Baixa (FPB). No item 6.2.2 realiza-se o projeto dos controladores.

6.2.1. Análise do Efeito do *Ripple* de 2ª Harmônica Presente na Tensão CC.

Analisando primeiramente a malha de Regulação da Média Global da tensão CC nos braços a Figura 6.6 apresenta, de forma mais simplificada, a organização já apresentada nas Figuras 5.6 e 5.7 do capítulo anterior.

Figura 6.6 – Malha de Regulação da Média Global da Tensão CC



Fonte: Próprio autor

No diagrama:

- λ_c^* é a referência e consiste em um valor fixo.
- λ_{c_glb} é a grandeza controlada. Consiste na média aritmética instantânea de λ_{c_x} .
- Filtro PB representa o filtro passa-baixa cuja necessidade de inclusão na malha é avaliada.
- G_{v_m} é a função de transferência do controlador. Nesta análise assume um valor constante (controlador P) mas pode também representar um sistema dinâmico no tempo (ex.: controladores PI).
- $I_{b_{||}}^*$ é o sinal de saída do controlador. Consiste na amplitude do sinal de referência de corrente produzido pela malha de controle.
- $v_{pll_{x||}}$ é um sinal trifásico de amplitude unitária, com a mesma fase e frequência (Harmônica Fundamental) das tensões nos braços do conversor. Na formulação a seguir assume a forma:

$$v_{p||x||} = 1 \cos(\omega t + \varphi_{vx}) \quad (6.15)$$

- ib_x^* é o sinal de referência de corrente ativa produzido pela malha. Resulta do produto de $I_{b||}^*$ por $v_{p||x||}$
- Consideram-se, ainda, a malha de corrente e o próprio conversor ideais.

Uma vez que em conversores Y(SSBC) ou Δ (SDBC) não há um barramento CC comum e a potência produzida em cada braço possui uma componente oscilante de 2ª Harmônica, a Tensão CC nos capacitores dos submódulos de um braço do conversor também apresenta um *ripple* de 2ª Harmônica e pode ser descrita pela equação (6.16)³².

$$V_{c_{xi}} = V_{c_x} + V_{rpl} \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \quad (6.16)$$

A arquitetura de controle estudada, trabalha com a soma dos quadrados das N tensões nos capacitores, λ_{c_x} , cuja forma é apresentada em (6.17).

$$\lambda_{c_x} = N v_{c_{xi}}^2 = N V_{c_x}^2 + 2N V_{c_x} V_{rpl} \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) + N \frac{V_{rpl}^2}{2} + N \frac{V_{rpl}^2}{2} \cos(4\omega t + 2\varphi_{rplx}) \quad (6.17)$$

Desconsiderando os termos mais à direita da equação cujas magnitudes dependem apenas do quadrado da amplitude do *ripple* e são relativamente pequenas, (6.17) pode ser simplificada.

$$\lambda_{c_x} = N v_{c_{xi}}^2 = N V_{c_x}^2 + 2N V_{c_x} V_{rpl} \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \quad (6.18)$$

A partir de (6.18), definindo $\bar{\mathcal{A}}$ como a média aritmética dos termos $N V_{c_x}^2$ ($x = a, b, c$ (Y) ou ab, bc, ca (Δ)) e \bar{a} e δ as amplitudes e fase resultantes da média aritmética do termo $2N V_{c_x} V_{rpl} \cos(2\omega t + \varphi_x)$, λ_{c_glb} pode ser escrita como mostra (6.19).

$$\lambda_{c_glb} = \bar{\mathcal{A}} + \bar{a} \cos(2\omega t + \delta) \quad (6.19)$$

Antes de prosseguir é importante notar que, em uma condição balanceada (operação somente com sequência positiva), a média dos três braços, λ_{c_glb} , não contém o termo oscilante de (6.19)³³. Portanto, para esse caso particular, o raciocínio a seguir não se aplica. Já em uma condição de desbalanço nas fases, o termo oscilante de

³² A equação (6.16), considera que as tensões nos submódulos do braço estão equalizadas. A consideração simplifica a análise sem comprometer seu resultado.

³³ Funcionando em condições de equilíbrio, as amplitudes do *ripple* das tensões dos braços do conversor são iguais e os sinais estão defasados em 120°. Portanto a média das tensões CC, uma vez que resulta da soma dos sinais, não contém o *ripple* de 2ª Harmônica.

(6.19) está presente e precisa ser considerado. Sendo assim, seguindo o diagrama da Figura 6.6, o erro produzido é dado por (6.20).

$$\text{Erro} = \lambda c^* - \lambda c_{\text{glb}} = \lambda c^* - \bar{\mathcal{A}} - \bar{a} \cos(2\omega t + \delta) \quad (6.20)$$

A saída do controlador, $I_{b_{\parallel}}^*$, é então dada por (6.21).

$$I_{b_{\parallel}}^* = Gv_m (\lambda c^* - \bar{\mathcal{A}}) - \bar{a} Gv_m \cos(2\omega t + \delta) \quad (6.21)$$

De acordo com o diagrama da Figura 6.6, a multiplicação da saída do controlador, $I_{b_{\parallel}}^*$ pelo sinal $v_{p\parallel_{x\parallel}}$ produz a referência, $i_{b_x}^*$, entregue à malha de corrente como mostra (6.22)

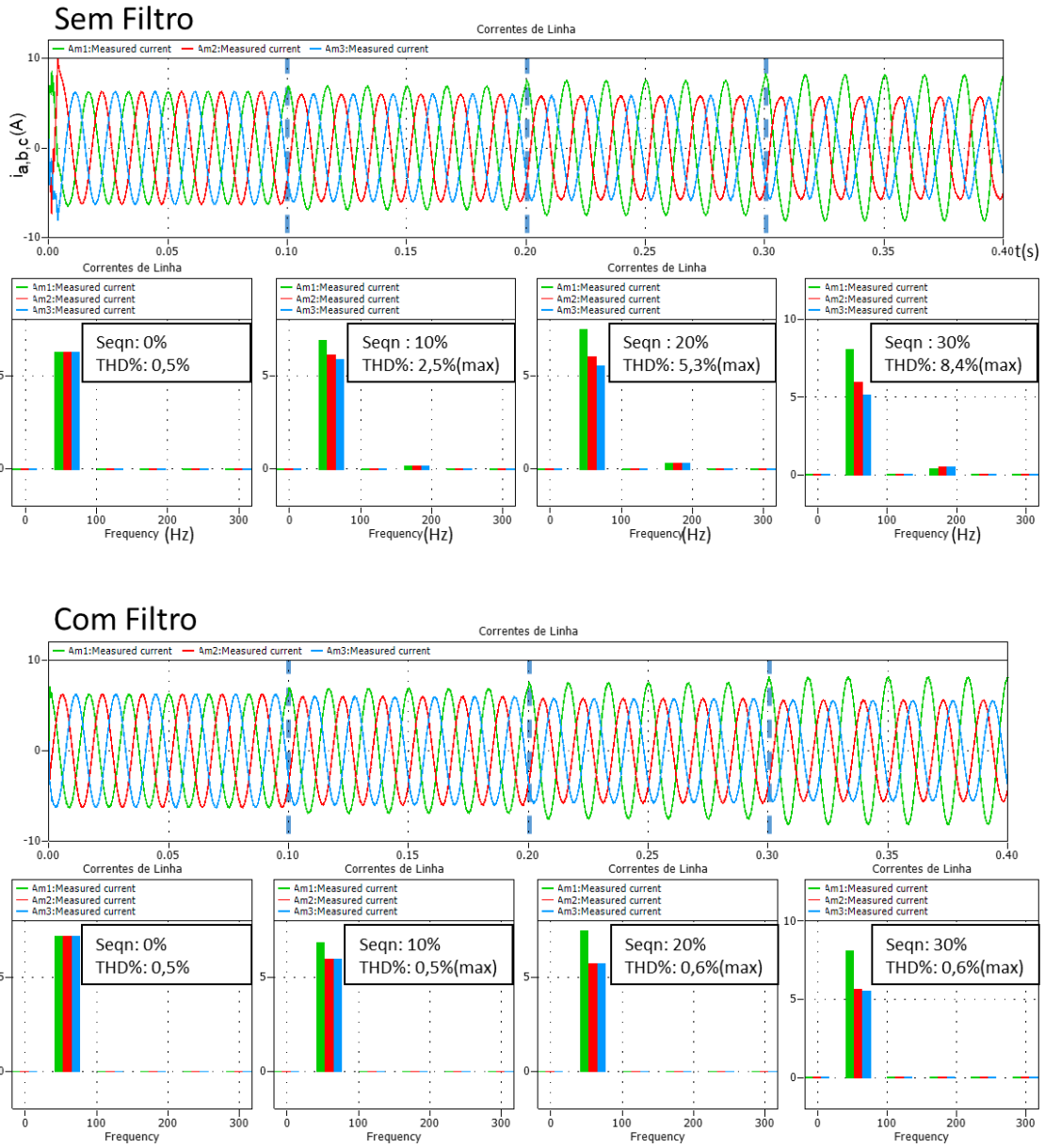
$$i_{b_x}^* = I_{b_{\parallel}}^* \cdot 1 \cos(\omega t + \varphi_{vx}) = Gv_m/2 (\lambda c^* - \bar{\mathcal{A}}) \cos(\omega t + \varphi_{vx}) - \bar{a} Gv_m/2 [\cos(\omega t + \delta - \varphi_{vx}) + \cos(3\omega t + \delta + \varphi_{vx})] \quad (6.22)$$

A análise de (6.22) permite afirmar que:

- O termo de 3ª Harmônica, $\bar{a} Gv_m/2 \cos(3\omega t + \delta + \varphi_{vx})$, produzido pelo batimento do *ripple* de 2ª Harmônica com o sinal $v_{p\parallel_{x\parallel}}$, irá introduzir distorções na corrente injetada.
- O termo intermediário, $\bar{a} Gv_m/2 \cos(\omega t + \delta - \varphi_{vx})$, também produzido pelo batimento do *ripple* de 2ª harmônica com o sinal $v_{p\parallel_{x\parallel}}$, introduz um erro que se soma ao primeiro termo. Contudo, comparado à magnitude de $\bar{\mathcal{A}}$, é extremamente pequeno e não provoca impacto perceptível.

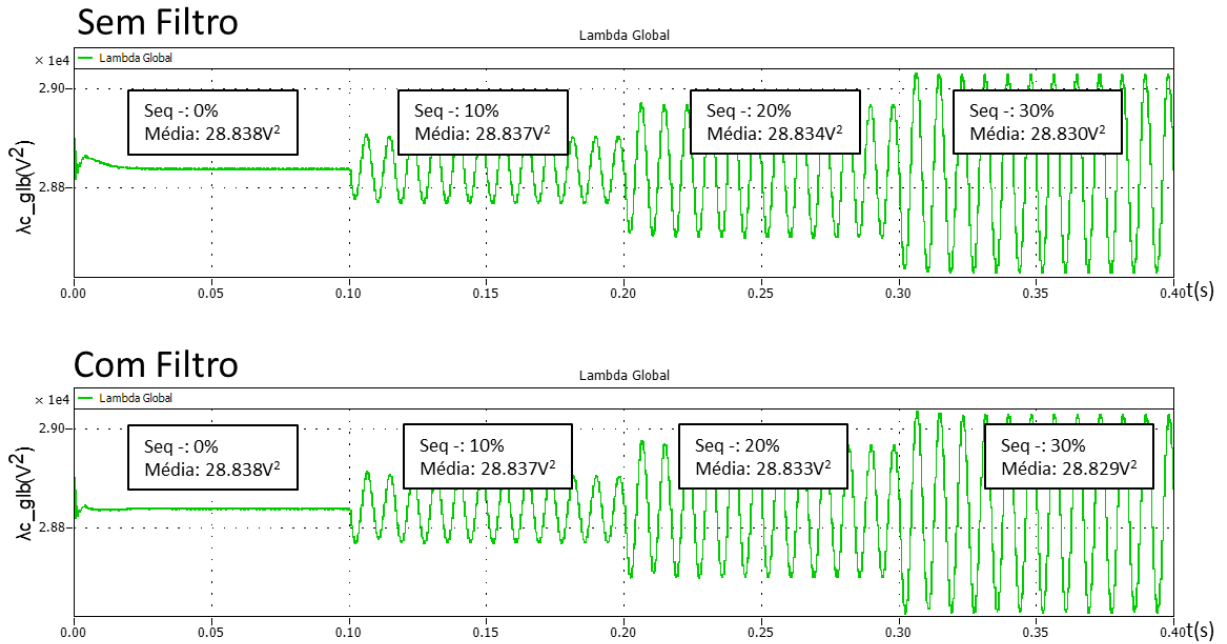
As Figuras 6.7 e 6.8 comparam, respectivamente, o nível de distorção harmônica na corrente injetada e o comportamento da Média Global das tensões CC, λc_{glb} , para níveis crescentes de desbalanceamento (% de sequência negativa na corrente), com e sem o uso de filtro, na malha de Regulação da Média Global das tensões CC.

Figura 6. 7 – THD% Máxima na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

Figura 6. 8 – Comportamento de λ_{c_glb}

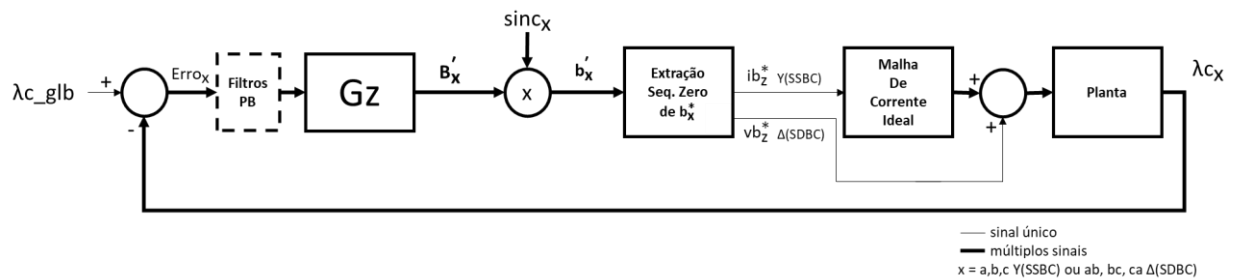


Fonte: Próprio autor

Como se observa, o impacto negativo produzido pelo *ripple* de 2ª Harmônica, que justifica a necessidade do uso de filtro na malha de Regulação da Média Global, é a introdução de distorções de 3ª Harmônica na corrente injetada.

Voltando agora a atenção para o Balanceamento das tensões CC nos braços, a Figura 6.9 apresenta uma visão agrupada da malha já apresentada nas Figuras 5.8 e 5.9 do capítulo anterior.

Figura 6. 9 – Malhas de Balanceamento da Tensão CC



Fonte: Próprio autor

No diagrama:

- λ_{c_glb} consiste na média aritmética instantânea de λ_{c_x} e, para a malha em questão, a referência de controle.

- Filtros PB são os Filtros Passa-Baixas cuja necessidade de inclusão nas malhas está sendo avaliada.
- G_z é a função de transferência dos controladores da malha. Nesta análise assume um valor fixo (controlador P) mas pode também ser um sistema dinâmico no tempo (ex.: controladores PI).
- B'_x são os sinais de saída dos controladores. Consistem nas amplitudes dos sinais dos quais será extraído o sinal de sequência zero gerado pelas malhas (tensão para Y(SSBC) e corrente para Δ (SDBC)).
- sinc_x é um sinal trifásico de amplitude unitária, com a mesma fase e frequência (harmônica fundamental) da tensão na rede ou da corrente nos braços do conversor dependendo da configuração, Y(SSBC) ou Δ (SDBC). No texto assume a forma indicada em (6.23)

$$\text{sinc}_x = 1 \cos(\omega t + \varphi_x) \quad (6.23)$$

- b'_x contém os sinais resultantes da multiplicação dos sinais produzidos pelos controladores, B'_x , pelo sinal sinc_x . Constitui a base da qual é extraído o sinal de sequência zero produzido pela malha. b'_x tem a dimensão de tensão na configuração Y(SSBC) e de corrente na configuração Δ (SDBC).
- ib_z^* e vb_z^* são os sinais de sequência zero produzidos a partir dos componentes de b'_x . O sinal vb_z^* é o sinal produzido na configuração Y(SSBC) e ib_z^* na configuração Δ (SDBC).

Analisando a operação em um ambiente balanceado a primeira observação a ser feita é que λ_{c_glb} assume um valor constante, mantido estável pela Malha de Regulação da Média Global, que não apresenta *ripple* (vide nota de rodapé 33).

Partindo de (6.19) e definindo $\mathcal{A}_x = NV_c^2$ e $a_x = 2NV_c V_{rplx}$, λ_{c_x} assume a forma apresentada em (6.24).

$$\lambda_{c_x} = \mathcal{A}_x + a_x \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \quad (6.24)$$

Com base em (6.24) e de acordo com o diagrama da Figura 6.9 os sinais produzidos pelos controladores, B'_x , são dados por (6.25).

$$B'_x = Gz(\lambda c_{glb} - \mathcal{A}_x) - Gza_x \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \quad (6.25)$$

Importante notar que, como a operação se dá em um ambiente balanceado, \mathcal{A}_x e a_x são iguais nos três braços ($\mathcal{A}_{a/ab} = \mathcal{A}_{b/bc} = \mathcal{A}_{c/ca}$ e $a_{a/ab} = a_{b/bc} = a_{c/ca}$) e $Gza_x \cos(2\omega t + \varphi_{rplx})$ apresenta sequência negativa³⁴ ($\varphi_{rpla/ab} = \varphi$, $\varphi_{rplb/bc} = \varphi + 120^\circ$, $\varphi_{rplc/ca} = \varphi - 120^\circ$).

b'_x , que resulta do produto de B'_x com sinc_x , é apresentado em (6.26).

$$b'_x = Gz/2(\lambda c_{glb} - \mathcal{A}_x) \cos(\omega t + \varphi_{_x}) - Gza_x/2[\cos(\omega t + \varphi_{rplx} - \varphi_{_x}) + \cos(3\omega t + \varphi_{rplx} + \varphi_{_x})] \quad (6.26)$$

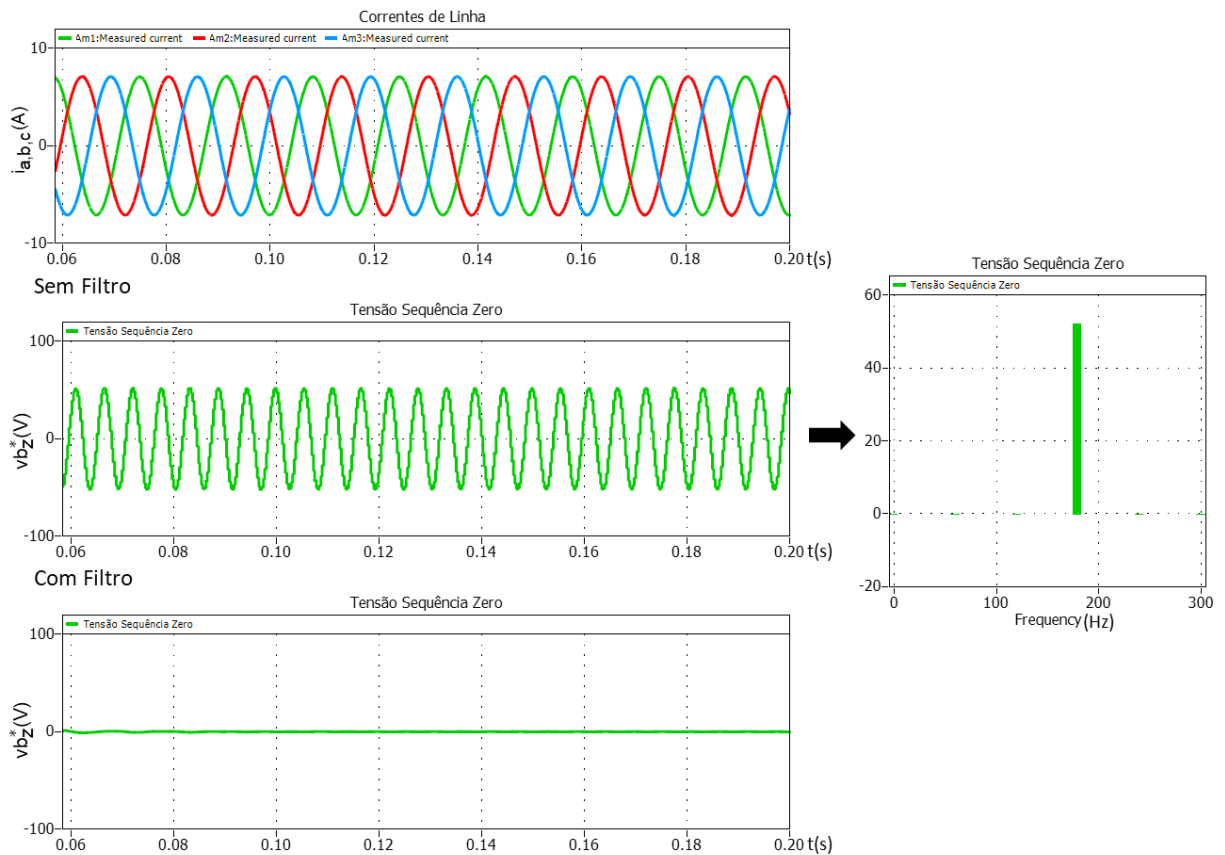
O sinal de sequência zero é obtido a partir da média aritmética instantânea dos componentes de b'_x e, analisando o resultado dessa operação em um sistema balanceado, nota-se que:

- A soma do primeiro termo, $Gz/2(\lambda c_{glb} - \mathcal{A}_x) \cos(\omega t + \varphi_{_x})$, é nula uma vez que as componentes têm a mesma amplitude e estão defasadas 120° uma em relação a outra.
- Pode-se dizer o mesmo da soma do segundo termo, $Gza_x/2 \cos(\omega t + \varphi_{rplx} - \varphi_{_x})$ pois têm a mesma amplitude e a diferença entre φ_{rplx} e $\varphi_{_x}$, por terem sequências opostas, também resulta em sinais defasados de 120° .
- Contudo, o terceiro termo, $Gza_x/2 \cos(3\omega t + \varphi_{rplx} + \varphi_{_x})$, é um sinal de sequência zero uma vez que a soma de φ_{rplx} e $\varphi_{_x}$, por terem sequências opostas, produz componentes com a mesma fase. É uma componente perene que consome parte da faixa dinâmica de operação do conversor.

A Figura 6.10 apresenta o sinal de sequência zero e seu espectro produzido pela malha de Balanceamento com e sem o uso de filtros.

³⁴ O *ripple* da tensão está em sincronismo com a parcela oscilante da potência nos braços. Essa parcela, por resultar do produto de sinais de sequência positiva, apresenta sequência negativa.

Figura 6. 10 – Sinal de Sequência Zero Produzido Pela Malha de Balanceamento Com e Sem Filtro
 Operação Sem Desbalanço - Sinais Obtidos na Configuração Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

A presença da componente de sequência zero de 3ª Harmônica em ambiente balanceado já configura, por si só, justificativa para o uso de filtros para eliminação do *ripple*, mas é interessante analisar como a malha se comporta na condição com desbalanço.

Em uma condição com desbalanço nota-se que:

- λ_{c_glb} passa a apresentar uma parcela oscilante como mostra (6.19)
- Os termos \mathcal{A}_x e a_x de λ_{c_x} na equação (6.24) passam a apresentar valores diferentes para x ($\mathcal{A}_{a/ab} \neq \mathcal{A}_{b/bc} \neq \mathcal{A}_{c/ca}$ e $a_{a/ab} \neq a_{b/bc} \neq a_{c/ca}$) e as fases φ_{rplx} não estarão necessariamente deslocadas de 120° uma das outras ($\varphi_{rpla/ab} = \varphi$, $\varphi_{rplb/bc} = \varphi + ?^\circ$, $\varphi_{rplc/ca} = \varphi - ?^\circ$).

Com isso, os sinais produzidos pelos controladores assumem a forma de (6.27).

$$B'_x = Gz(\bar{A} - A_x) + Gz \bar{a} \cos(2\omega t + \delta) - Gza_x \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \quad (6.27)$$

E b'_x , resulta em (6.28)

$$b'_x = Gz(\bar{A} - A_x) \cos(\omega t + \varphi_{_x}) + Gz \bar{a} \cos(2\omega t + \delta) \cos(\omega t + \varphi_{_x}) - Gza_x \cos(2\omega t + \varphi_{rplx}) \cos(\omega t + \varphi_{_x}) \quad (6.28)$$

Fazendo uso de relações trigonométricas (6.28) pode ser colocada na forma de (6.29)

$$b'_x = Gz(\bar{A} - A_x) \cos(\omega t + \varphi_{_x}) + Gz \bar{a}/2 [\cos(\omega t + \delta - \varphi_{_x}) + \cos(3\omega t + \delta + \varphi_{_x})] - Gza_x/2 [\cos(\omega t + \varphi_{rplx} - \varphi_{_x}) + \cos(3\omega t + \varphi_{rplx} + \varphi_{_x})] \quad (6.29)$$

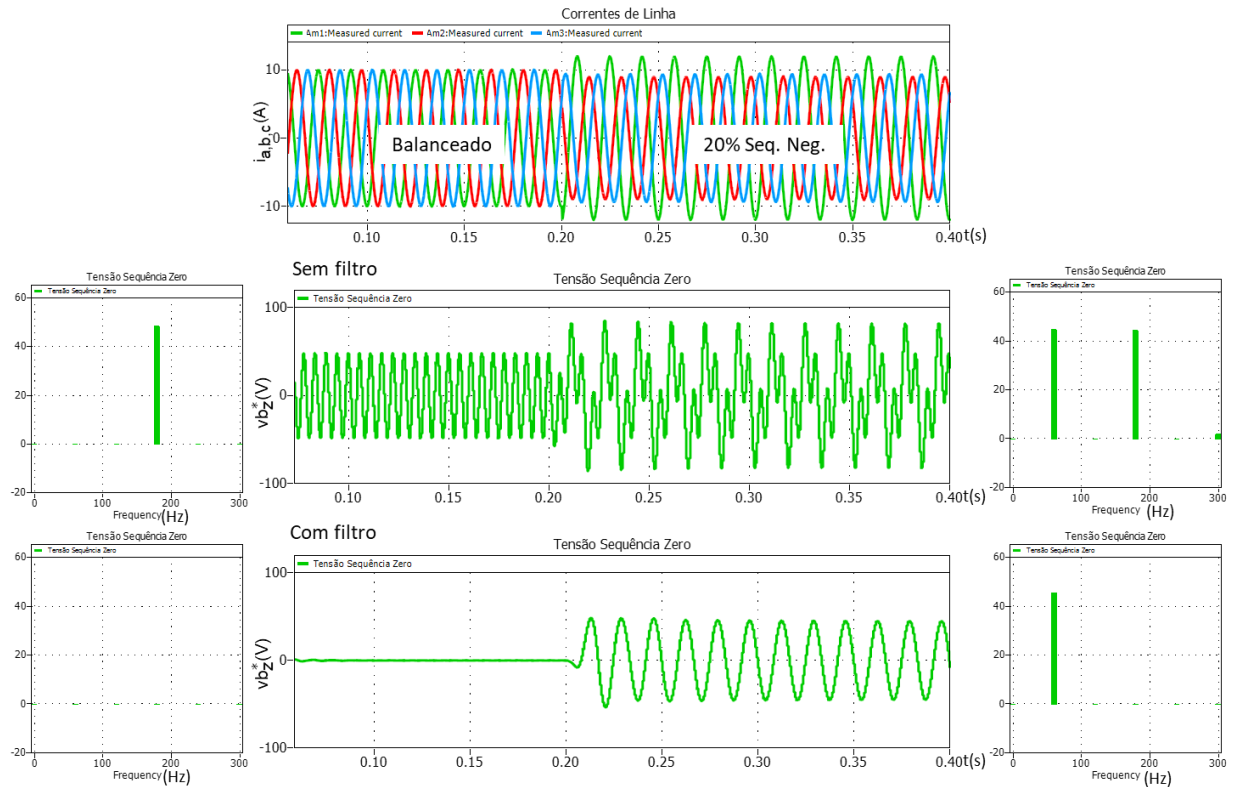
Da média aritmética de (6.29), a ser realizada para a obtenção do sinal de sequência zero, é possível concluir que:

- A média do primeiro termo, $Gz(\bar{A} - A_x) \cos(\omega t + \varphi_{_x})$, é a que contém a componente de sequência zero que está sendo buscada. Nota-se que este é o único termo que independe do *ripple* e, portanto, o único que permanece se as malhas possuírem filtros.
- A média do segundo termo, $Gz \bar{a}/2 [\cos(\omega t + \delta - \varphi_{_x}) + \cos(3\omega t + \delta + \varphi_{_x})]$, se iguala a zero pois ambas as componentes de 1ª e 3ª harmônicas tem a mesma amplitude e estão defasadas de 120°.
- Já o terceiro termo, $Gza_x/2 [\cos(\omega t + \varphi_{rplx} - \varphi_{_x}) + \cos(3\omega t + \varphi_{rplx} + \varphi_{_x})]$, não é nulo. Nota-se que as amplitudes das componentes não são iguais e que a soma ou diferença de φ_{rplx} e $\varphi_{_x}$ não produzem fases igualmente deslocadas em 120°. Esse termo introduzirá componentes 1ª e 3ª harmônicas no sinal de sequência zero produzido. Dadas as orientações básicas de φ_{rplx} e $\varphi_{_x}$, a componente de 1ª Harmônica tende a ser pequena e não traz impactos para a componente principal gerada a partir do primeiro termo. Já a componente de 3ª Harmônica terá magnitude significativa ocupando faixa dinâmica do conversor.

A Figura 6.11 apresenta o sinal de sequência zero produzido pela Malha de Balanceamento, com e sem o uso de filtros, em condições de operação balanceada e com desbalanceo. Como se observa, na ausência de filtros, a componente de 3ª Harmônica é perene e se mantém em níveis bastante próximos tanto na operação balanceada como em desbalanceo. Importante notar como essa componente compromete a faixa dinâmica de operação do conversor especialmente quando

operando em desbalanceamento. Nota-se, também, que a componente de 1ª Harmônica, responsável pela ação de balanceamento, como previsto, não sofre influência considerável do *ripple*.

Figura 6. 11 – Sinal de Sequência Zero Produzido Pela Malha de Balanceamento Com e Sem Filtro
Operação com Desbalanceamento - Sinais Obtidos na Configuração Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

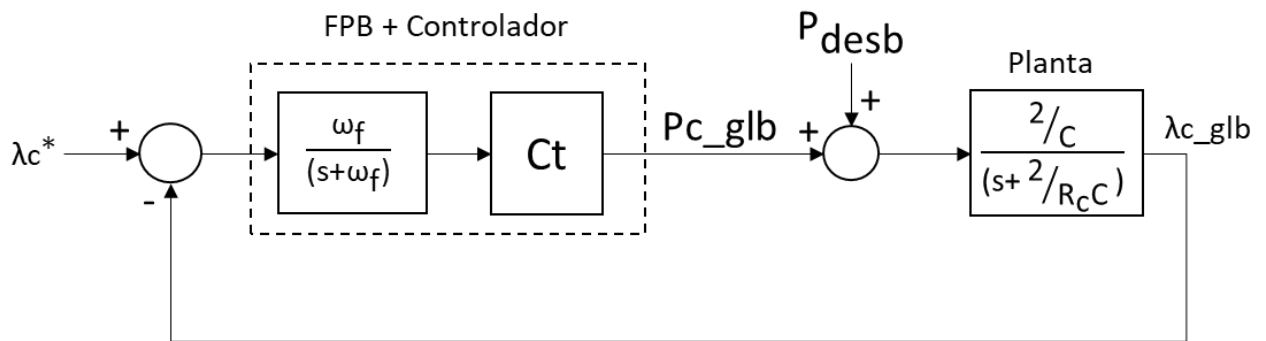
A análise realizada neste item mostrou os efeitos negativos trazidos pelo *ripple* de 2ª Harmônica para a Regulação da Média Global e para o Balanceamento das Tensões CC dos braços do conversor. Na Malha de Regulação da Média Global, a utilização de um filtro que garanta boa atenuação do *ripple* é importante para evitar a introdução de componentes de 3ª Harmônica e, com isso, distorção da corrente injetada. Na Malha de Balanceamento os filtros são ferramenta-chave para evitar a introdução da componente de 3ª Harmônica no sinal de sequência zero produzido. Tal componente é perene, independe da condição de operação (com ou sem desbalanceamento) e reduz a faixa dinâmica de operação do conversor.

6.2.2. Projeto dos Controladores

a. Escolha dos controladores

Novamente, partindo das figuras 5.6 e 5.7 do capítulo anterior e incluindo a filtragem do *ripple* de 2ª Harmônica pode-se representar a Malha de Regulação da Média Global das tensões CC dos braços do conversor pelo diagrama exposto na Figura 6.12³⁵.

Figura 6. 12 – Diagrama simplificado - Malha de Regulação da Média Global das Tensões CC com FPB



Fonte: Próprio autor

No diagrama:

- P_{c_glb} é a potência média a ser drenada ou injetada para que a variável controlada, λ_{c_glb} , se mantenha no nível estabelecido pela referência λ_{c}^* .
- P_{desb} é a potência média produzida pelo desbalanço com o qual o conversor está trabalhando.
- ω_f é a frequência angular na qual o polo do FPB é fixado.
- C_t é a função de transferência do controlador.

Como esta é uma malha que trabalha com a média dos três braços, P_{desb} é zero (vide Capítulo 3, Tabela 3.3), portanto a malha não está sujeita à perturbação imposta pela operação em desbalanço.

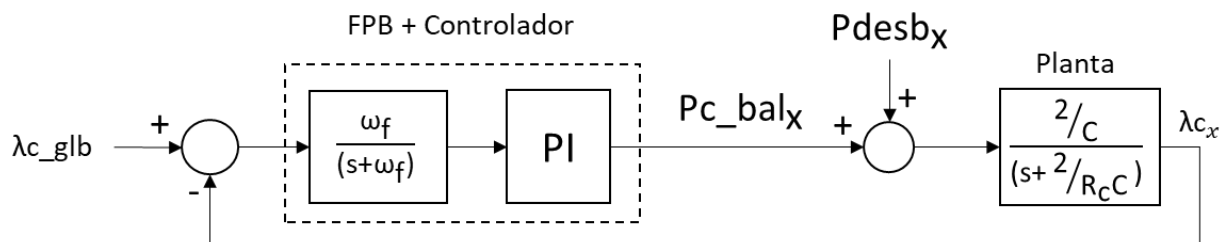
É fato que, caso as especificações de projeto permitam um certo erro de regime, a malha pode operar com um controlador Proporcional ($C_t=P$). No entanto, o roteiro a seguir, inspirado em [40], realizará o projeto de um controlador Proporcional-Integral ($C_t=PI$) que permite eliminar o erro de regime já que a malha trabalha com a regulação

³⁵ Considera-se também que a Malha de Corrente e o conversor são blocos ideais.

de um valor fixo. Dessa forma, o roteiro entregará valores para os ganhos Proporcional e Integral do controlador. A decisão por utilizar um controlador P ou PI é do projetista com base nas condições de contorno do projeto.

Já a Malha de Balanceamento exposta em mais detalhes nas Figuras 5.8 e 5.9 é apresentada de forma simplificada, também incluindo a filtragem do *ripple*, na Figura 6.13.

Figura 6. 13 – Diagrama simplificado - Malha de Balanceamento das Tensões CC com FPB



$x = a, b, c$ (SSBC) ou ab, bc, ca (SDBC)

Fonte: Próprio autor

No diagrama:

- $Pdesb_x$ é a potência produzida no braço pelo desbalanceamento com o qual o conversor está trabalhando.
- Pc_bal_x é a potência média produzida pela injeção de sequência zero realizada pela malha no braço x do conversor.

O aspecto chave a ser notado no funcionamento dessa malha é que nela, diferente da Malha de Regulação da Média Global, a perturbação causada pelo desbalanceamento é importante e consiste no fator a ser compensado (vide novamente Capítulo 3, Tabela 3.3).

Na Malha de Balanceamento, o uso de controladores P não proporciona boa atenuação da perturbação produzindo um erro de balanceamento significativo. Assim, para garantir uma atenuação eficaz da perturbação e garantir o balanceamento de acordo com a referência, λ_{c_glb} , o uso de controladores PI é necessário.

b. Determinação dos Ganhos Proporcional e Integral dos Controladores

Nas figuras 6.12 e 6.13 observa-se que ambas as malhas (Regulação da Média Global e Balanceamento) apresentam as mesmas características (planta, filtro são iguais). Dessa forma o projeto realizado a seguir se aplica indistintamente a qualquer uma delas.

Considerando, portanto, o uso de controladores PI nas malhas, cuja função de transferência é dada em (6.30), a partir dos diagramas das figuras 6.12 ou 6.13 extrai-se a função de malha aberta, $Av(s)$, apresentada em (6.31).

$$PI(s) = \frac{Kp_v(s+Ki_v)}{s} \quad (6.30)$$

$$Av(s) = \frac{2Kp_v\omega_f}{C} \frac{(s+Ki_v)}{s(s^2/C^2R_c)(s+\omega_f)} \quad (6.31)$$

De (6.31) são extraídas as fórmulas para o módulo e fase de $Av(s)$ indicadas em (6.32) e (6.33) respectivamente.

$$|Av| = \frac{2Kp_v\omega_f}{\omega C} \frac{\sqrt{\omega^2 + Ki_v^2}}{\sqrt{\omega^2 + 4/C^2R_c^2} \sqrt{\omega^2 + \omega_f^2}} \quad (6.32)$$

$$\angle Ai = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{Ki_v}\right) - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{2/C^2R_c}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_f}\right) \quad (6.33)$$

A margem de fase, MF_v , na Frequência de *Crossover*, ω_{c_v} , é dada por (6.34).

$$MF_v = \angle Ai + \pi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{Ki_v}\right) + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{2/C^2R_c}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{\omega_f}\right) \quad (6.34)$$

Considerando que, $\omega_{c_v} \gg Ki_v$ e $\omega_{c_v} \gg 2/C^2R_c$ tem-se:

$$MF_v = \angle Ai + \pi = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{\omega_f}\right) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{\omega_f}\right) \quad (6.35)$$

Reagrupando os termos:

$$\tan^{-1}\left(\frac{\omega_{c_v}}{\omega_f}\right) = \frac{\pi}{2} - MF_v \quad (6.36)$$

ou

$$\omega_{c_v} = \omega_f \tan\left(\frac{\pi}{2} - MF_v\right) \quad (6.37)$$

Considerando ainda que, na frequência de *crossover* $|A_v|=1$, define-se a fórmula para o ganho proporcional, K_{p_v} .

$$K_{p_v} = \frac{C \omega_{c_v} \sqrt{\omega_{c_v}^2 + \omega_f^2}}{2\omega_f} \quad (6.38)$$

O ganho integral é fixado numa fração da frequência de *crossover* como mostra (6.41).

$$K_{i_v} = \frac{\omega_{c_v}}{10} \quad (6.39)$$

Com (6.37), (6.38) e (6.39) pode-se calcular os ganhos dos controladores a partir do estabelecimento da Margem de Fase, MF_v , das malhas.

A Tabela 6.6 apresenta parâmetros a serem utilizados nos cálculos subsequentes.

Tabela 6. 6 – Parâmetros para Cálculo do Ganhos dos Controladores

Parâmetro	Valor	Comentários
MF_v	60°	O objetivo é buscar um comportamento próximo do criticamente amortecido.
ω_f	240rd/s	As malhas utilizarão filtros de Média Móvel com Janela de Amostragem, T_{mm} , de 8.33ms Os filtros serão representados pela função de transferência [42]: $\frac{2/T_{mm}}{(s+2/T_{mm})} = \frac{240}{(s+240)}$
C	3.300 μ F (Y) 1.000 μ F(Δ)	Conforme Tabela 6.1

Utilizando (6.37) determina-se a Frequência de *Crossover*, ω_{c_v} , cujo valor é apresentado em (6.40).

$$\omega_{c_v} = 240 \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3}\right) \Rightarrow \omega_{c_v} = 138 \text{rd/s} \quad (6.40)$$

Utilizando (6.38) obtém-se o valor do ganho proporcional, K_{p_v} , para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC).

$$K_{p_v} = \frac{C \omega_{c_v} \sqrt{\omega_{c_v}^2 + \omega_f^2}}{2\omega_f} \Rightarrow \frac{3.300 \cdot 10^{-6} \cdot 138 \cdot \sqrt{138^2 + 240^2}}{2 \cdot 240} \Rightarrow K_{p_v} = 0,26 \quad p/ Y(\text{SSBC}) \quad (6.41)$$

$$K_{p_v} = \frac{1.000 \cdot 10^{-6} \cdot 138 \cdot \sqrt{138^2 + 240^2}}{2 \cdot 240} \Rightarrow K_{p_v} = 0,08 \quad p/ \Delta(\text{SDBC}) \quad (6.42)$$

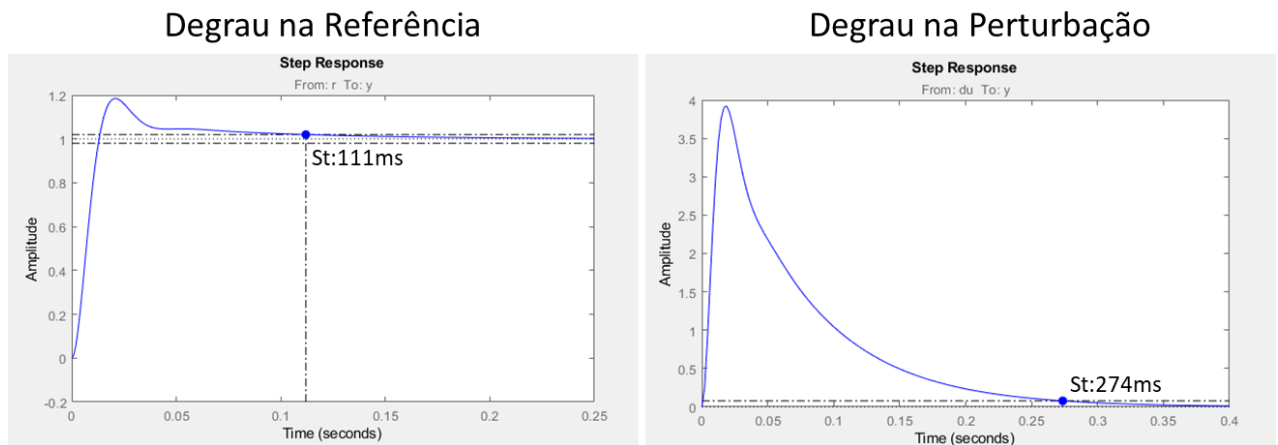
E com (6.39) determina-se o ganho integral, K_{i_v} .

$$K_{iV} = \frac{\omega_{cV}}{10} \Rightarrow \frac{138}{10} \Rightarrow K_{iV} \approx 13,8 \quad (6.43)$$

A partir da análise de (6.37) observa-se que a Frequência de *Crossover* do sistema passa a ser uma fração da frequência de corte do Filtro Passa-Baixas para que se tenha uma boa condição de estabilidade (note que para $MF > 45^\circ$ $\omega_{cV} < \omega_f$). Dessa forma as malhas de controle da tensão CC são mais lentas apresentando tempos de estabilização que consomem vários ciclos de rede (~ 7 a 16 ciclos).

A Figura 6.14 apresenta a resposta ao degrau, obtida com auxílio do *software* MATLAB, das malhas das Figuras 6.12 e 6.13 com os controladores ajustados com os valores calculados acima.

Figura 6. 14 – Resposta ao Degrau – Malhas de Controle da Tensão CC



Fonte: Próprio autor

A figura mostra a resposta tanto para um degrau na Referência como na Perturbação que são importantes para entender o comportamento das malhas em condições de operação com e sem desbalanço a serem exploradas no Capítulo 7.

A Tabela 6.7 sumariza os ganhos a serem utilizados nos controladores das malhas de Controle da Tensão CC dos braços.

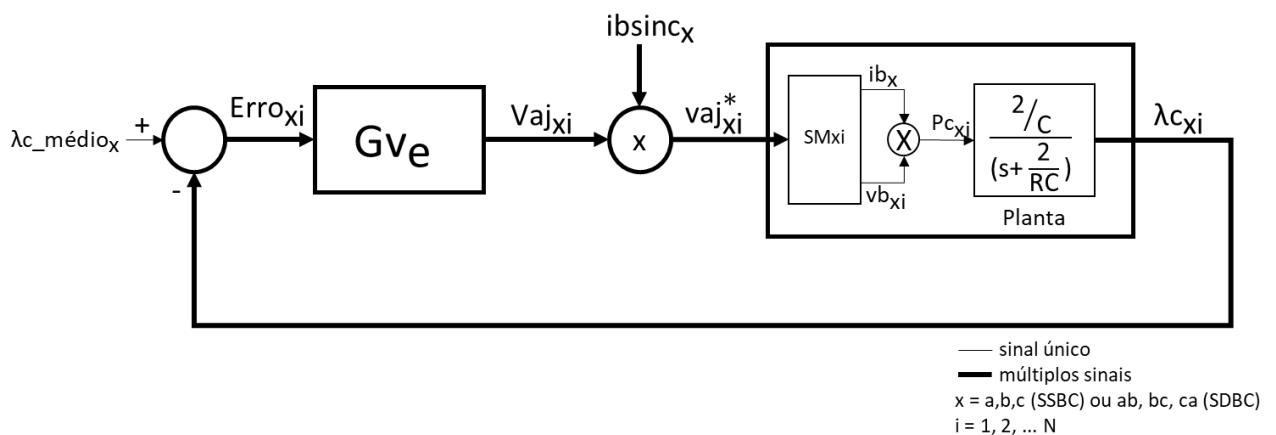
Tabela 6. 7 – Ajustes dos Controladores das Malhas de Controle da Tensão CC

Malha	Ganho Proporcional Kp_v	Ganho Integral Ki_v
Regulação da Média Global – Υ (SSBC)	0,26	13,8
Balanceamento – Υ (SSBC)	0,26	13,8
Regulação da Média Global – Δ (SDBC)	0,08	13,8
Balanceamento – Δ (SDBC)	0,08	13,8

6.3. Projeto das Malhas de Equalização Individual das Tensões CC dos Submódulos dos Braços do Conversor

As malhas de Equalização Individual já vistas na Figura 5.12 do capítulo anterior são rerepresentadas na Figura 6.15 de uma forma simplificada.

Figura 6. 15 – Diagrama simplificado - Malhas de Equalização Individual das Tensões CC dos Submódulos dos Braços



Fonte: Próprio Autor

No diagrama:

- $\lambda_{c_{xi}}$ é o quadrado da tensão CC medida no submódulo i do braço x do conversor.
- $\lambda_{c_médio_x}$ é a referência das malhas de equalização. Consiste na média aritmética dos quadrados das tensões CC dos N submódulos do braço x .
- $Erro_{xi}$ é o erro observado na malha i do braço x .
- Gv_e é a função de transferência do controlador, igual para todas as N malhas de equalização do braço x .

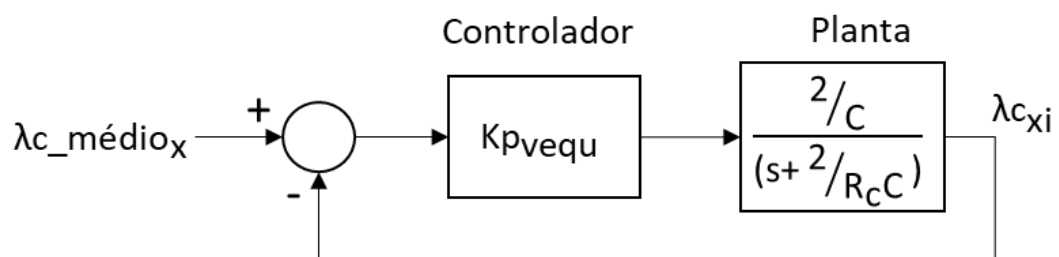
- $V_{aj_{xi}}$ é a saída do controlador da malha i do braço x . É a amplitude do sinal de ajuste a ser imposto ao sinal modulador do PWM que aciona o submódulo i do braço.
- $ibsinc_x$ é um sinal de amplitude unitária, com a mesma fase e frequência da corrente no braço x .
- $v_{aj_{xi}}^*$ é o sinal de ajuste a ser imposto ao sinal modulador do PWM que aciona o submódulo i do braço x .

Diferente da Malha de Balanceamento das tensões CC dos braços, nas malhas de Equalização Individual o *ripple* de 2ª Harmônica não produz os efeitos negativos apresentados no subitem 6.2.1 (produção de componentes de 3ª Harmônica). Isso se deve ao fato de que a ação das malhas não altera a tensão total no braço (a soma dos ajustes $v_{aj_{xi}}^*$ em cada braço é nula). Assim, por não trazerem impacto significativo ao sinal produzido nos braços do conversor o uso de filtros é, muitas vezes dispensado. Em princípio não estão sujeitas à perturbação provocada por desbalanços na corrente ou tensão e, portanto, podem trabalhar com controladores P.

Por fim, dado que atuam em sinais contínuos e podem trabalhar com tempos de resposta consideravelmente maiores que os tempos de amostragem do sistema, seu projeto pode ser realizado no tempo contínuo, desconsiderando o atraso de cálculo, sem comprometer o resultado do projeto.

Dessa forma, para o projeto das malhas será utilizado o modelo apresentado na Figura 6.16.

Figura 6. 16 – Diagrama simplificado - Malha de Equalização Individual sem filtros



Fonte: Próprio Autor

De acordo com o diagrama, a função de transferência da malha é dada por (6.44).

$$\frac{\lambda_{c_glb}}{\lambda_c^*} = \frac{\frac{2K_{p_vequ}}{C}}{s + \left(\frac{2}{R_c C} + \frac{2K_{p_vequ}}{C}\right)} \quad (6.44)$$

Com base em (6.44), considerando que o tempo de estabilização para sistemas de primeira ordem, $St_{2\%}$, é da ordem de 4τ , onde $\tau = 1/\left(\frac{2}{R_c C} + \frac{2K_{p_vequ}}{C}\right)$, e que $\frac{2}{R_c C} \ll \frac{2K_{p_vequ}}{C}$, pode-se determinar K_{p_vequ} através de (6.45).

$$K_{p_vequ} = \frac{2C}{St_{2\%}} \quad (6.45)$$

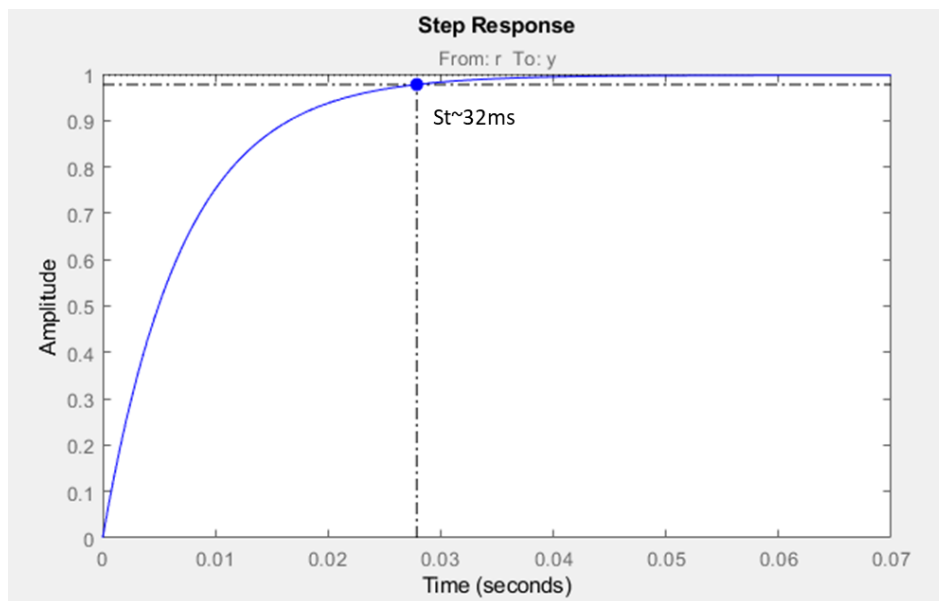
Se considerarmos um tempo de estabilização próximo a 2 ciclos de rede obtém-se os valores do Ganho Proporcional para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC):

$$K_{p_vequ} = \frac{2 \times 3.300 \times 10^{-6}}{33,3 \times 10^{-3}} \approx 0,2 \quad \text{para Y(SSBC)} \quad (6.46)$$

$$K_{p_vequ} = \frac{2 \times 1.000 \times 10^{-6}}{33,3 \times 10^{-3}} \approx 0,07 \quad \text{para } \Delta\text{(SDBC)} \quad (6.47)$$

A Figura 6.17 apresenta a resposta ao degrau, obtida com auxílio do *software* MATLAB, da malha da Figura 6.16 com o controlador ajustado com os valores calculados acima. No Capítulo 7, as simulações realizadas comprovam o comportamento aqui previsto.

Figura 6. 17 – Malha de Equalização Individual – Resposta ao Degrau



Fonte: Próprio autor

Como será visto nas simulações realizadas no Capítulo 7, a organização e o ajuste propostos para as malhas de Equalização Individual produziram resultados bastante satisfatórios.

No entanto, é importante mencionar que, em condições mais adversas (desbalanços permanentes, introdução de distorção harmônica pelos elementos de comutação, entre outros fatores) que distanciem o funcionamento do conversor ainda mais da condição ideal³⁶, o uso de filtros e um ajuste mais lento das malhas podem ser necessários para garantir uma ação relativamente rápida e estável dessas malhas.

6.4. Comentários Parciais do Capítulo 6

Neste capítulo foi apresentado um método para ajuste dos controladores das malhas de Controle da Corrente e das Tensões CC dos Braços do conversor.

Para a Malha de Corrente, o método baseia-se em [40]. Ele estabelece uma faixa de ajuste delimitada em um extremo pelo ponto de perda de estabilidade e, no outro, pelo erro máximo de rastreamento (magnitude e fase) permitido dentro de uma faixa de operação arbitrada para o conversor. Utilizando as relações estabelecidas por [40], o método determina a Frequência de *Crossover* e Ganho Proporcional máximos no ponto de perda de estabilidade (margem de fase nula) e a Frequência de *Crossover* mínima (Margem de Fase máxima) para o erro máximo de rastreamento permitido. Dentro da faixa estabelecida busca-se um ajuste que garanta boa estabilidade e velocidade (tempo de estabilização suficientemente menor que um ciclo de rede e maior que o período de amostragem do sistema). Como é possível observar, em sistemas discretos, com malhas que utilizam controladores PI e a estratégia de *feedforward* para a compensação do distúrbio causado pela tensão da rede, o que se tem é uma solução de compromisso onde é necessário lidar com os seguintes fatores:

- Malhas com controladores PI apresentam erro não nulo para $\omega \neq 0$.
- A estratégia de *feedforward* para compensação do distúrbio da rede não é totalmente eficaz em sistemas discretos devido ao atraso de cálculo.
- O distúrbio da rede, uma vez que não é totalmente eliminado, introduz erro na corrente injetada. Quanto menor o nível da corrente injetada, maior é a proporção do erro de rastreamento (magnitude e fase) introduzido.

³⁶ Tais condições não são consideradas neste trabalho.

- Quanto menor o erro permitido, maior o ganho proporcional necessário, o que diminui a margem de fase e o amortecimento do sistema.

Neste trabalho, consideradas as condições de contorno utilizadas, foi possível chegar a um ajuste bastante razoável para os controladores da malha.

Contudo, em situações em que não é possível conciliar as condições desejadas de estabilidade e erro de regime, o projeto necessariamente precisará visitar um ou mais pontos apresentados abaixo:

- Redefinição do erro de rastreamento máximo permitido ou da faixa de operação do conversor.
- Redimensionar o circuito de acoplamento buscando maximizar a indutância dentro de um limite aceitável para tensão nos barramentos CC.
- Mudança de arquitetura fazendo uso, por exemplo, de controladores P-Ressonante na malha de corrente possibilitando zerar erros de rastreamento e perturbação da rede na frequência de operação do sistema.

No projeto das malhas de controle das Tensões CC, o uso de controladores PI na Malha de Balanceamento é necessário uma vez que estão sujeitas à perturbação gerada na operação em desbalanço.

Um segundo aspecto que demanda atenção nas malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das Tensões CC nos braços é a filtragem do *ripple* de 2ª Harmônica presente nas tensões CC dos submódulos. O uso de filtros passa-baixa (FPB) é fundamental para evitar a introdução de componentes de 3ª Harmônica que aumentam a distorção harmônica da corrente injetada e comprometem a faixa dinâmica de operação do conversor.

A introdução de FPBs nas malhas, por sua vez, força a redução da Frequência de *Crossover* do sistema. Para que se tenha uma boa condição de estabilidade a Frequência de *Crossover* precisa ser baixa (menor que a frequência de corte do FPB). Dessa forma as malhas de controle da Tensão CC dos braços são mais lentas com tempos de estabilização que consomem vários ciclos de rede.

Nas malhas de Equalização Individual o uso de filtros foi descartado uma vez que a ação dessas malhas não altera a tensão total produzida nos braços. Em princípio, não estão sujeitas à perturbação provocada por desbalanços na corrente ou tensão o que

permite trabalharem com controladores P. Dado que atuam em sinais contínuos e podem trabalhar com tempos de resposta consideravelmente maiores que os tempos de amostragem do sistema, seu projeto pode ser realizado no tempo contínuo, desconsiderando o atraso de cálculo tornando o projeto bastante simples.

No entanto, como comentado no item 6.3, em condições mais adversas com desbalanços permanentes, distorção harmônica provocada pelos elementos de comutação, entre outros fatores que distanciam o funcionamento do conversor da condição ideal, o uso de filtros e um ajuste mais lento nas malhas de equalização podem ser necessários para garantir uma ação relativamente rápida e estável.

A Tabela 6.8 sumariza os ajustes determinados para cada malha de controle do conversor. Estes ajustes são utilizados nas simulações documentadas no Capítulo 7 que submetem as configurações estudadas a condições de funcionamento variadas, incluindo situações de desbalanço de tensão e corrente.

Tabela 6. 8 – Ajustes das Malhas de Controle da Corrente e das Tensões CC dos Braços do Conversor

Malhas de Controle	Ganho Proporcional do Controlador	Ganho Integral do Controlador	Filtro Passa-Baixas
Corrente	$K_{p_i}=55$ Y(SSBC) $K_{p_i}=164$ Δ (SDBC)	$K_{i_i}=546$	N/A
Regulação da Média Global das Tensões CC dos Braços	$K_{p_v}=0,26$ Y(SSBC) $K_{p_v}=0,08$ Δ (SDBC)	$K_{i_v}=13,8$	Média Móvel $FBP(s)=\frac{240}{(s+240)}$
Balanceamento das Tensões dos Braços	$K_{p_v}=0,26$ Y(SSBC) $K_{p_v}=0,08$ Δ (SDBC)	$K_{i_v}=13,8$	Média Móvel $FBP(s)=\frac{240}{(s+240)}$
Equalização Individual da Tensão CC dos Submódulos	$K_{p_{vequ}}=0,2$ Y(SSBC) $K_{p_{vequ}}=0,07$ Δ (SDBC)	N/A	N/A

7. Validação por simulação

Este capítulo avalia o desempenho da arquitetura de controle proposta no Capítulo 4. Dois modelos referenciados pelos termos ‘Modelo M’ e ‘Modelo P’, serão utilizados no processo de avaliação.

O Modelo M baseia-se na modelagem desenvolvida no Capítulo 5 e seu comportamento será analisado através de simulações realizadas com ajuda do *software* Matlab. Trata-se de um modelo simplificado, desacoplado, em que linearizações e idealizações foram aplicadas sempre e onde considerou-se possível. Não considera a modulação PWM e o conversor é tratado como um bloco ideal, de ganho unitário, na modelagem da Malha de Controle da Corrente. Ao mesmo tempo, na modelagem das malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC, a Malha de Controle da Corrente também é considerada um bloco ideal de ganho unitário.

O Modelo P, descrito em mais detalhes no Apêndice H, aproxima-se mais de um sistema experimental e foi concebido com o auxílio do *software* de simulação PLECS. Trata-se de um modelo trifásico, em que limites de saturação nos controladores e no conversor, a modulação PWM e eventuais acoplamentos entre as malhas de controle estão presentes.

O objetivo do item 7.1 é avaliar o comportamento do Modelo M e sua capacidade de representar, com fidelidade, o comportamento observado no Modelo P, ambos ajustados de acordo com o projeto dos controladores realizado no Capítulo 6 (vide Tabela 6.8).

O item 7.2 se concentra no Modelo P e avalia o desempenho das arquiteturas propostas em situações específicas, incluindo desbalanços de corrente e tensão.

7.1. Comparação do Comportamento dos Modelos de Simulação e Verificação dos Projetos das Malhas em Condições Equilibradas

7.1.1. Malha de Controle da Corrente Injetada

O comportamento da Malha de Corrente é verificado tanto no regime transitório, observando a resposta ao degrau na Referência de Corrente, como no regime

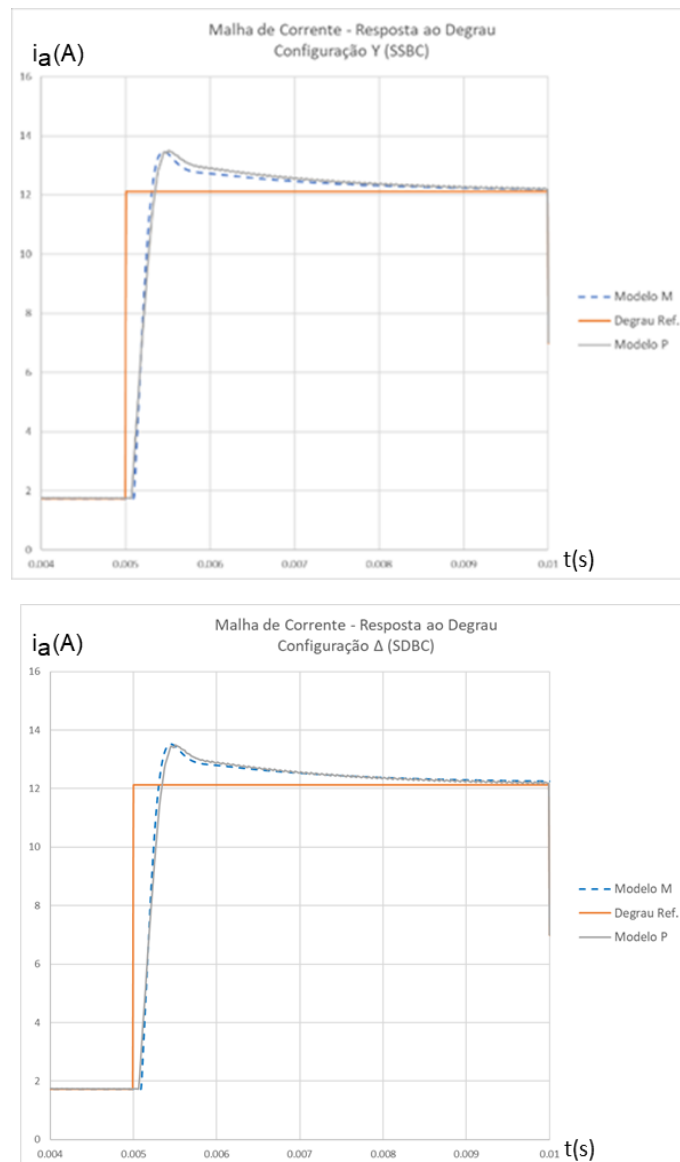
permanente com referência senoidal, averiguando os erros de rastreamento (magnitude e fase).

O Modelo P utilizado na avaliação da Malha de Corrente possui as seguintes características:

- Na obtenção da resposta ao degrau a tensão da rede é reduzida a zero evitando, assim, o distúrbio que ela introduz.
- As tensões CC dos submódulos são fornecidas por fontes de tensão ideais evitando qualquer alteração de comportamento que as malhas de controle da tensão CC poderiam impor ao funcionamento da malha.

A Figura 7.1 apresenta a comparação da resposta ao degrau na Referência de Corrente nas duas configurações Y (SSBC) e Δ (SDBC).

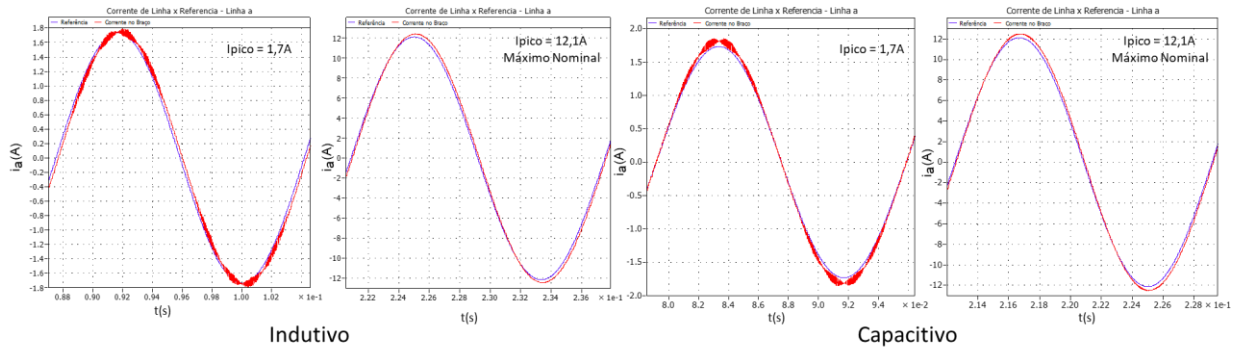
Figura 7. 1 – Malha de Controle da Corrente Injetada – Resposta ao Degrau de Amplitude
(Corrente de Linha)



Fonte: Próprio Autor

A Figura 7.2 apresenta os sinais da Referência e da própria Corrente de Linha injetada obtidos através de simulações do Modelo P com o conversor conectado à rede na configuração Y(SSBC), operando nos modos Capacitivo e Indutivo. As simulações são feitas para os extremos da faixa de operação nominal definida para o conversor. A Tabela 7.1 apresenta a comparação dos erros de rastreamento medidos nas simulações (magnitude e fase na harmônica fundamental) com os obtidos a partir dos modelos definidos no Capítulo 5, considerando o impacto do atraso de cálculo dimensionado no Apêndice G.

Figura 7. 2 – Controle da Corrente Injetada – Corrente de Linha – Referência e Medida
Configuração Y(SSBC) – Modos Indutivo e Capacitivo – Simulação Modelo P



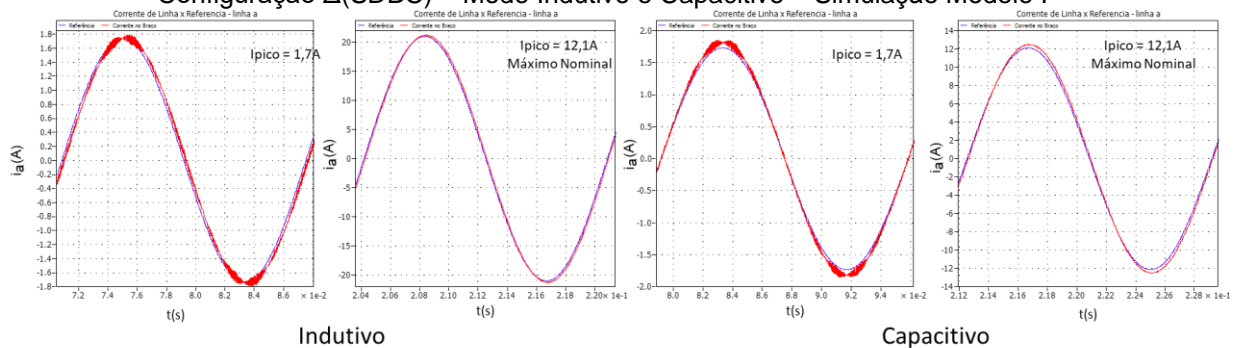
Fonte: Próprio Autor

Tabela 7. 1 - Controle da Corrente Injetada – Comparação dos Erros de Rastreamento Calculados e Medidos para a Configuração Y(SSBC)

Amplitude da Corrente	Erro de Rastreamento	Modo Indutivo		Modo Capacitivo	
		Calculado Modelo M	Medido Modelo P	Calculado Modelo M	Medido Modelo P
1,7A	Magnitude	0,66%	0,72%	5,00%	4,79%
	Fase	-3,62°	-3,57°	0,019°	0,001°
12,1A	Magnitude	2,47%	2,42%	3,09%	3,00%
	Fase	-2,02°	-2,01°	-1,50°	-1,50°

A Figura 7.3 apresenta a mesma comparação para o conversor conectado à rede na configuração Δ (SDBC). A Tabela 7.2 sumariza os erros de rastreamento obtidos.

Figura 7. 3 – Controle da Corrente Injetada – Corrente de Linha – Referência e Medida
Configuração Δ (SDBC) – Modo Indutivo e Capacitivo – Simulação Modelo P



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 2 – Controle da Corrente Injetada – Comparação dos Erros de Rastreamento Calculados e Medidos para a Configuração Δ (SDBC)

Amplitude da Corrente	Erro de Rastreamento	Modo Indutivo		Modo Capacitivo	
		Calculado Modelo M	Medido Modelo P	Calculado Modelo M	Medido Modelo P
1,7A	Magnitude	0,66%	0,72%	5,00%	4,82%
	Fase	-3,62°	-3,59°	0,019°	0,001°
12,1A	Magnitude	2,47%	2,43%	3,09%	3,02%
	Fase	-2,03°	-2,02°	-1,50°	-1,51°

A Figura 7.1 mostra que ambos os modelos apresentam comportamentos transitórios bastante próximos. As Figuras 7.2 e 7.3 em conjunto com os dados apresentados nas Tabelas 7.1 e 7.2 mostram que, no regime permanente, os erros de rastreamento (fase e magnitude) obtidos nas simulações com o Modelo P se assemelham aos calculados a partir do Modelo M³⁷.

No subitem 7.1.2 avaliações similares são realizadas para o controle das Tensões CC nos braços do conversor.

7.1.2. Malhas de Controle da Tensão CC nos Braços

A seguir avalia-se o comportamento transitório das malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC nos braços do conversor face a um degrau na Referência³⁸.

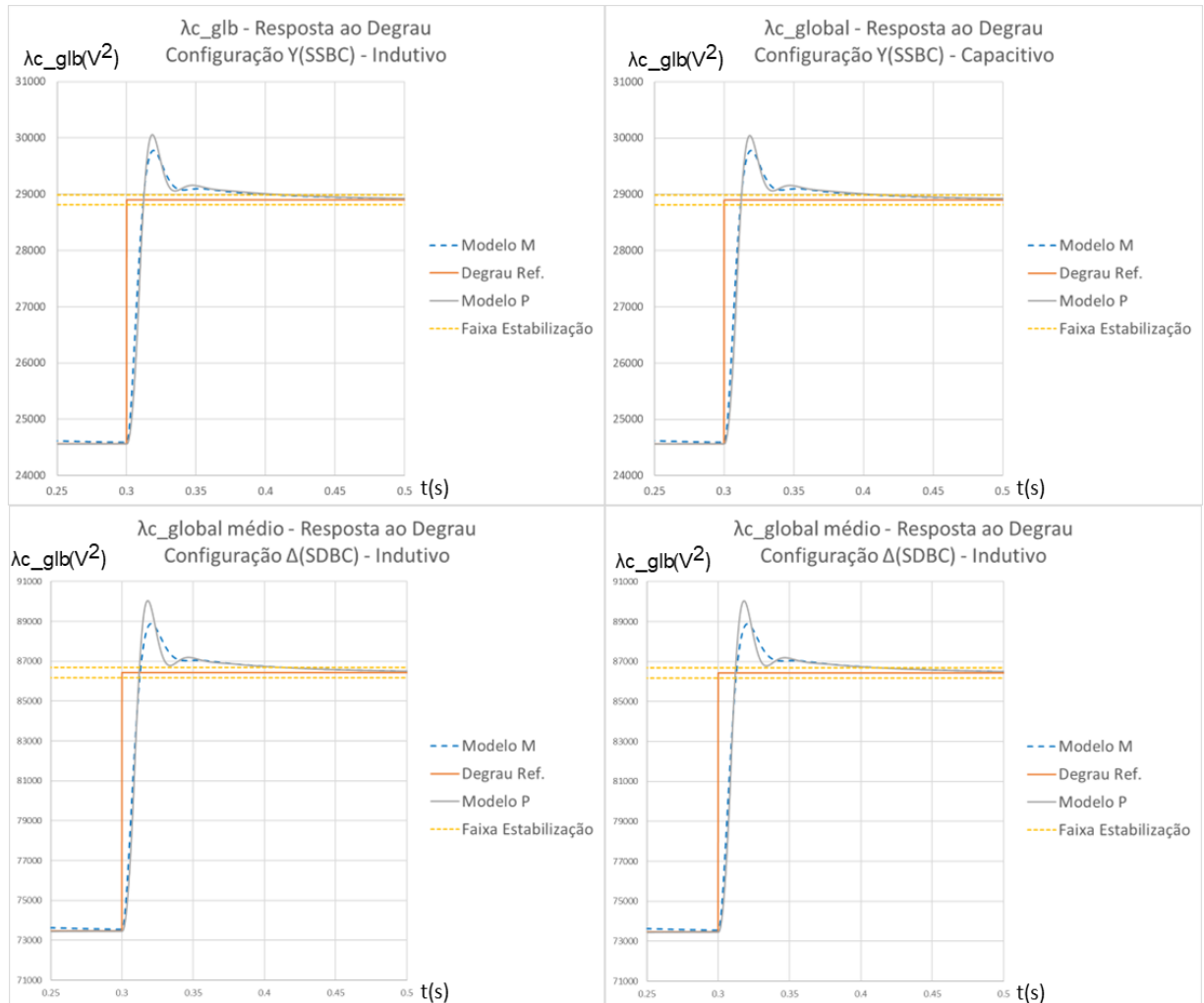
A Figura 7.4 apresenta a resposta da Malha de Regulação da Média Global, λ_{c_glb} , a um degrau em sua Referência. A simulação é executada com o conversor conectado à rede em Y(SSBC) e Δ (SDBC) operando nos modos Indutivo e Capacitivo³⁹.

³⁷ Os valores calculados (Modelo M) fazem uso da função de transferência apresentada em (6.13) da qual são derivadas fórmulas para o cálculo do módulo e fase da corrente no Apêndice G (vide fórmulas (G.2) a (G.5)).

³⁸ Importante lembrar que a grandeza efetivamente controlada é a soma dos quadrados das tensões CC dos submódulos de cada braço, λ_{c_x} . A média de λ_{c_x} dos três braços do conversor recebe a designação λ_{c_glb} .

³⁹ Nas simulações a amplitude da corrente de linha é mantida em 6,1A (ponto intermediário da faixa de corrente de linha escolhida para as simulações realizadas neste capítulo).

Figura 7. 4 – Controle da Tensão CC dos Braços – Regulação da Média Global λ_{c_glb}
Resposta ao Degrau na Referência – Conexões em Y(SSBC) e Δ (SDBC)



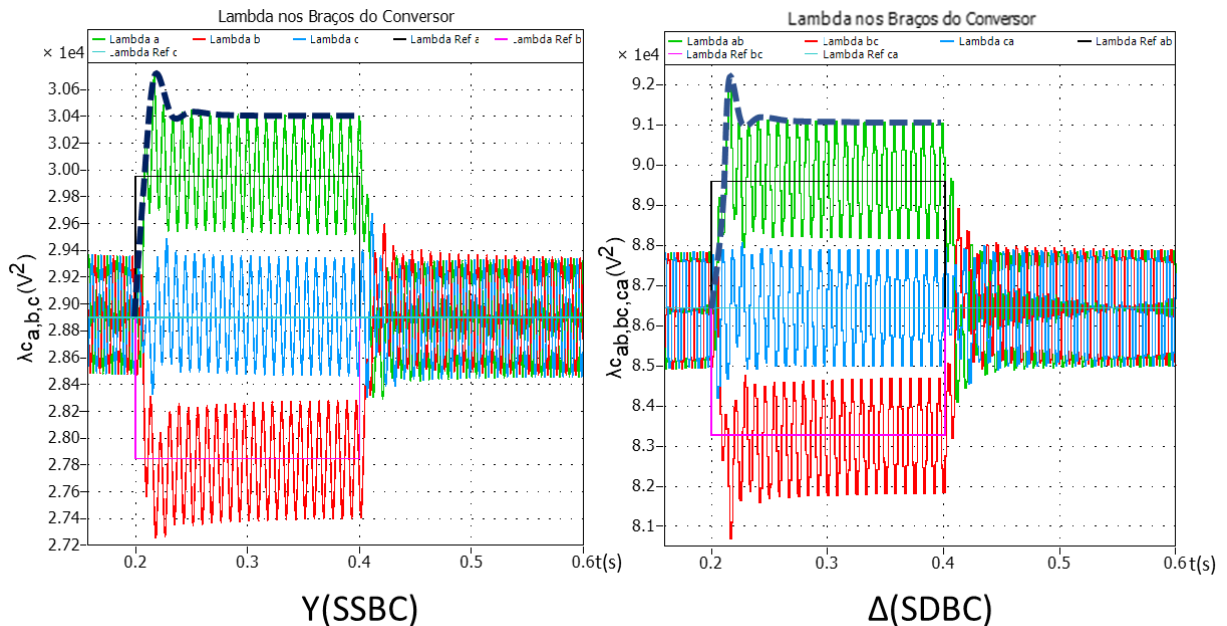
Fonte: Próprio Autor

A observação dos resultados das simulações mostra um comportamento razoavelmente similar entre os modelos tendo como base alguns critérios de desempenho como Tempo de Estabilização (2%) e Tempo de Subida. O caráter menos amortecido do Modelo P pode ser explicado pelo fato do Modelo M não considerar a dinâmica da Malha de Controle da Corrente.

A seguir avalia-se o comportamento das malhas de Balanceamento das tensões CC nos braços. A Figura 7.5 mostra o comportamento do λ_{c_x} de cada braço quando um degrau simétrico é aplicado às referências dos braços 'a' e 'c' do conversor (a referência do braço 'b', e a Média Global, não sofrem alteração). Nota-se que as malhas rastreiam a alteração nas referências adequadamente. Fica evidente a capacidade das malhas de realizar o balanceamento de λ_{c_x} dos braços. Inclusive,

nota-se que a envoltória (curva de linhas pontilhadas) traçada manualmente sobre o sinal de um dos braços em cada gráfico apresenta forma semelhante à da curva obtida na simulação no Modelo M (simplificado) no Capítulo 6 (vide Figura 6.14 – Resposta ao Degrau de Referência).

Figura 7. 5 – Controle da Tensão CC dos Braços – Balanceamento de λ_{c_x}
Degrau na Referência dos Braços 'a' e 'c' - Conexões em Y(SSBC) e Δ (SDBC) – Modelo P



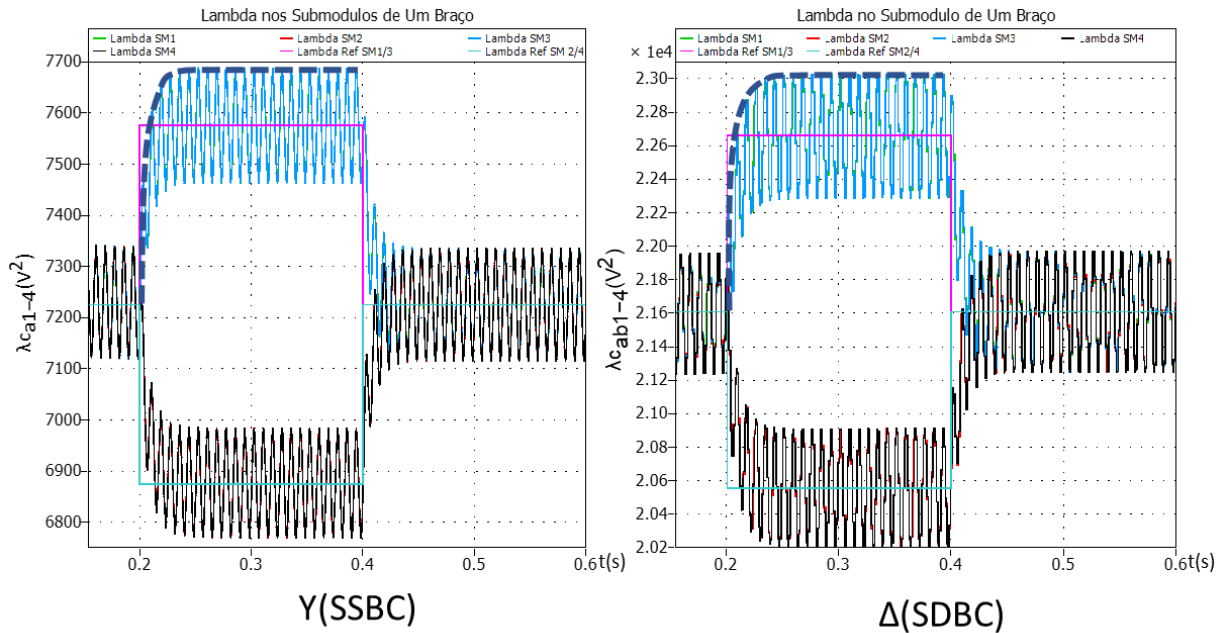
Fonte: Próprio autor

7.1.3. Malhas de Equalização Individual

A Figura 7.6 apresenta o comportamento, obtido através de simulação utilizando o Modelo P, das malhas de Equalização Individual de um dos braços do conversor conectado à rede nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). Um degrau é aplicado à Referência das malhas de controle de cada submódulo do braço. A Referência nos submódulos '1' e '3' (SM1 e SM3) é modificada por um degrau positivo e nos submódulos '2' e '4' (SM2 e SM4) por um degrau negativo de mesma magnitude⁴⁰. Como se observa, as malhas regulam as tensões de acordo com a alteração na Referência e mantém a equalização, tanto no degrau de subida quanto de descida. Nota-se também que a envoltória (curva de linhas pontilhadas) traçada manualmente sobre um dos sinais nos gráficos se assemelha à curva obtida na simulação fazendo uso do Modelo M (simplificado) no Capítulo 6 (vide Figura 6.17).

⁴⁰ Dessa forma, os degraus não afetam a tensão CC total do braço.

Figura 7. 6 – Controle das Tensões CC nos Submódulos – Equalização de $\lambda_{c_{xi}}$
Resposta ao Degrau - Conexões em Y(SSBC) e Δ (SDBC) – Modelo P



Fonte: Próprio autor

Neste item buscou-se comprovar a capacidade dos modelos simplificados (Modelos M), propostos para cada subsistema de controle do conversor (Corrente Injetada, Tensões CC dos Braços e nos Submódulos), de representar de forma fiel o comportamento de modelos que se aproximam mais de um sistema experimental real (Modelos P).

Considerando os resultados obtidos nas simulações realizadas pode-se constatar essa fidelidade se considerados alguns fatores:

- O projeto do conversor deve seguir especificações que permitam um comportamento linear (ou muito próximo disso) dentro da faixa de operação estipulada. O correto dimensionamento da tensão do Barramento CC é chave para evitar saturação do conversor que leva a distorções e, até mesmo, à perda de controle.
- O conhecimento das interações entre as malhas é importante. O projeto deve garantir que a interação seja fraca para que as simplificações adotadas realmente sejam aplicáveis. Nessa linha, a redução de erros de rastreamento de regime (magnitude e fase) e o ajuste para um comportamento mais amortecido no transitório da Malha de Corrente são importantes.

- O atraso de cálculo é um fator importante a ser considerado na modelagem e projeto da Malha de Corrente. Por outro lado, considerando a diferença expressiva na velocidade das malhas, desprezar a dinâmica dessa malha na modelagem e projeto das malhas de Regulação da Média e Balanceamento e Equalização Individual das tensões CC, é uma abordagem que traz simplificação sem prejudicar o desempenho do sistema.

A seguir o foco das simulações volta-se para a avaliação do desempenho das arquiteturas estudadas em situações específicas, comparando-o, inclusive, ao desempenho de outros arranjos descritos na literatura de referência.

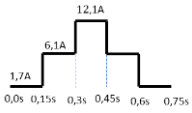
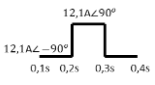
7.2. Avaliação do Desempenho da Arquitetura Proposta

7.2.1. Degrau de Amplitude e Fase na Corrente Injetada – Sequência Positiva

Neste item avalia-se a capacidade do conversor de responder a variações abruptas de amplitude e fase na Referência de Corrente. As simulações são realizadas com o conversor conectado à rede nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC), operando nos modos Capacitivo e Indutivo. Tanto o comportamento da Malha de Corrente como o das malhas de Regulação da Média Global, Balanceamento e Equalização Individual das tensões CC são verificados.

A Tabela 7.3 resume as condições em que são as duas simulações.

Tabela 7.3 – Degraus de Amplitude e Fase Utilizados nas Simulações

Simulação	Subitem	Variação na Referência de Corrente de Linha	Modo de Operação	Conexão à Rede
Degrau de Amplitude	a		Indutivo e Capacitivo	Y(SSBC) e Δ (SDBC)
Degrau de Fase	b		N/A	Y(SSBC) e Δ (SDBC)

a. Degrau de Amplitude

A Figura 7.7 apresenta o comportamento do conversor conectado em Y(SSBC) frente aos degraus de amplitude na Referência de Corrente operando nos modos Indutivo e Capacitivo. Os gráficos da metade superior mostram o comportamento da Malha de Corrente. É possível verificar o desempenho em regime (a) e no transitório (b). Note que os gráficos superpõem os sinais da Referência e da própria corrente injetada.

Os gráficos da metade inferior mostram o comportamento das malhas de Controle das Tensões CC apresentando o comportamento da Média Global (c) e das tensões individuais nos capacitores (d) de cada submódulo⁴¹.

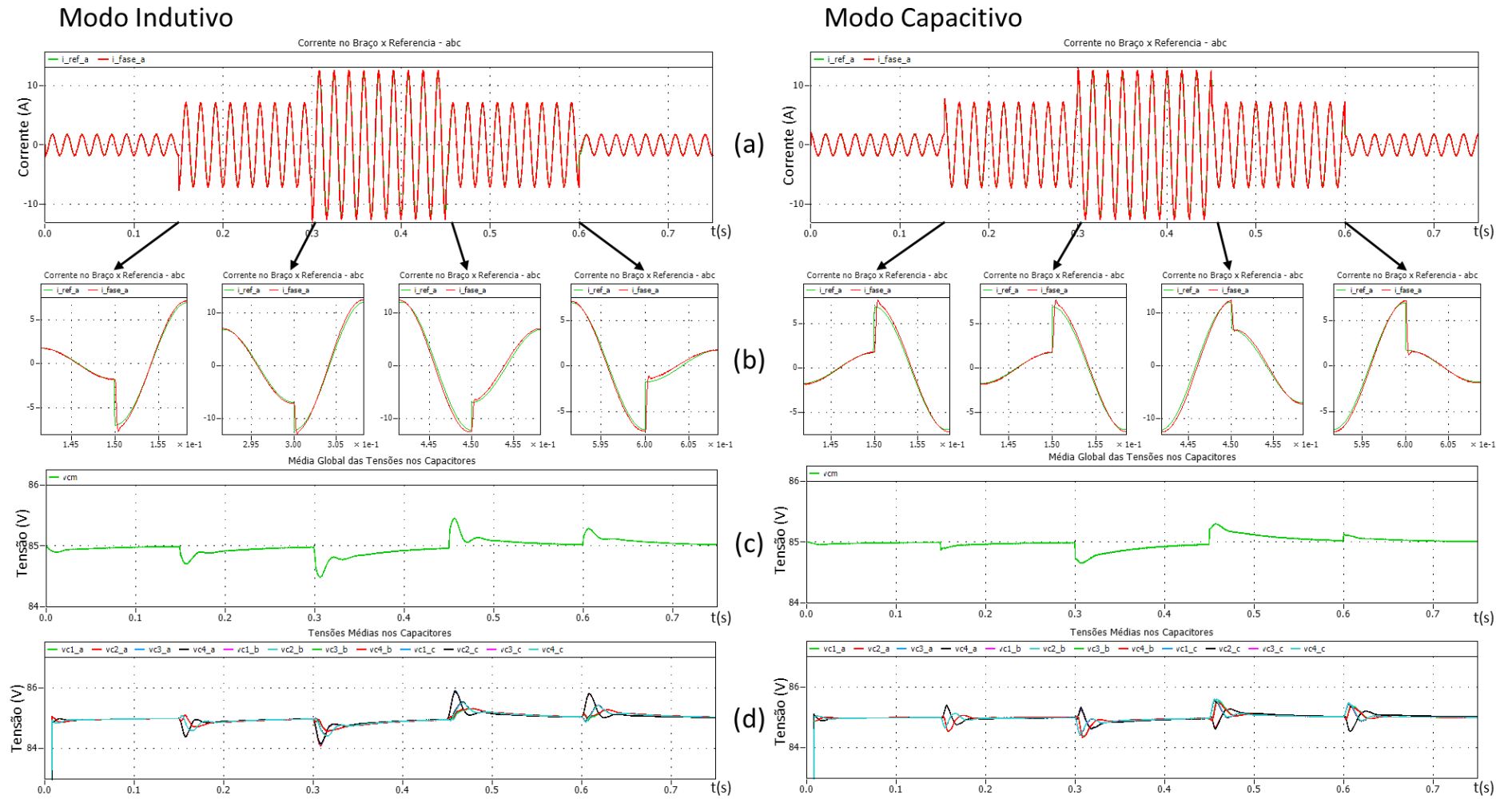
Como se observa, a Malha de Corrente garante o rastreamento da Referência com transitórios discretos. Pode-se dizer o mesmo das malhas de Controle das tensões CC (Regulação da Média Global, Balanceamento e Equalização Individual). A tensão

⁴¹ Para facilitar a visualização o *ripple* presente nos sinais foi filtrado utilizando filtro Passa-Baixas do tipo Média Móvel (janela de 8,33ms).

CC média é mantida, em regime, no nível determinado pela Referência (85V). A perturbação causada pelos degraus na corrente produz transitórios bastante discretos (<1% da tensão média) e os tempos de estabilização estão em linha com o esperado (vide figuras 6.14 e 7.4).

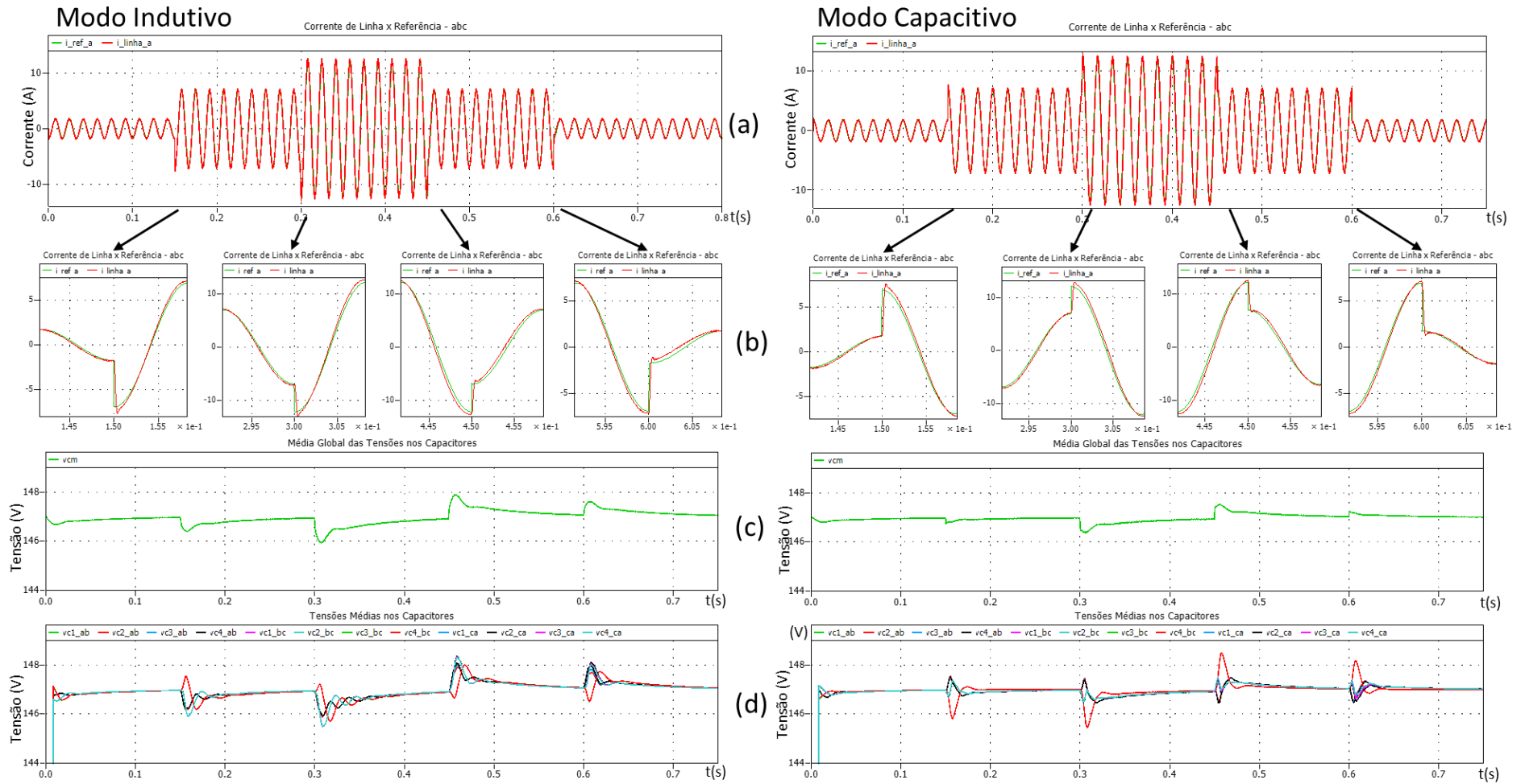
A Figura 7.8 apresenta o mesmo quadro para o conversor conectado em Δ (SDBC). O comportamento observado é bastante similar.

Figura 7.7 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC – Comportamento Frente a Degraus de Amplitude na Referência de Corrente – Y(SSBC)



Fonte: Próprio autor

Figura 7. 8 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC – Comportamento Frente a Degraus de Amplitude na Referência de Corrente – Δ (SDBC)

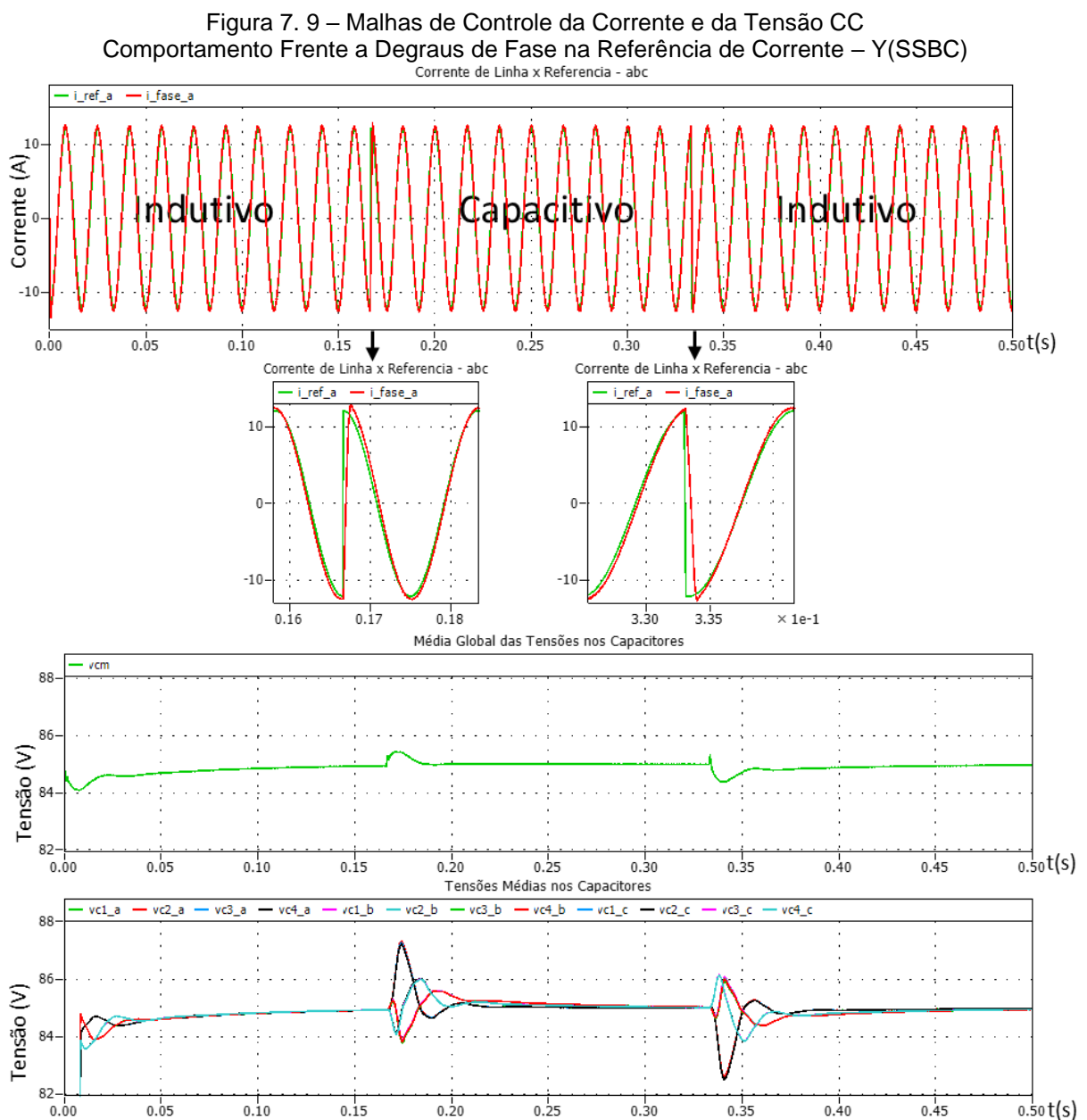


Fonte: Próprio autor

b. Degrau de Fase

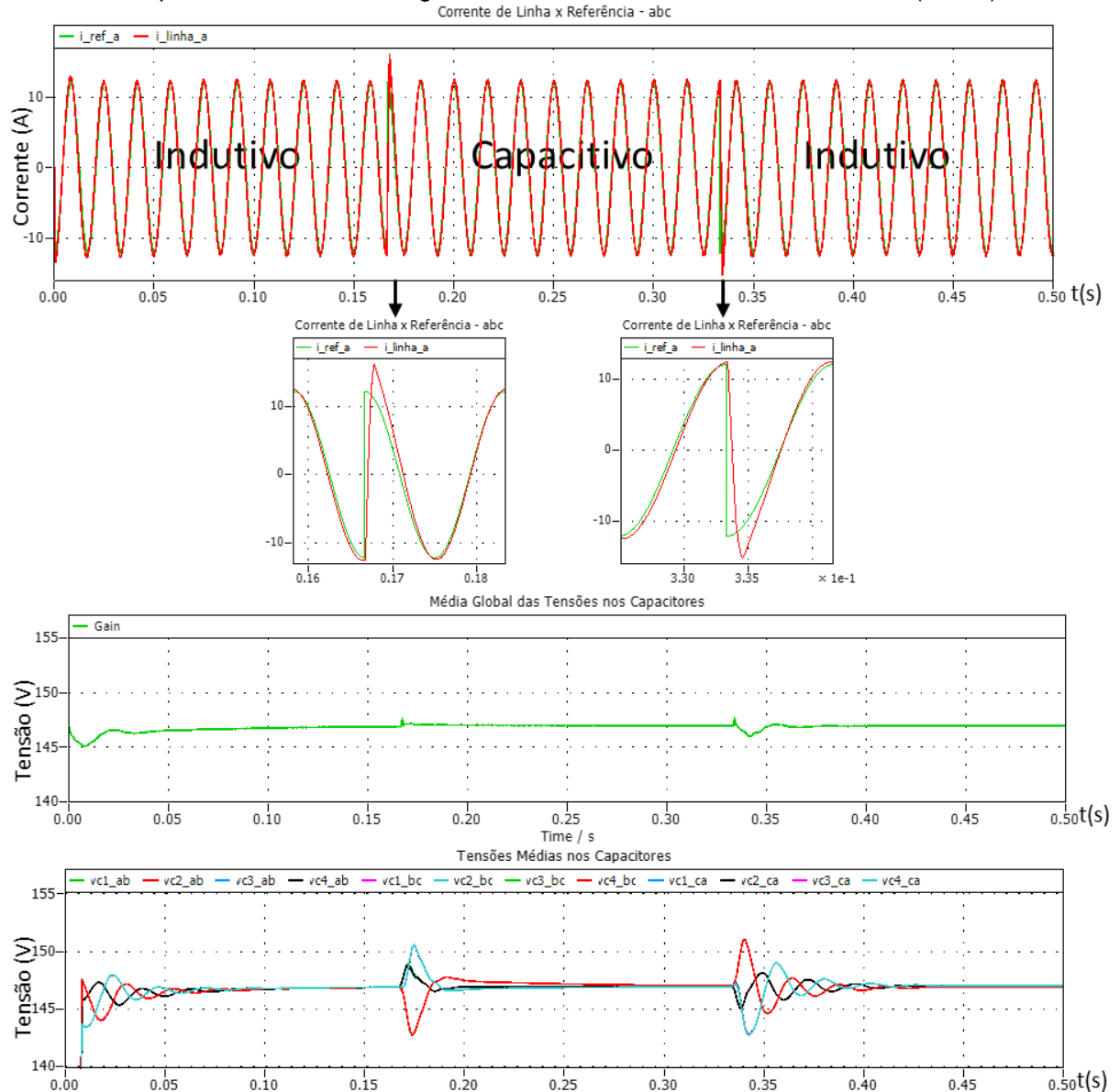
Nesta simulação avalia-se o comportamento do conversor em inversões de fase na Referência de Corrente (Indutivo – Capacitivo – Indutivo) com a amplitude da corrente mantida no valor máximo da faixa de operação definida (vide Tabela 7.3).

As Figuras 7.9 e 7.10 apresentam o comportamento do conversor conectado em Y(SSBC) e Δ (SDBC) respectivamente. O mesmo conjunto de formas de ondas coletadas no subitem (a) é apresentado aqui. Observa-se um comportamento bastante similar ao observado com degraus de amplitude.



Fonte: Próprio autor

Figura 7. 10 – Malhas de Controle da Corrente e da Tensão CC
Comportamento Frente a Degraus de Fase na Referência de Corrente – Δ (SDBC)



Fonte: Próprio autor

As simulações executadas até esse ponto mostram que a arquitetura estudada, independentemente da configuração de conexão à rede, tem um comportamento estável e previsível quando operando sem desbalanços (ausência de sequência negativa na tensão da rede ou na corrente injetada).

A interação entre as malhas de controle da corrente e da tensão CC nos braços é relativamente fraca e não impacta o comportamento do conversor a ponto de invalidar simplificações e premissas assumidas na modelagem realizada no Capítulo 5.

A interação entre as malhas é percebida principalmente no comportamento das tensões CC. Variações na corrente causam perturbações, tanto na regulação da Média Global como também no balanceamento das tensões CC nos braços. Note que o comportamento no transitório segue a resposta das malhas à Perturbação prevista no Capítulo 6 (vide item 6.2.2.b, Figura 6.14).

7.2.2. Operação Desbalanceada

Até a etapa anterior avaliou-se o comportamento do sistema operando exclusivamente em um ambiente balanceado (presença exclusiva de sequência positiva). Este item explora o desempenho do conversor na presença de sequência negativa na tensão da rede e na corrente injetada.

Com o sistema conectado em $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$, as seguintes condições são simuladas:

Com a tensão da rede equilibrada:

- No item 'a', para a configuração $Y(SSBC)$, e no item 'b', para a configuração $\Delta(SDBC)$, injeta-se corrente desbalanceada com percentuais crescentes de sequência negativa em relação a uma componente fixa de sequência positiva.
- No item 'c', para a configuração $Y(SSBC)$, injeta-se corrente desbalanceada com variação de fase entre as componentes de sequência negativa e positiva.
- No item 'd', para ambas as configurações, injeta-se apenas corrente de sequência negativa (ausência de sequência positiva).

Com a corrente injetada equilibrada:

- No item 'a', para a configuração $\Delta(SDBC)$, e no item 'b', para a configuração $Y(SSBC)$, impõem-se percentuais crescentes de sequência negativa na tensão da rede em relação a uma componente fixa de sequência positiva.
- No item 'c', para a configuração $\Delta(SDBC)$, impõem-se desbalanços na tensão com variação de fase entre as componentes de sequência negativa e positiva.

- No item 'e', ambas as configurações são submetidas a condições em que há a presença concomitante de sequência positiva e sequência negativa na tensão da rede e na corrente injetada.

Nos casos simulados procura-se verificar a capacidade do sistema de rastrear a Referência de Corrente (avaliação de erros de rastreamento e distorção harmônica), regular as tensões CC dos braços do conversor (média, balanceamento e limite de saturação do conversor) e apontar características que definem o comportamento de cada configuração, Y(SSBC) e Δ (SDBC) quando operando em sistemas desbalanceados.

a. Simulações Baseadas no Artigo de Referência [19]

O artigo de referência [19] simula duas situações que comparam a capacidade das configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) realizarem o balanceamento das tensões CC nos braços do conversor, operando em condições desbalanceadas (presença de sequência negativa na corrente ou tensão nos braços do conversor), através da respectiva injeção de tensão ou corrente de sequência zero. A configuração Y(SSBC) é submetida a condições de desequilíbrio na corrente injetada e a configuração Δ (SDBC) a desbalanceamentos na tensão da rede.

Configuração Y(SSBC) - Tensão da Rede Equilibrada – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

A Tabela 7.4 apresenta as condições em que a simulação é realizada.

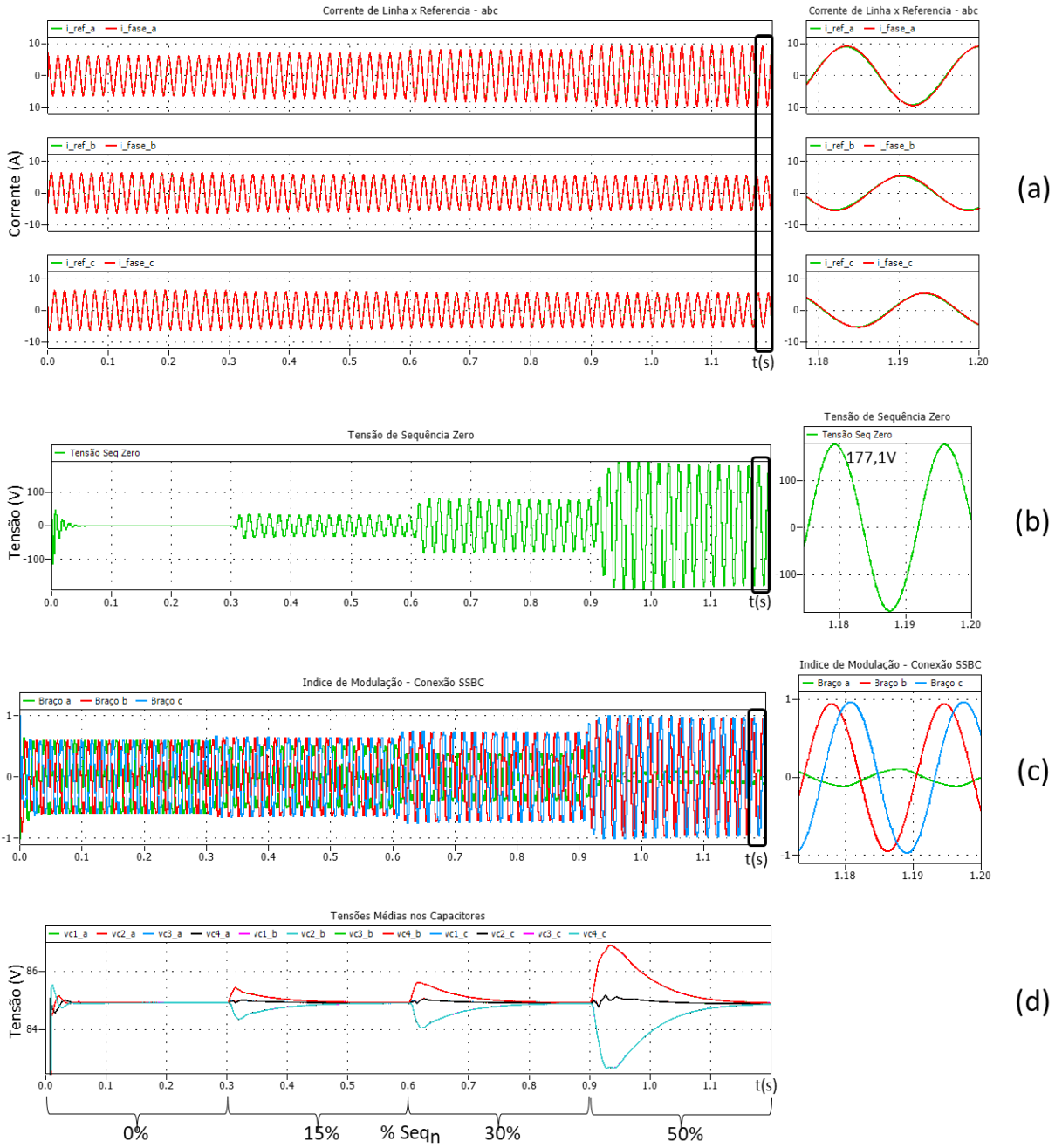
Tabela 7. 4 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

Corrente de Linha	Amplitude(pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima)
	Fase Seq_p	90°
	Amplitude Seq_n	0%, 15%, 30%, 50% da Amplitude de Seq _p
	Fase Seq_n *	90°
Tensão de Fase	Amplitude (pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°

* A operação no modo capacitivo com as componentes de Seq_p e Seq_n possuindo a mesma fase configura a condição de maior excursão do sinal de modulação PWM produzido pela malha de corrente e, portanto, permite determinar a mínima tensão no Barramento CC dos braços necessária para evitar saturação do conversor [19].

A Figura 7.11 e a Tabela 7.5 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 11 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente



Fonte: Próprio autor

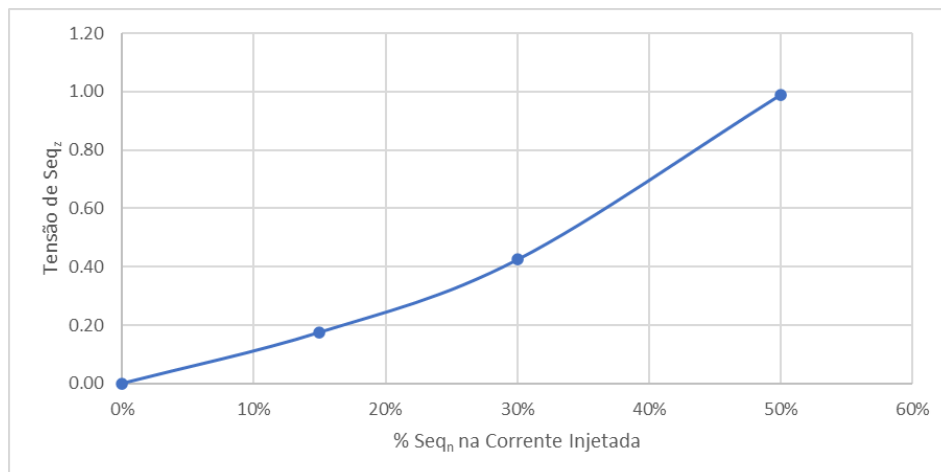
Tabela 7. 5 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Injeção de Percentuais Crescentes de Sequência Negativa (valores obtidos em simulação)

% Seq. Negativa	0%	15%	30%	50%
THD Corrente (máx.)	0,53%	0,53%	0,62%	0,59%
 Erro Fase Corrente (máx.)	2,5°	2,6°	2,8°	3,2°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,2%	3,5%	3,8%	4,5%
Amplitude Tensão Seq_z	-	31,5V	76,2V	177,1V
Indice Modulação PWM (máx.)	0,59	0,64	0,73	0,97

A Figura 7.11(a) apresenta a corrente de linha injetada pelo conversor. Ambos os sinais, de Referência e da própria corrente injetada, estão superpostos (vide detalhe ampliado à direita). A Tabela 7.5 apresenta a progressão do nível de distorção harmônica e dos erros de rastreamento (para a harmônica fundamental) na medida que o desbalanceamento cresce. Como se observa, o sistema mantém todos os indicadores dentro de limites bastante aceitáveis.

A Figura 7.11(b) mostra o sinal de tensão de Seq_z produzido pela Malha de Balanceamento. Observa-se na Figura 7.12 que a amplitude do sinal se eleva numa taxa crescente na medida que o percentual de Seq_n aumenta.

Figura 7. 12 – Y(SSBC) - Crescimento da Tensão de Seq. Zero x % de Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores normalizados com base na amplitude (pico) da Tensão de Fase da Rede – 179,6V)



Fonte: Próprio autor

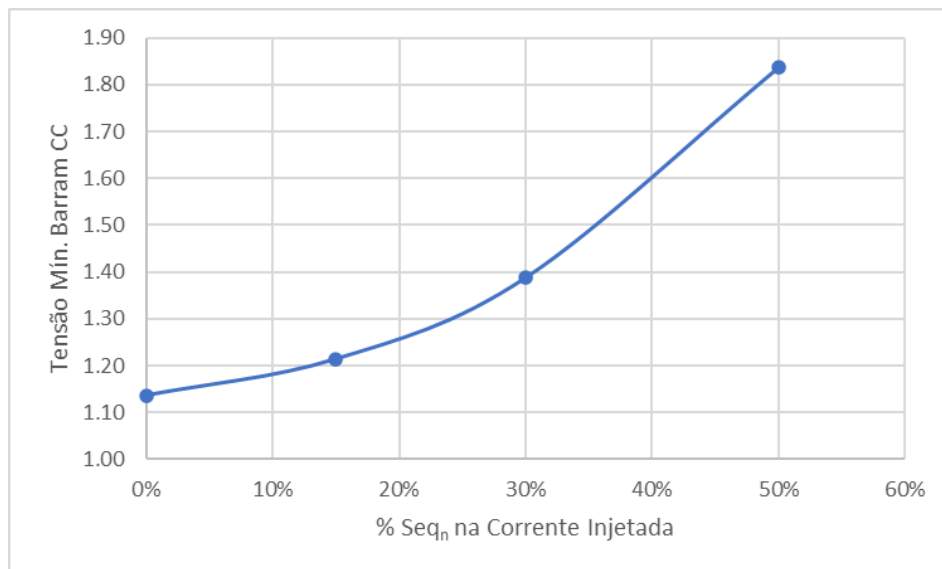
A Tabela 7.5 mostra que, na condição de 50% de Seq_n, em regime, a amplitude do sinal, de 177,1V, aproxima-se da amplitude da tensão de fase da rede, 179,6V. Comparado ao artigo de referência [19] os resultados coincidem. Normalizada pela base utilizada naquele trabalho (valor eficaz da tensão de linha – 220V) a amplitude

do sinal de Seq_z é de 0,8081pu, praticamente idêntica à indicada no artigo (0,8147pu - vide Figura 10(b) do artigo).

A Figura 7.11(c) apresenta o Índice de Modulação PWM. Observa-se que o índice chega a 0,97 na condição de 50% de Seq_n . Considerando a tensão do Barramento CC utilizada, de 340V, vê-se que, para esse percentual de Seq_n o Barramento CC precisa operar com uma tensão igual ou superior a 1,8 vezes a tensão de fase da rede. A comparação com o artigo de referência [19] revela valores equivalentes.

A Figura 7.13 evidencia a elevação da tensão mínima necessária no Barramento CC observada na simulação. Vê-se que, a partir do ponto de 0% de Seq_n , a tensão mínima cresce seguindo o mesmo padrão de crescimento da amplitude do sinal de Seq_z mostrado na Figura 7.12. É possível concluir que, na condição simulada, a tensão de Seq_z está em fase com a tensão da rede (Fase 'a') o que praticamente dobra a tensão produzida pelo braço e, por conseguinte, a tensão mínima requerida do Barramento CC para evitar saturação do conversor.

Figura 7. 13 –Y(SSBC)– Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na Corrente Injetada
(valores normalizados com base na amplitude (pico) da Tensão de Fase da Rede – 179,6V)



Fonte: Próprio autor

A Figura 7.11(d) mostra as tensões CC nos capacitores dos 12 submódulos que compõe os braços do conversor. O *ripple* de 120Hz presente nas tensões foi filtrado nas figuras para facilitar a visualização do comportamento do valor médio. Os desbalanços de potência provocados pelos degraus de injeção de Seq_n provocam as variações observadas nas tensões CC dos braços. É possível notar, também, que as

variações transitórias são simétricas, produzem soma nula, não alteram a média global das tensões, e são compensadas pela injeção de Seq_z .

Observa-se que o sistema, dentro dos limites de desbalanceamento imposto à corrente, garante o balanceamento das tensões nos braços e a equalização das tensões dos submódulos de cada braço. O uso de controladores PI na Malha de Balanceamento garante que não haja erro de regulação em regime.

O comportamento no transitório (sobre-elevação, tempo de estabilização) está em linha com o previsto no Capítulo 6 e deixa evidente que a Malha de Balanceamento está atuando na perturbação de potência causada pelos degraus na corrente (vide 6.2.2.b, Figura 6.14).

Na comparação com o artigo de referência [19] o que chama a atenção é a velocidade do sistema de controle nele apresentado, com transitórios praticamente imperceptíveis. Tal desempenho (do artigo de referência) provavelmente se explica pelo uso de controladores P e a aparente não utilização de filtros nas malhas de controle da Tensão CC. Contudo, o documento não oferece detalhes de como a arquitetura de controle garante a supressão dos efeitos do *ripple* de 120Hz e de erros de regulação e balanceamento ao fazer uso desta abordagem.

Configuração Δ (SSBC) – Corrente Injetada Equilibrada – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

A Tabela 7.6 apresenta as condições de simulação.

Tabela 7.6 – Parâmetros da Simulação – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

Tensão de Fase	Amplitude(pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°
	Amplitude Seq_n	0%, 15%, 30%, 50% da Amplitude de Seq_p
	Fase Seq_n^*	60°
Corrente de Linha	Amplitude (pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima)
	Fase Seq_p	90°

* Na conexão em Δ , para que se produza a condição de maior amplitude na tensão nos braços do conversor a componente de Seq_n da tensão de fase (Fase-Neutro) da rede deve estar 60° adiantada em relação à sua componente de Seq_p .

A Figura 7.14 e a Tabela 7.7 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 14 – Desempenho do Conversor – Δ (SDBC) – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão

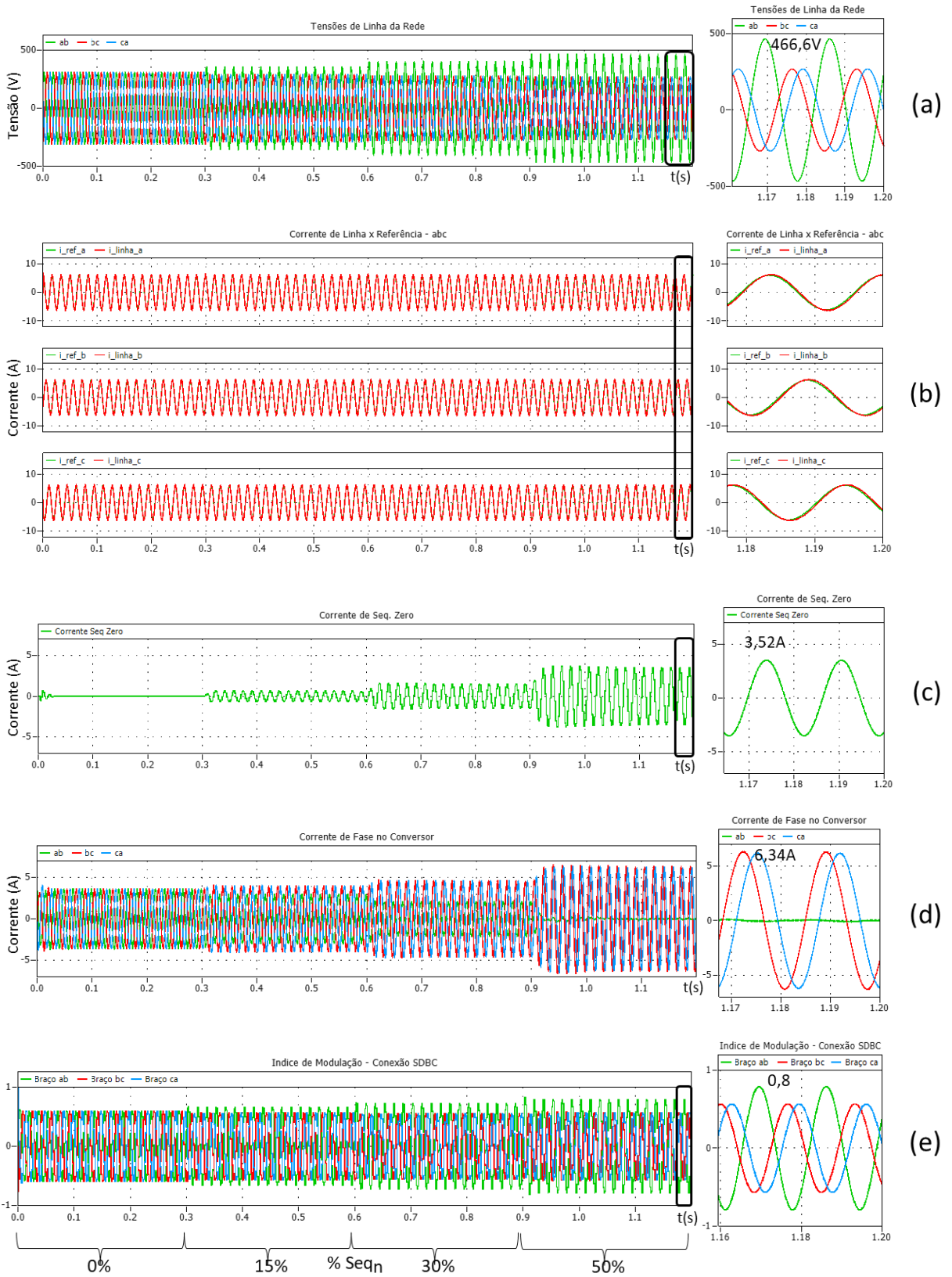
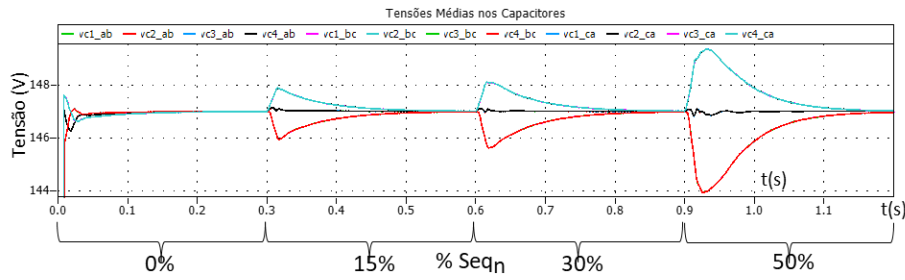


Figura 7.14 continuação



(f)

Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 7 – Desempenho do Conversor Δ (SSBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede (valores obtidos em simulação)

% Seq Negativa	0%	15%	30%	50%
THD Corrente (máx.)	0,53%	0,55%	0,56%	0,54%
Erro Fase Corrente (máx.)	3,4°	3,6°	4,0°	5,8°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,3%	3,5%	3,7%	4,0%
Ampl. Corrente Seq _z	-	0,62A	1,50A	3,52A
Ampl. Corrente nos Braços (máx.)	3,63A	4,00A	4,60A	6,34A
Indice Modulação PWM (máx.)	0,59	0,66	0,72	0,79

A Figura 7.14(a) apresenta as tensões de linha da rede (Fase-Fase) com o desbalanço crescente. O detalhe à direita mostra que, na condição de 50% de Seq_n, a amplitude da Fase 'ab' é máxima ($466,6V = 311,1V$ (Ampl. Seq_p) + $155,5V$ (Ampl. Seq_n)).

A Figura 7.14(b) apresenta a corrente de linha injetada pelo conversor. O sistema, da mesma forma que na conexão Y(SSBC), demonstra boa capacidade de rastreamento da Referência de Corrente independentemente do nível de desbalanceamento introduzido.

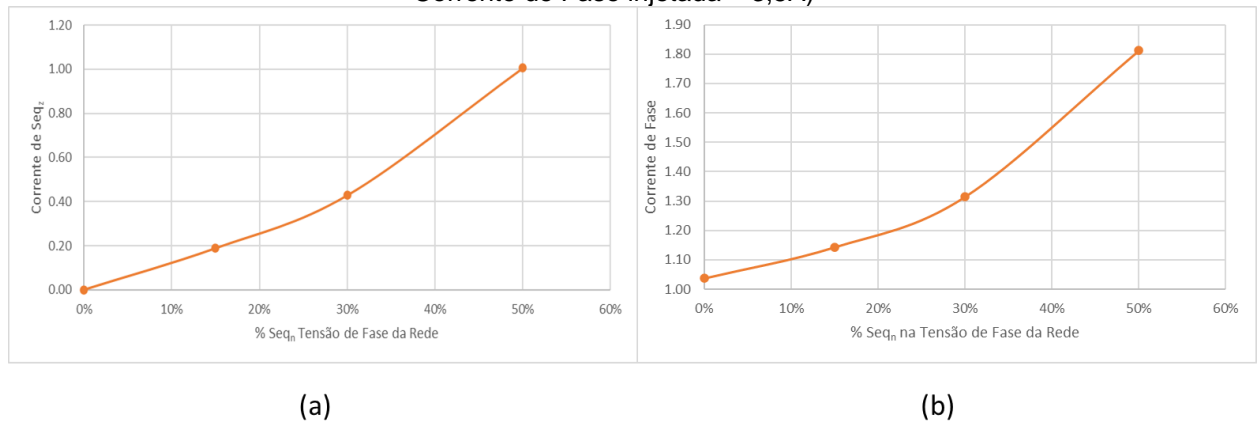
No entanto, é importante notar que a corrente de Seq_z, apresentada na Figura 7.15(c), eleva a corrente nos braços do conversor e ocupa boa parte da faixa de operação (vide Tabela 7.7 e Figura 7.14(d)). Observa-se que, para injetar 50% (6,1A) da Máxima Corrente Nominal de Linha (12,1A), a corrente nos braços do conversor atinge 80% da sua máxima capacidade (7,0A).

A Figura 7.15 mostra o crescimento da amplitude da corrente de Seq_z (a) e da máxima amplitude da corrente nos braços (b) do conversor em função do percentual de Seq_n na tensão de fase da rede. Verifica-se um comportamento semelhante ao observado

na tensão de Seq_z na simulação anterior. Vê-se aqui mais um exemplo da dualidade entre as configurações Y e Δ .

Figura 7. 15 – Δ (SDBC) – Correntes de Seq Zero e de Fase (nos braços do conversor) x Percentual de Sequência Negativa na Tensão de Fase da Rede

(valores normalizados com base na amplitude da componente de Sequência Positiva da Corrente de Fase injetada – 3,5A)



Fonte: Próprio autor

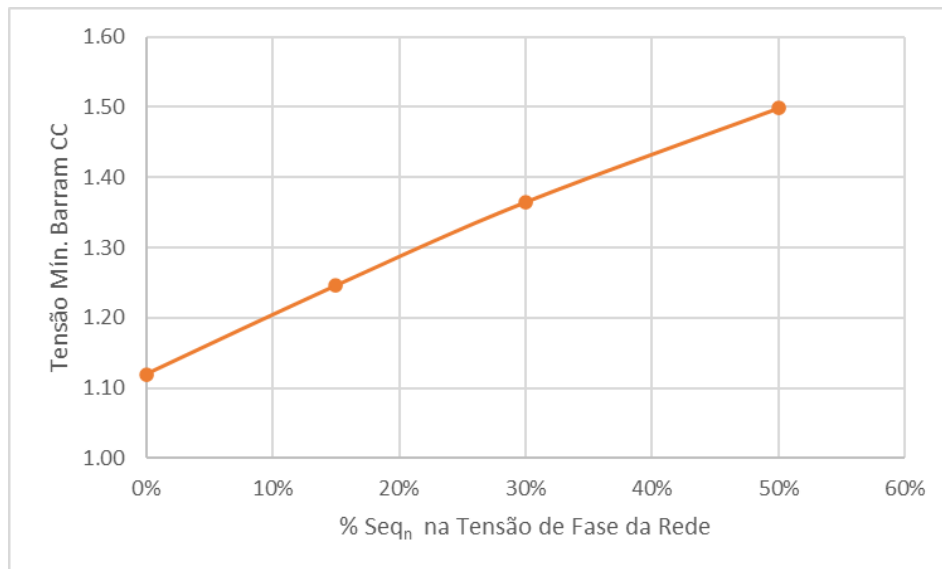
Ainda sobre o sinal de Seq_z obtido na simulação, comparando-o com o apresentado no artigo de referência [19] nota-se que os valores obtidos são consideravelmente maiores. Usando a base de normalização do documento (valor eficaz da componente de Seq_p da corrente de fase), na condição de 50% de Seq_n , a corrente obtida na simulação é de 1,43pu (3,52A/2,47A) contra 0,473pu reportado (vide Figura 9(c) do artigo). Essa diferença se explica pelo fato da simulação realizada no artigo não ter imposto a defasagem entre as componentes de Seq_p e Seq_n das tensões de fase (Fase-Neutro) necessária para produzir a máxima excursão da tensão nos braços do conversor (vide nota na Tabela 7.6).

Voltando a atenção para o lado CC do conversor, a tensão mínima necessária no Barramento CC deve crescer para compensar o aumento da queda de tensão no circuito de acoplamento motivado pela injeção de corrente de Seq_z e, também, pela própria elevação da tensão entre fases da rede.

A Figura 7.14(d) apresenta o Índice de Modulação PWM. Na condição de 50% de Seq_n o índice máximo atinge 0,8. Considerando que o Barramento CC opera com 588V, conclui-se que, para essa proporção de Seq_n o Barramento CC precisa operar com uma tensão igual ou superior a 1,51 vezes a tensão de linha da rede (311,1V). A Figura 7.16 mostra o crescimento da Mínima Tensão do Barramento CC em função do

percentual de Seq_n na tensão de fase da rede. Nota-se que, na faixa simulada, o crescimento é praticamente linear. Isso se explica pelo fato da maior contribuição para o aumento da tensão no Barramento CC vir do aumento da tensão de linha da rede. O incremento acelerado observado na corrente tem impacto limitado pois afeta apenas a queda no circuito de acoplamento que tem impedância relativamente baixa.

Figura 7. 16 – Δ (SDBC) Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na Tensão de Fase da Rede
(valores normalizados com base na amplitude da Tensão de Linha da Rede – 311,1V)



Fonte: Próprio autor

O sistema de controle é capaz de regular a Média Global bem como balancear as tensões CC dos braços. Da mesma forma, realiza a equalização individual das tensões CC dos submódulos de cada braço do conversor, independentemente do nível de desbalanceamento e em linha com o previsto no Capítulo 6. A Figura 7.14(f) apresenta as tensões nos capacitores dos 12 submódulos (o *ripple* de 120Hz foi filtrado para facilitar a visualização do nível médio das tensões).

Na comparação com o artigo de referência [19], permanecem os comentários feitos anteriormente e vale notar um detalhe na Figura 9(d) do artigo onde fica evidente um pequeno, mas visível, erro de balanceamento na condição de 50% de Seq_n . Esse fato reforça o comentário feito anteriormente sobre a necessidade de se entender como a arquitetura proposta pela referência trata a filtragem do *ripple* de 120Hz e a eliminação de erros de regulação fazendo uso exclusivo de controladores proporcionais.

b. Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Submetidas a Desbalanços na Tensão da Rede e Corrente nos Braços Respectivamente

Neste subitem simulam-se as condições inversas às que foram simuladas no subitem anterior, ou seja, a configuração Y(SSBC) é submetida a desbalanços na tensão e a Δ (SDBC) na corrente nos braços do conversor.

Configuração Y(SSBC) – Corrente Injetada Equilibrada – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

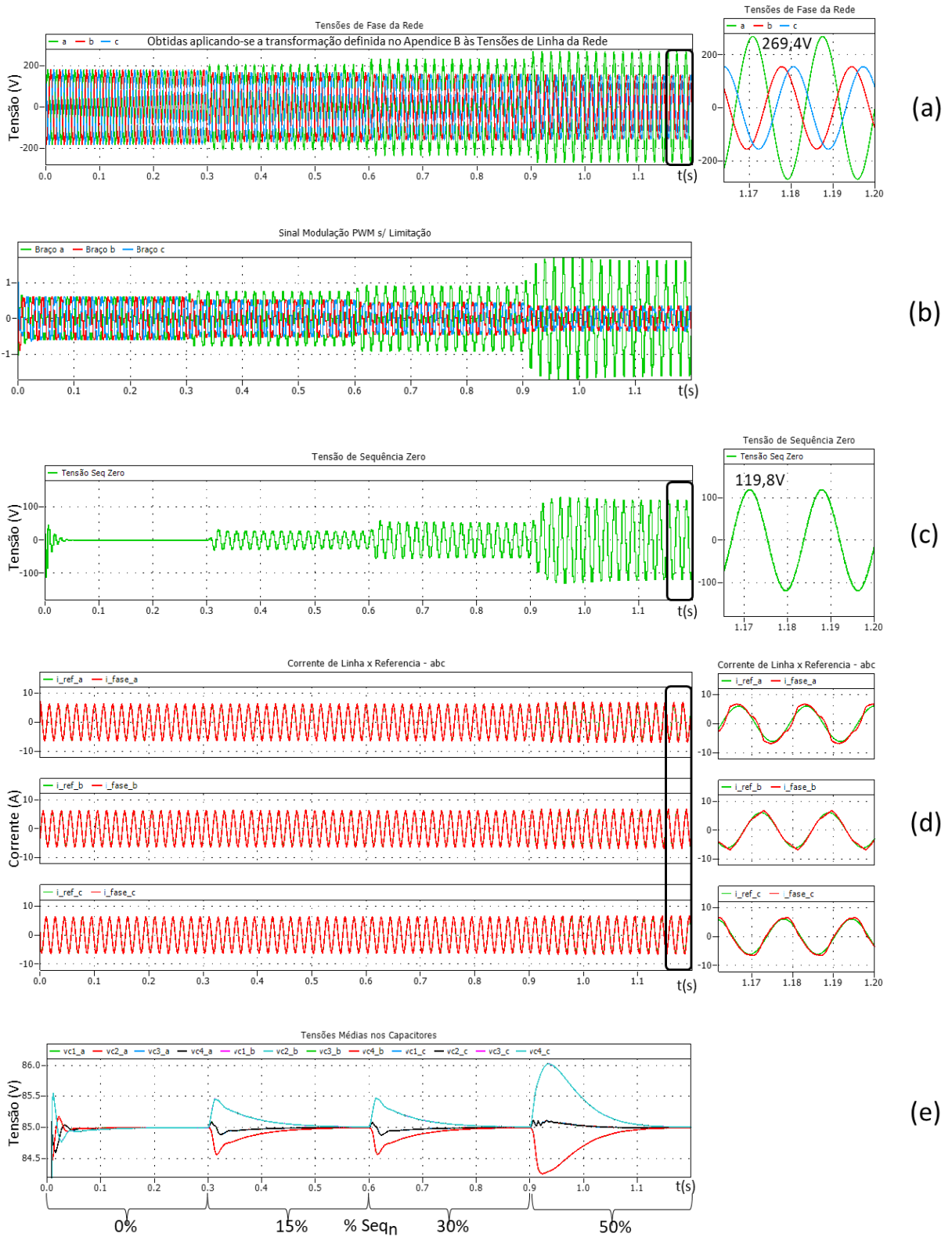
A Tabela 7.8 apresenta as condições de simulação.

Tabela 7. 8 – Parâmetros da Simulação – Tensão da Rede com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

Tensão de Fase	Amplitude(pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°
	Amplitude Seq_n	0%, 15%, 30%, 50% da Amplitude de Seq _p
	Fase Seq_n	0°
Corrente de Linha	Amplitude (pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima)
	Fase Seq_p	90°

A Figura 7.17 e a Tabela 7.9 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 17 – Desempenho do Conversor – Y(SSBC) – Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 9 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Tensão da Rede (valores obtidos em simulação)

% Seq Negativa	0%	15%	30%	50%
THD Corrente (máx.)	0,52%	0,53%	0,57%	14%
Erro Fase Corrente (máx.)	2,5°	2,6°	2,7°	3,4°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,3%	3,3%	3,4%	12%
Ampl. Tensão Seq _z	-	26,9V	53,8V	119,8V
Índice Modulação PWM (máx.)	0,59	0,75	0,90	>1

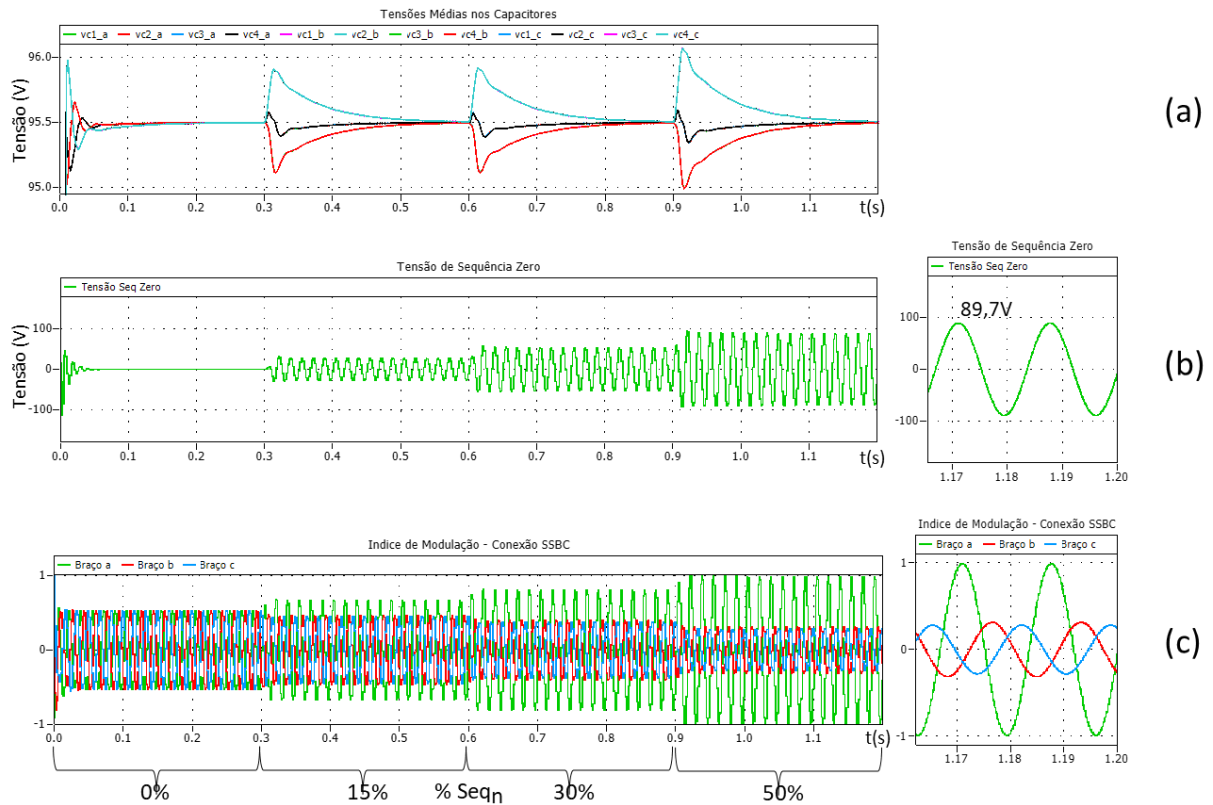
A observação dos sinais apresentados mostra que o sistema opera dentro da normalidade até a condição de 30% de Seq_n. Nota-se, no entanto, que nessa condição, o índice de modulação já está próximo de 0,9 e, portanto, perto da saturação do conversor.

A Figura 7.17(a) mostra que, na condição de 50% de Seq_n, a amplitude da tensão na Fase 'a' da rede sobe a 269,4V. Nesta condição, o Barramento CC encontra-se subdimensionado e o conversor satura. Isso fica evidente na Figura 7.17(b) que mostra o Índice de Modulação ultrapassando o limite máximo, na Figura 7.17(c) que apresenta a Corrente Injetada distorcida e na Figura 7.17(d) indicando um crescimento exagerado do sinal de Seq_z.

Fazendo o cálculo da tensão de Seq_z necessária⁴², levando em conta as especificações do conversor e as condições de operação, chega-se a uma amplitude de ~89,1V e uma tensão mínima para o Barramento CC de ~382V (~2,12 vezes a tensão de fase da rede). Refazendo a simulação com a tensão do Barramento CC ajustada, observa-se que o conversor volta à operação linear. A Figura 7.18 apresenta a tensão CC dos capacitores (a) ajustada para 95,5V (a tensão do Barramento CC passa a 382V), o sinal de Seq_z (b) e o Índice de Modulação (c) obtidos após o ajuste.

⁴² Faz-se uso de um processo iterativo que calcula os desbalanços de potência causado nas fases e, a partir deles, busca-se a amplitude e fase do sinal de sequência zero que multiplicado pela corrente (Y) ou pela tensão (Δ) da rede produz a compensação dos desbalanços calculados inicialmente para cada fase.

Figura 7. 18 – Sinal de Sequência Zero e do Índice de Modulação Após Ajuste na Tensão do Barramento CC



Fonte: Próprio autor

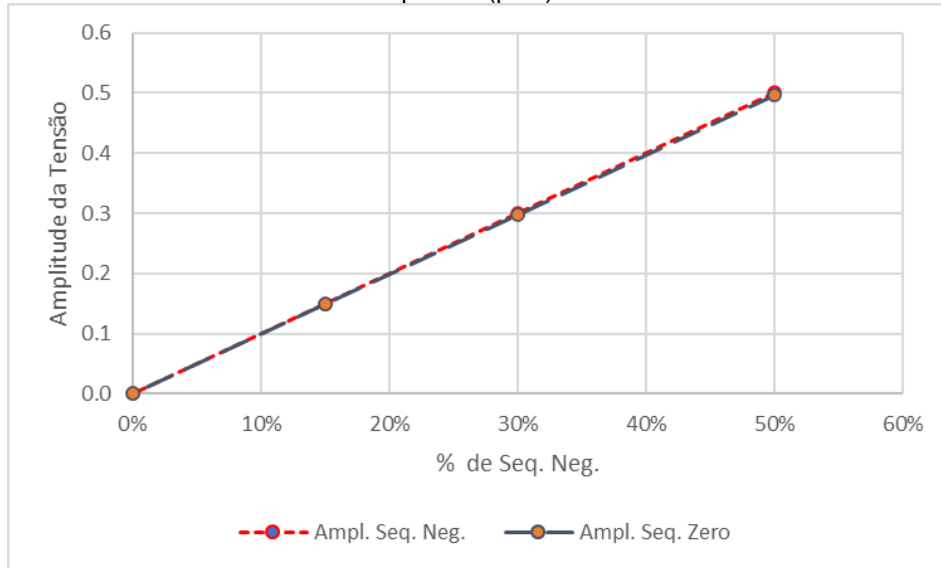
A Tabela 7.10 apresenta as amplitudes das componentes de Seq_p e Seq_n da tensão da rede e da Seq_z observada na simulação. A Figura 7.19 evidencia os seguintes aspectos:

- A amplitude da tensão de Seq_z imposta cresce linearmente com o percentual de Seq_n presente na tensão da rede.
- Na condição simulada, com as componentes de Seq_p e Seq_n da tensão da rede em fase (condição que exige máxima excursão da tensão nos braços do conversor), a relação entre a amplitude da tensão de Seq_z e da componente de Seq_n é unitária.

Tabela 7. 10 –Y(SSBC)– Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero (valores obtidos em simulação)

% Seq Negativa	0%	15%	30%	50%
Ampl. Seq_p da Tensão da Rede	179,6V	179,6V	179,6V	179,6V
Ampl. Seq_n da Tensão da Rede	0,0V	26,9V	53,9V	89,8V
Ampl. Seq_z Obtida na Simulação	0,0A	26,9V	53,8V	89,7V

Figura 7. 19 –Y(SSBC)– Proporção Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero
(valores normalizados com base na amplitude (pico) da Tensão de Fase da Rede – 179,6V)



Fonte: Próprio autor

Configuração Δ (SDBC) - Tensão da Rede Equilibrada – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

A Tabela 7.11 apresenta as condições de simulação.

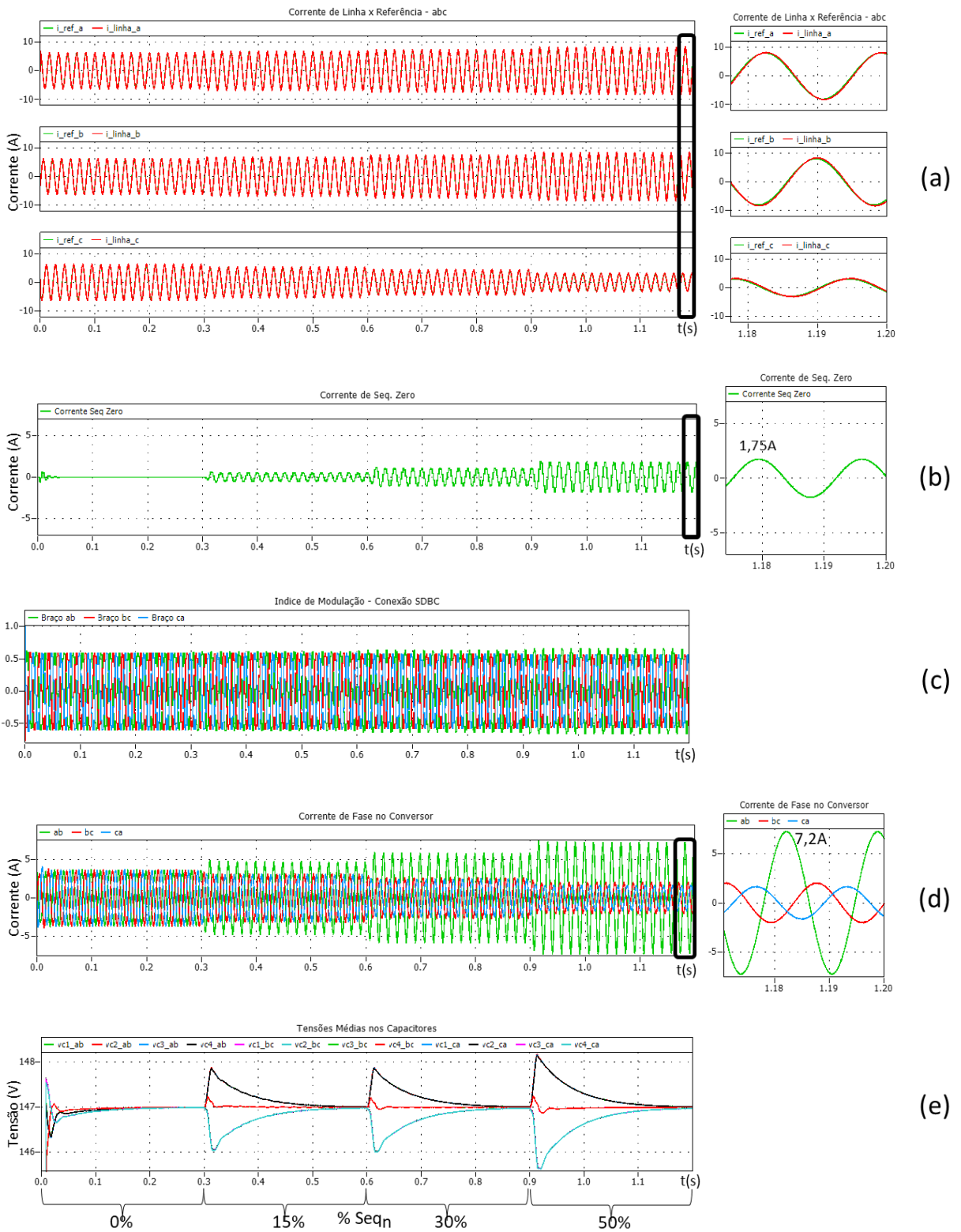
Tabela 7. 11 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada com Percentuais Crescentes de Sequência Negativa

Corrente de Linha	Amplitude(pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima)
	Fase Seq_p	90°
	Amplitude Seq_n	0%, 15%, 30%, 50% da Amplitude de Seq _p
	Fase Seq_n *	150°
Tensão de Fase	Amplitude (pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°

* Na conexão em Δ , operando no modo capacitivo, para que se produza a condição de maior excursão da corrente nos braços do conversor a componente de Seq_n deve estar 60° adiantada em relação à componente de Seq_p da Corrente de Linha.

A Figura 7.20 e a Tabela 7.12 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 20 – Desempenho do Conversor Δ (SDBC)– Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 12 – Desempenho do Conversor – Δ (SDBC) – Injeção de Percentuais Crescentes de Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)

% Seq Negativa	0%	15%	30%	50%
THD Corrente (máx.)	0,53%	0,57%	0,60%	0,64%
 Erro Fase Corrente (máx.)	3,4°	3,7°	4,1°	4,7°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,3%	3,8%	4,6%	6,1%
Ampl. Corrente Seq_z	-	0,53A	1,05A	1,75A
Ampl. Corrente de Fase (máx.)	3,63A	4,70A	5,8A	7,2A
Índice Modulação PWM (máx.)	0,59	0,60	0,61	0,62

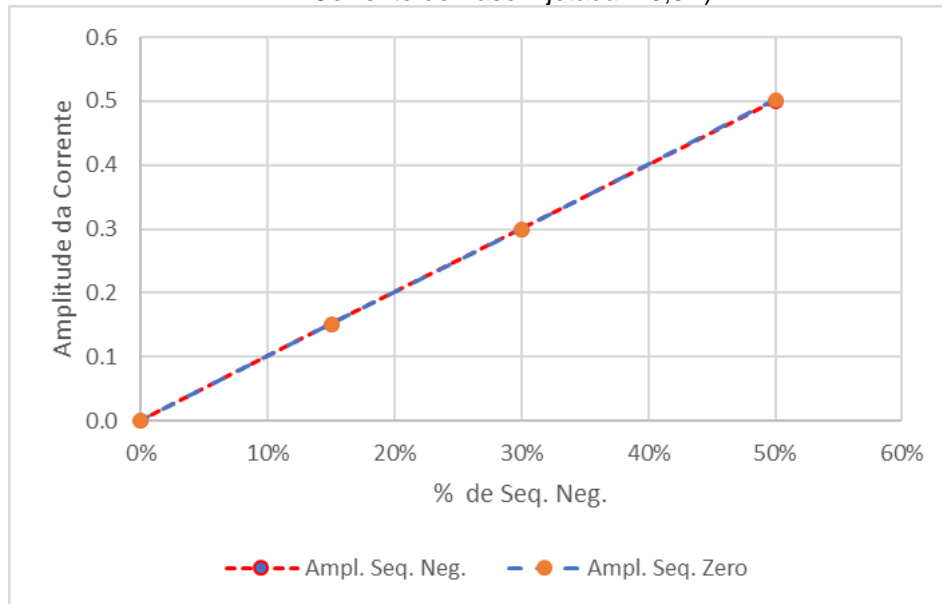
As Figuras 7.20(a) e 7.20(e) confirmam o funcionamento geral do sistema dentro da normalidade independentemente do nível desbalanceamento imposto. Tanto a injeção de corrente quanto a regulação e balanceamento das tensões CC mostram desempenho de acordo com o esperado.

A Tabela 7.13 lista as amplitudes das componentes de Seq_p, Seq_n da Referência de Corrente e da corrente de Seq_z observadas na simulação. A amplitude da corrente de Seq_z, apresentada na Figura 7.20(b), cresce linearmente com o aumento do percentual de Seq_n presente na corrente injetada numa proporção unitária como mostra a Figura 7.21. Nas condições simuladas (componentes de Seq_p, Seq_n da corrente nos braços do conversor têm a mesma fase) a componente de Seq_z apresenta a mesma fase da corrente em um dos braços do conversor, no caso, o braço 'ab'. Nessa condição, a corrente de Seq_z ocupa 25% da faixa de operação do conversor. Posto de outra forma, usando a condição de 50% de Seq_n como exemplo, para injetar uma corrente de 5,25A (3,5A Seq_p + 1,75A Seq_n), a corrente em um dos braços do conversor vai a ~7A (3,5A Seq_p + 1,75A Seq_n + 1,75A Seq_z) como mostra a Figura 7.20(d).

Tabela 7. 13 – Δ (SDBC) – Relação Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero (valores obtidos em simulação)

% Seq Negativa	0%	15%	30%	50%
Ampl. Seq_p da Ref. de Corrente	3,5A	3,5A	3,5A	3,5A
Ampl. Seq_n da Ref. de Corrente	0,0A	0,53A	1,05A	1,75A
Ampl. Seq_z Obtida na Simulação	0,0A	0,53A	1,05A	1,75A

Figura 7. 21 – Δ (SDBC) – Proporção Entre as Amplitudes das Componentes de Sequência Negativa e Sequência Zero
(valores normalizados com base na amplitude da componente de Sequência Positiva da Corrente de Fase injetada – 3,5A)



Fonte: Próprio autor

Voltando-se para a tensão produzida nos braços do conversor e para a tensão mínima no Barramento CC, nota-se que, dada a impedância relativamente baixa do circuito de acoplamento o impacto do crescimento da corrente na tensão produzida nos braços do conversor é pequeno. A observação do comportamento do Índice de Modulação, na Figura 7.20(c), e dos valores listados na Tabela 7.12 confirmam a constatação. Assim, a tensão mínima no Barramento CC é muito pouco impactada.

A partir das simulações realizadas nos subitens 'a' e 'b' algumas conclusões podem ser tiradas:

- Na configuração Y(SSBC) o maior impacto causado pela presença de sequência negativa na tensão da rede ou na corrente injetada é percebido na elevação da tensão mínima do Barramento CC na medida que se aumenta a proporção Seq_n/Seq_p . A responsável pela elevação é a tensão de sequência zero produzida pela Malha de Balanceamento.
- A configuração Y(SSBC) é mais sensível à presença de sequência negativa na corrente injetada. A tensão de sequência zero produzida pela malha de Balanceamento cresce de forma acelerada com o aumento da proporção de Seq_n/Seq_p e tende ao infinito na medida que se aproxima de 1 [19]. A sensibilidade é menor quando a sequência negativa está presente na tensão da

rede. Nesse caso o crescimento é proporcional ao percentual de Seq_n presente na tensão.

- Na configuração Δ (SDBC), em linha com a dualidade existente entre as configurações, a maior sensibilidade ao aumento da proporção Seq_n/Seq_p , presente na tensão da rede ou na corrente injetada, está no crescimento da corrente nos braços do conversor. O crescimento se dá com a injeção de corrente de sequência zero produzida pela Malha de Balanceamento.
- A configuração Δ (SDBC), é mais sensível à presença de sequência negativa na tensão da rede. A corrente de sequência zero produzida pelas malhas de balanceamento cresce bruscamente com a elevação da proporção de Seq_n/Seq_p e tende ao infinito na medida que se aproxima de 1 [19]. A sensibilidade é menor quando a sequência negativa está presente na corrente injetada. Nesse caso o crescimento é proporcional ao percentual de sequência negativa presente na corrente.
- O crescimento acelerado da amplitude do sinal de sequência zero estabelece um limite prático de aproximadamente 50% de sequência negativa na corrente injetada, na configuração Y(SSBC), ou na tensão da rede, na configuração Δ (SDBC). Nessa condição, na configuração Y(SSBC), o Barramento CC precisa operar com uma tensão superior a ~2 vezes a amplitude da tensão de fase da rede (Fase-Neutro) e, na configuração Δ (SDBC), os circuitos de chaveamento precisam suportar ~2 vezes a corrente máxima a ser injetada.

A Tabela 7.14 sumariza os valores de tensão no Barramento CC e Corrente obtidos nas simulações realizadas. Fica evidente o impacto maior na tensão do Barramento CC na configuração Y(SSBC) e na Corrente nos braços do conversor na configuração Δ (SDBC).

Tabela 7. 14 – Relação entre as amplitudes da componente de Sequência Negativa e Sequência Zero (valores obtidos em simulação)

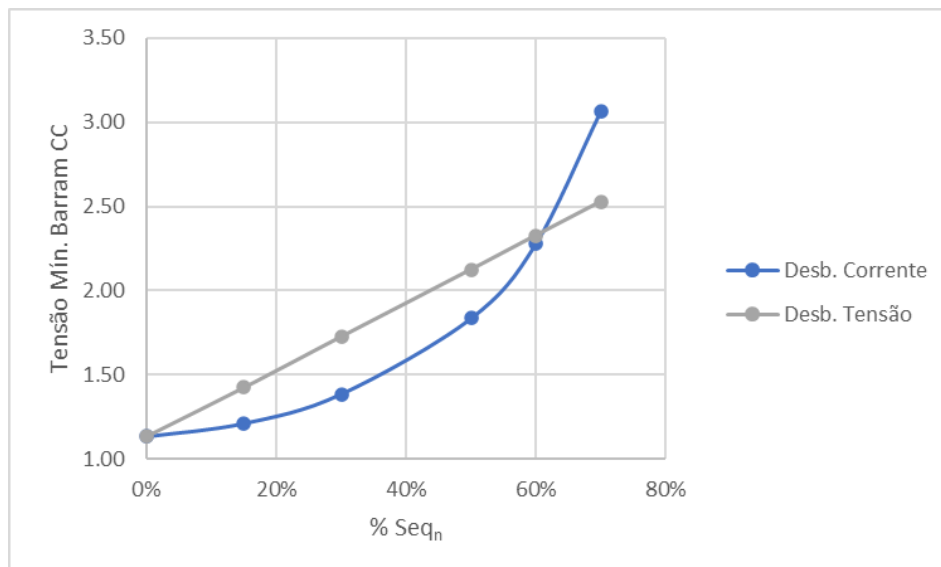
	Y(SSBC)		Δ (SDBC)	
	Abs	Pu ^{*1}	Abs	Pu ^{*2}
Desbalanço (50% Seq_n) na Corrente Injetada				
Tensão Mín. Barramento CC	329,8V	1,84	382,2V	1,23
Corrente Máxima nos Braços do Conversor	9,42A	1,03	7,20A	2,06
Desbalanço (50% Seq_n) na Tensão da Rede				
Tensão Mín. Barramento CC	381,9V	2,12	466,6V	1,50
Corrente Máxima nos Braços do Conversor	6,26A	0,68	6,34A	1,81

*1 Bases: $V=V_{rede}(Fase)=179,6V$; $I=I_{ref}(Linha)=9,15A(Y)$

*2 Bases: $V=V_{rede}(Linha)=311,1V$; $I=I_{ref}(Fase)=3,5A(\Delta)$

A comparação dos resultados obtidos nas simulações para a configuração Y(SSBC) pode levar à conclusão de que essa configuração seria mais sensível a desbalanços na tensão da rede visto que a tensão mínima no Barramento CC é maior nessa condição. É fato que, para baixos índices de sequência negativa, desbalanços na tensão da rede exigem níveis de tensão CC pouco maiores. Contudo, com o crescimento exponencial da tensão de sequência zero imposta pela Malha de Balanceamento a situação se inverte para percentuais maiores que 50% de Seq_n. O gráfico apresentado na Figura 7.22 evidencia este fato.

Figura 7. 22 – Y(SSBC) - Tensão Mínima no Barramento CC x % de Sequência Negativa na Tensão da Rede e Corrente Injetada (valores normalizados com base na Amplitude da Tensão de Fase da Rede – 179,6V)



Fonte: Próprio autor

c. Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Operando com Defasagem Entre as Componentes de Sequência Positiva e Negativa da Corrente Injetada ou da Tensão da Rede

Nos subitens anteriores, as simulações foram realizadas com as componentes de sequência positiva e negativa (da corrente injetada ou da tensão da rede) ostentando a mesma fase. Esta abordagem permitiu avaliar o comportamento das arquiteturas estudadas em condições de “pior caso” e confirmar limites mínimos para a tensão do Barramento CC e Corrente Nominal Máxima do conversor.

Neste subitem as arquiteturas são levadas a operar com a relação Seq_n/Seq_p fixada em 50% (máximo utilizado nas simulações anteriores) porém com variação da defasagem entre as duas componentes.

O objetivo é, mais uma vez, verificar a capacidade das arquiteturas de rastrear adequadamente a Referência de Corrente e realizar a regulação e balanceamento das tensões CC e, também, avaliar o efeito da diferença de fase na magnitude do sinal de sequência zero produzido pela malha de Balanceamento.

Na configuração Y(SSBC) o desbalanço será imposto à corrente injetada. Na configuração Δ (SDBC) o desbalanço estará na tensão da rede.

Configuração Y(SSBC) - Tensão da Rede Equilibrada – Componentes de Seq. Positiva e Negativa da Corrente Defasadas

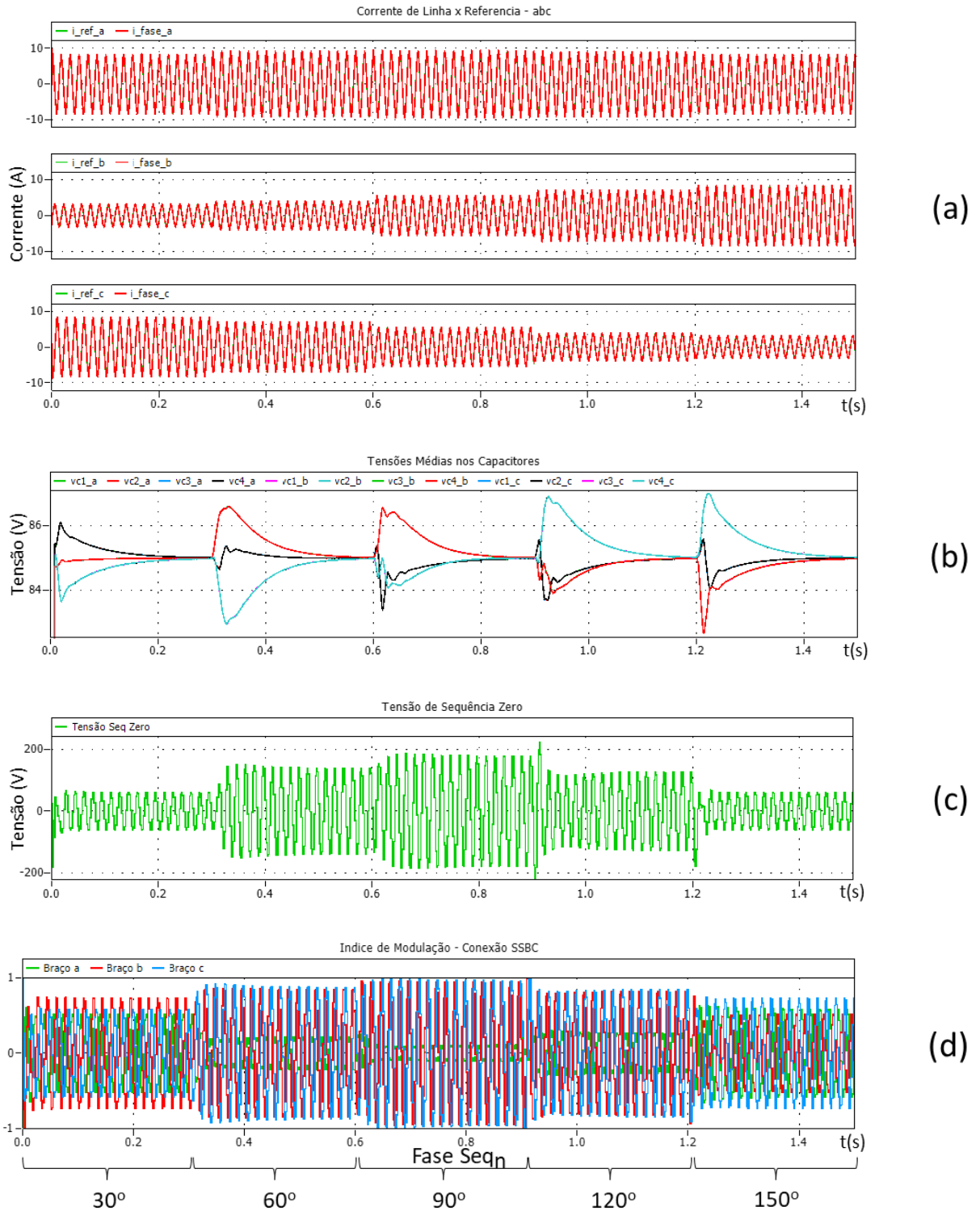
A Tabela 7.15 apresenta as condições em que a simulação é realizada.

Tabela 7. 15 – Parâmetros da Simulação – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Sequência Positiva na Corrente Injetada

Corrente de Linha	Amplitude(pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima)
	Fase Seq_p	90°
	Amplitude Seq_n	50% da Amplitude de Seq_p
	Fase Seq_n	30°, 60°, 90° , 120°, 150°
Tensão de Fase	Amplitude (pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°

A Figura 7.23 e a Tabela 7.16 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 23 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 16 – Desempenho do Conversor Y(SSBC) – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)

Fase da Componente de Seq _n	30°	60°	90°	120°	150°
THD Corrente (máx.)	0,79%	0,76%	0,59%	0,68%	0,79%
Erro Fase Corrente (máx.)	4,2°	3,3°	3,2°	3,8°	4,2°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,9%	5,0%	4,6%	4,0%	3,9%
Ampl. Tensão Seq _z	60,3V	137,5V	176,9V	126,6V	60,2V
Indice Modulação PWM (máx.)	0,73	0,88	0,97	0,85	0,73

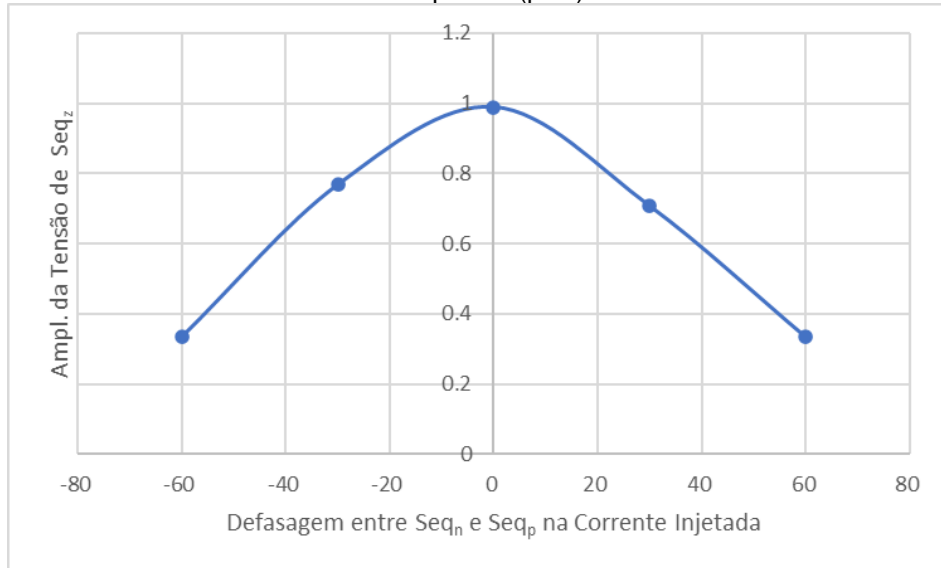
As figuras 7.23(a) e (b) confirmam a capacidade do sistema de rastrear a referência de corrente (vide dados de THD e Erro de Rastreamento na Tabela 7.16) e de garantir a regulação da média e o balanceamento das tensões CC nos braços do conversor e seus respectivos submódulos.

As figuras 7.23(c) e (d) apresentam o comportamento da tensão de Seq_z imposta pela malha de balanceamento e o Índice de Modulação PWM resultante. Como se observa, quando a defasagem entre as componentes de Seq_p e Seq_n é nula (Fase da Seq_n = 90°) a amplitude da tensão de Seq_z é máxima, como também o Índice de Modulação PWM. A Figura 7.24 apresenta a amplitude do sinal de tensão de Seq_z (normalizada com base na amplitude da tensão de fase da rede) em função da defasagem (fase Seq_n - fase Seq_p) entre as componentes da corrente injetada.

O comportamento observado é o mesmo indicado no estudo de referência [19] (vide Figura 7 do artigo)⁴³.

⁴³ No estudo de referência os autores apresentam um gráfico tridimensional considerando a variação da defasagem para vários percentuais de sequência negativa cobrindo uma faixa de defasagem que vai de 0° a 360°. Neste estudo, a avaliação é feita para um único percentual de sequência negativa (50%) e cobre uma faixa de 120° (-60° a 60°) o que é suficiente para entender o comportamento do sinal de sequência zero dado que se repete a cada 120°.

Figura 7. 24 – Y(SSBC) – Amplitude do Sinal de Sequência Zero em Função da Defasagem Entre as Componentes de Sequência Negativa e Positiva da Corrente Injetada (valores normalizados com base na amplitude (pico) da Tensão de Fase da Rede – 179,6V)



Fonte: Próprio autor

Configuração Δ (SDBC) – Corrente de Linha na Rede Equilibrada – Componentes de Sequência Positiva e Negativa da Tensão da Rede Defasadas

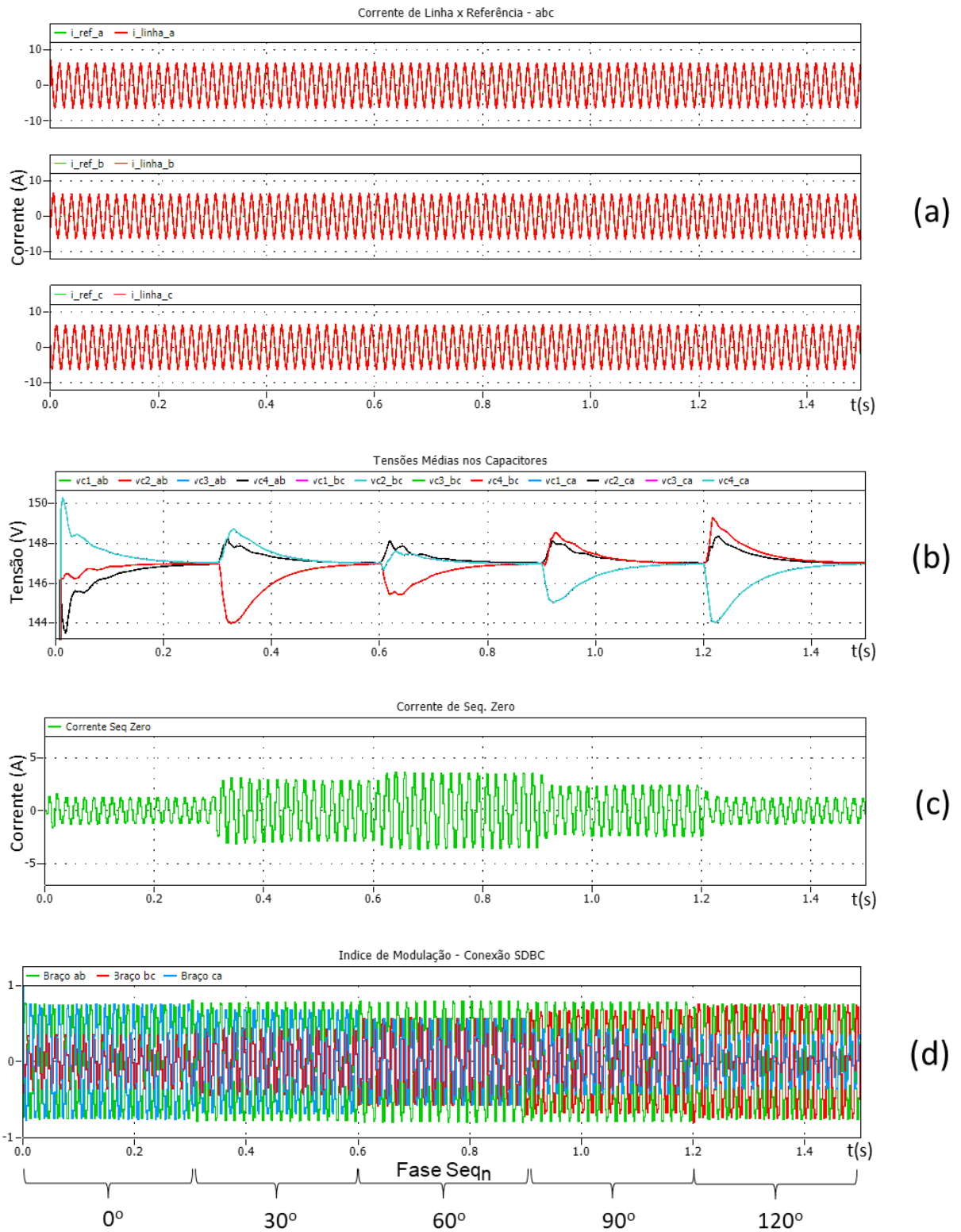
A Tabela 7.17 apresenta as condições em que a simulação é realizada.

Tabela 7. 17 – Parâmetros da Simulação – Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão da Rede

Tensão de Fase	Amplitude(pico) Seq_p	179,6V Tensão de Linha: 311,1V
	Fase Seq_p	0° Tensão de Linha: 30°
	Amplitude Seq_n	50% da Amplitude de Seq _p
	Fase Seq_n	0°; 30°; 60°; 90°; 120° Tensão de Linha: 11°; 20°; 30° ; 40°; 49°
Corrente de Linha	Amplitude (pico) Seq_p	6,1A (50% da Corrente Nominal Máxima) Corrente de Fase: 3,5A
	Fase Seq_p	90° Corrente de Fase: 120°

A Figura 7.25 e a Tabela 7.18 apresentam os resultados obtidos.

Figura 7. 25 – Desempenho do Conversor $-\Delta$ (SDBC)– Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão da Rede



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 18 – Desempenho do Conversor Δ (SDBC)– Defasagem Crescente entre Sequência Negativa e Positiva da Tensão de Fase da Rede (valores obtidos em simulação)

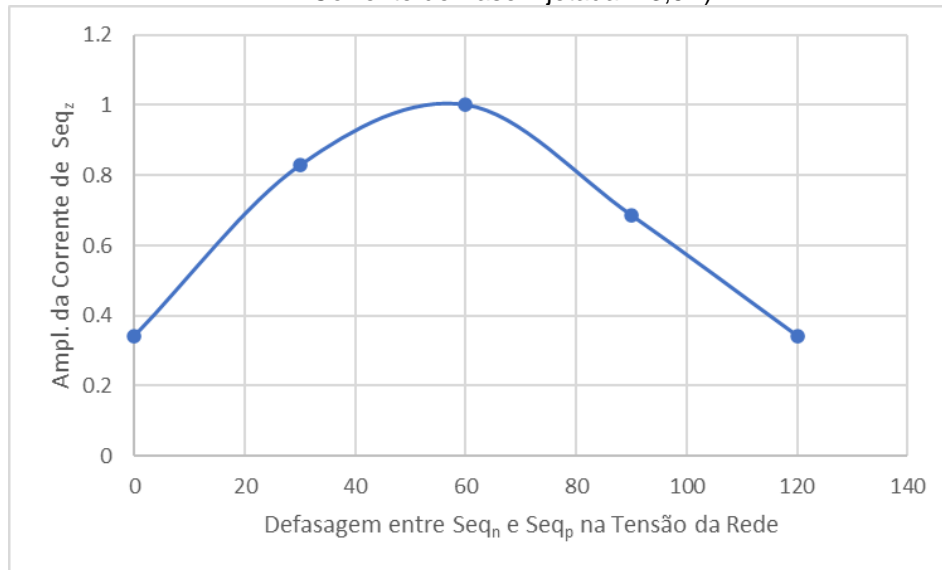
Fase da Componente de Seq _n	0°	30°	60°	90°	120°
THD Corrente (máx.)	0,50%	0,58%	0,54%	0,56%	0,50%
Erro Fase Corrente (máx.)	4,0°	5,0°	5,8°	4,8°	4,0°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	3,6%	3,9%	4,0%	3,9%	3,6%
Ampl. Tensão Seq _z	1,2A	2,9A	3,5A	2,4A	1,2A
Indice Modulação PWM (máx.)	0,76	0,78	0,79	0,79	0,76

Do ponto de vista da capacidade de rastreamento da referência de corrente e de garantir a regulação da média e o balanceamento das tensões CC nos braços, o sistema mantém o bom desempenho já observado nas outras simulações (vide figuras 7.25(a) e (b) e dados apresentados na Tabela 7.16).

As figuras 7.25(c) e (d) apresentam o comportamento da corrente de Seq_z injetada pela Malha de Balanceamento e o Índice de Modulação PWM resultante. Quando a componente de Seq_n da tensão de fase (Fase-Neutro) da rede é de 60°, o que garante que as ambas as componentes (Seq_p e Seq_n) das tensões de linha (Fase-Fase) estejam em fase, a amplitude da corrente de Seq_z e, conseqüentemente o Índice de Modulação PWM, são máximos. A Figura 7.26 apresenta a amplitude do sinal de corrente de Seq_z (normalizada com base na amplitude da componente de Seq_p da Referência de Corrente) em função da defasagem (fase Seq_n - fase Seq_p) entre as componentes da tensão da rede.

O comportamento observado é similar ao observado na simulação anterior para a tensão de Seq_z e indicado no estudo de referência [19] (vide Figura 7 do artigo).

Figura 7. 26– Δ (SDBC) – Amplitude do Sinal de Sequência Zero em Função da Defasagem Entre as Componentes de Sequência Negativa e Positiva da Tensão de Fase da Rede (valores normalizados com base na amplitude da componente de Sequência Positiva da Corrente de Fase injetada – 3,5A)



Fonte: Próprio autor

d. Verificação do Comportamento das Configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) Injetando Apenas Corrente de Sequência Negativa

Nas simulações anteriores a Corrente Injetada contém pelo menos 66% de sequência positiva.

Neste subitem será avaliada a capacidade do sistema operar injetando apenas sequência negativa apontando-se, também, as condições mínimas para que isso seja possível.

Configuração Y(SSBC) - Tensão da Rede Equilibrada – Corrente Injetada de Sequência Negativa

De acordo com [43], em uma operação onde o conversor, Y(SSBC), injeta apenas sequência negativa, a amplitude (pico), V_{b_z} , e a fase, φ_{v_z} , do sinal de tensão de sequência zero a ser imposto para compensar o desbalanceamento na tensão CC dos braços são dadas por (7.1) e (7.2).

$$V_{b_z} = V \quad (7.1)$$

$$\varphi_{v_z} = \pi - \varphi_v + 2\varphi_i \quad (7.2)$$

Onde:

V – amplitude (pico) da tensão de fase da rede

φ_v – fase da tensão de fase da rede

φ_i – fase da corrente de linha injetada

A Tabela 7.19 apresenta as condições em que a simulação é realizada.

Tabela 7. 19 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada apenas com Sequência Negativa

Corrente de Linha	Amplitude(pico) Seq_p	NA
	Fase Seq_p	NA
	Amplitude Seq_n	1,7A; 6,1A; 12,1A
	Fase Seq_n	90°
Tensão de Fase	Amplitude (pico) Seq_p	179,6V
	Fase Seq_p	0°

A Tabela 7.20 apresenta a amplitude e fase da tensão de Seq_z estabelecida com base em (7.1) e (7.2) e os níveis para a tensão mínima no Barramento CC calculados levando em consideração a queda de tensão no circuito de acoplamento para cada nível de corrente simulado. Como se observa, ao operar apenas com sequência negativa, a tensão mínima é de, pelo menos, duas vezes a amplitude da tensão de fase da rede.

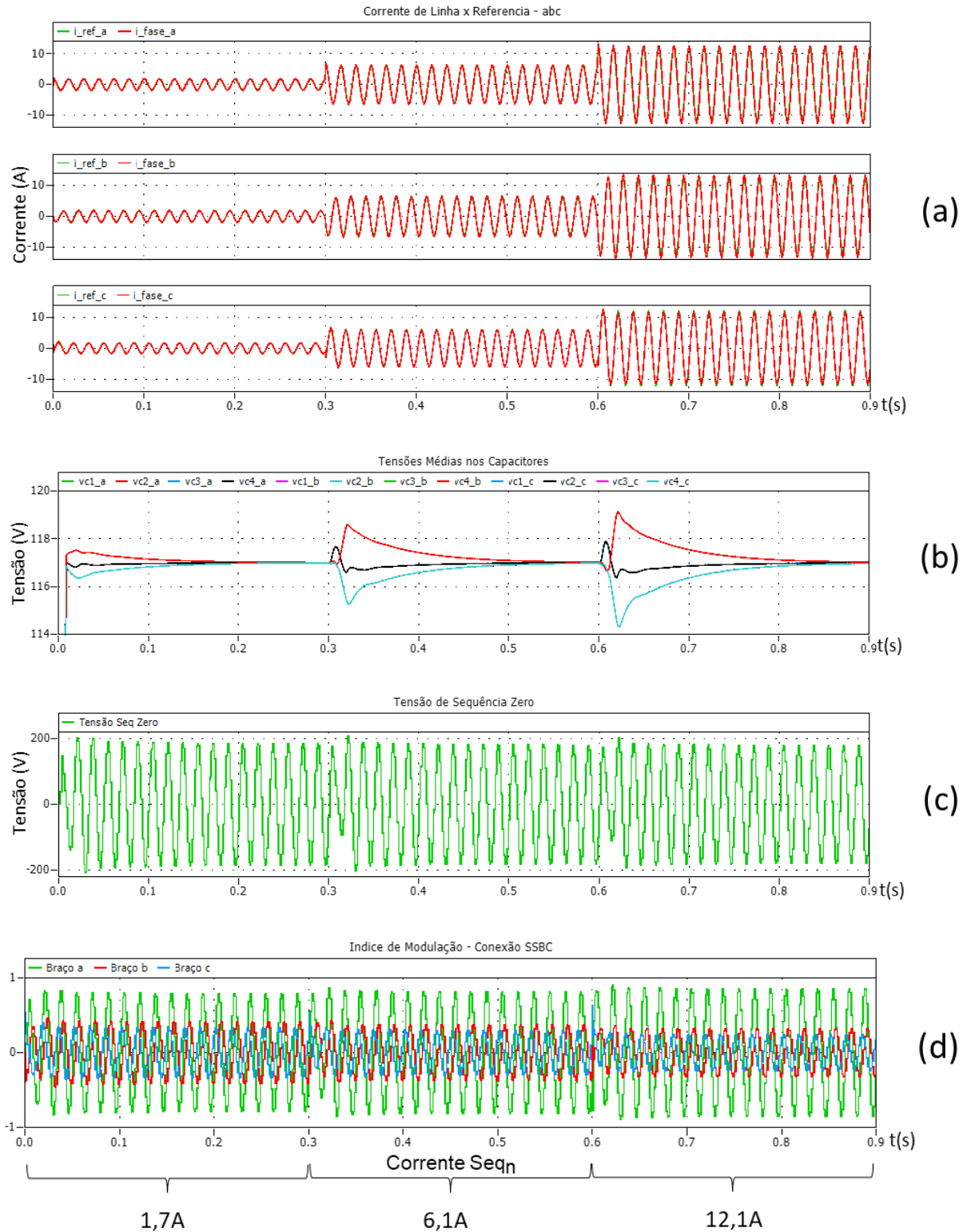
Tabela 7. 20 –Y(SSBC)– Operação com Corrente de Sequência Negativa - Características da Tensão de Sequência Zero e Barramento CC (valores calculados)

Corrente Injetada	Tensão de Seq. Zero Amplitude / Fase	Tensão Barramento CC Nível Mínimo	Barr. CC Nível Mín. (pu) Base: V Fase Rede (179,6V)	Tensão do Barramento CC Utilizada	Índice de Modulação
1,7A	179,6V/0°	366V	2,03	468V	0,78
6,1A	179,6V/0°	382V	2,13		0,82
12,1A	179,6V/0°	405V	2,25		0,87

A tensão utilizada no Barramento CC, como mostra a Tabela 7.20, inclui um percentual adicional (~15%) em relação ao mínimo (405V). Dessa forma garante-se a operação sem saturação mesmo com as sobre-elevações na tensão observadas nos transitórios.

A Figura 7.27 e a Tabela 7.21 apresentam os resultados da simulação.

Figura 7. 27 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Operação Apenas com Seqência Negativa na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 21 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)

Amplitude da Corrente	1,7A	6,1A	12,1A
THD Corrente (máx.)	2,8%	0,9%	0,5%
 Erro Fase Corrente (máx.)	5,4°	4,6°	6,2°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	7,7%	7,0%	9,6%
Ampl. Tensão Seq_z	184,9V	181,4V	180,7V
Indice Modulação PWM (máx.)	0,79	0,81	0,85

Os resultados mostram que o sistema é capaz de operar exclusivamente com a injeção de corrente de Seq_n (vide Figura 7.26(a)). Contudo, nota-se um crescimento nos erros de rastreamento (vide Tabela 7.21). Dois fatores contribuem para esse:

- A combinação das componentes de corrente de Seq_n e de corrente ativa, de Seq_p, injetada pela Malha de Regulação da Média Global das tensões CC para compensar perdas.
- A interação entre o *feedforward* da tensão da rede, também de Seq_p, e a componente de Seq_n da corrente.

A Tabela 7.22 apresenta os erros calculados e obtidos em simulação reduzindo as perdas no conversor para níveis desprezíveis. Nessa condição apenas o efeito do *feedforward* da tensão da rede permanece. Vê-se que os valores calculados e obtidos em simulação se aproximam consideravelmente a despeito de uma diferença um pouco maior no erro de fase na operação com 1,7A.

Tabela 7. 22 – Desempenho do Conversor Y(SSBC) – Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada

(valores calculados e obtidos em simulação desconsiderando perdas no conversor)

	Valores Obtidos em Simulação			Valores Calculados		
	1,7A	6,1A	12,1A	1,7A	6,1A	12,1A
 Erro Fase Corrente (máx.)	2,2°	1,6°	1,4°	3,2°	1,8°	1,5°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	5,3%	3,9%	3,5%	5,2%	3,9%	3,6%

Do lado CC, observa-se que o sistema mantém a capacidade de regular a Média Global e realizar o Balanceamento nos braços e a Equalização Individual das tensões CC do conversor (vide Figura 7.26(b)). A amplitude da tensão de Seq_z (vide Figura 7.26(c) e Tabela 7.21), se aproxima bastante do valor calculado (Tabela 7.20) embora,

na operação com 1,7A, a diferença entre valor obtido e calculado seja ligeiramente maior.

Configuração Δ (SDBC) - Tensão da Rede Equilibrada – Corrente Injetada de Sequência Negativa

Nesta configuração, a corrente de Seq_z realiza a compensação do desbalanço de potência causado pela corrente de Seq_n . A partir do equacionamento desenvolvido em [43] deduz-se que, a amplitude (pico), I_{b_z} , e a fase, φ_{iz} , do sinal de corrente de Seq_z , necessário para realizar a compensação do desbalanceamento na tensão CC dos braços são dadas por (7.3) e (7.4).

$$I_{b_z} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (7.3)$$

$$\varphi_{iz} = \varphi_i - \frac{\pi}{6} \quad (7.4)$$

Onde:

I – é a amplitude(pico) da corrente de linha na rede

φ_i – fase da corrente de linha na rede

A Tabela 7.23 apresenta as condições em que a simulação é realizada.

Tabela 7. 23 – Parâmetros da Simulação – Corrente Injetada Apenas com Sequência Negativa

Corrente de Linha	Amplitude(pico) Seq_p	NA
	Fase Seq_p	NA
	Amplitude Seq_n	1,7A; 3,5A; 6,1A Corrente de Fase: 1,0A; 2A; 3,5A
	Fase Seq_n	150° Corrente de Fase: 120°
Tensão de Fase	Amplitude (pico) Seq_p	179,6V Tensão de Linha: 311,1V
	Fase Seq_p	0° Tensão de Linha: 30°

A Tabela 7.24 apresenta a amplitude e fase da corrente de Seq_z estabelecidas com base em (7.3) e (7.4). Apresenta também as amplitudes da corrente de linha (Fase-Fase) da rede e de fase nos braços do conversor. Observa-se que ao operar apenas com Seq_n , a máxima corrente da faixa nominal de operação cai pela metade, dado

que a corrente de Seq_z ocupa metade da faixa de operação da corrente de fase, nos braços do conversor.

Tabela 7. 24 – Operação com Corrente de Sequência Negativa –Δ(SDBC) – Características da Tensão de Sequência Zero e Barramento CC (valores calculados)

Corr. de Linha Injetada Amplitude/Fase	Corr. de Linha Injetada (pu) Base: I Linha Max = 12,1A	Corr. de Seq _z Amplitude / Fase	Corr. de Fase Amplitude/Fase	Corr. de Fase Injetada (pu) Base: I Fase Max: 7A
1,7A/150°	0,14	1,0A/120°	2,0A/120°	0,29
3,5A/150°	0,29	2,0A/120°	4,0A/120°	0,57
6,1A/150°	0,50	3,5A/120°	7,0A/120°	1,00

A Figura 7.28 e a Tabela 7.25 apresentam os resultados da simulação.

Figura 7. 28 – Desempenho do Conversor – Δ(SDBC) – Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada

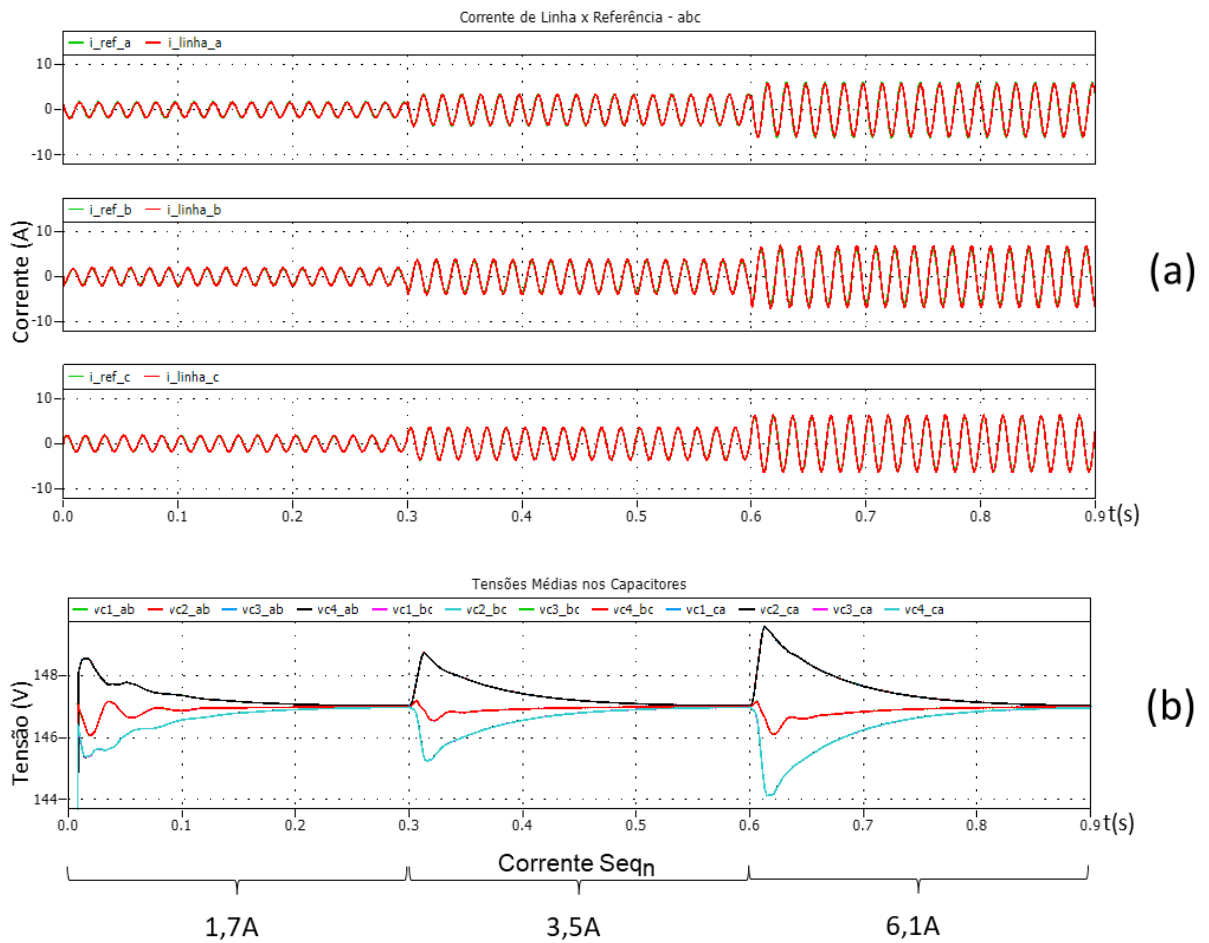
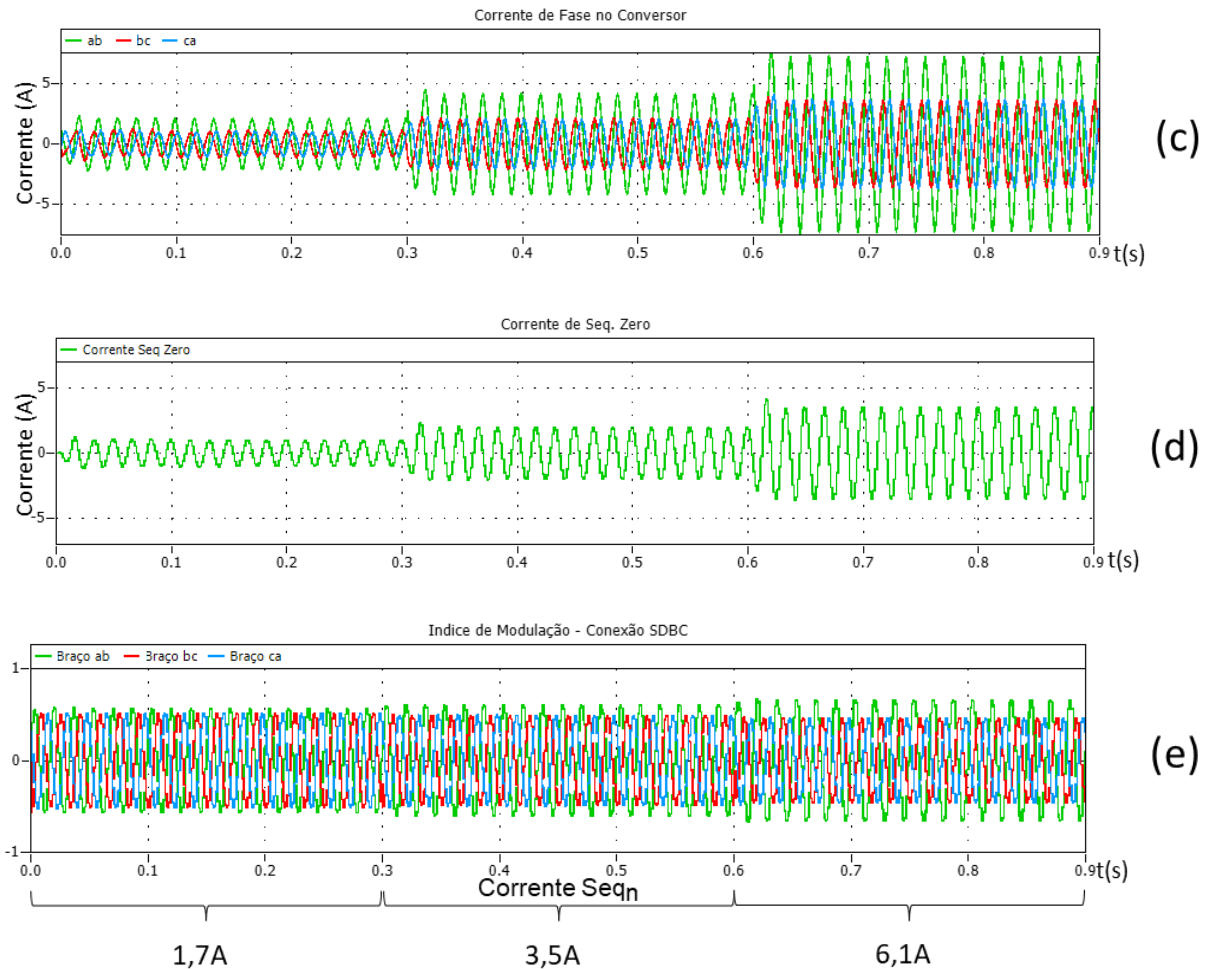


Figura 7.28 continuação



Fonte: Próprio autor

Tabela 7. 25 – Dados de Desempenho do Conversor Δ (SDBC) – Operação apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada (valores obtidos em simulação)

Amplitude da Corrente de Linha	1,7A	3,5A	6,1A
THD Corrente (máx.)	2,2%	1,1%	0,7%
Erro Fase Corrente (máx.)	7,8°	6,5°	7,2°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	11,5%	9,8%	10,9%
Ampl. Corrente Seq _z	1,0A	2,0A	3,5A
Ampl. Corrente de Fase (máx)	2,1A	4,1A	7,2A
Índice Modulação PWM (máx.)	0,55	0,57	0,60

Os resultados novamente mostram que o sistema é capaz de operar exclusivamente com a injeção de corrente de sequência negativa (vide Figura 7.27(a)). Da mesma forma que na configuração Y(SSBC), o crescimento dos erros de rastreamento (vide Tabela 7.25) se explica pela combinação da componente de Seq_n da corrente com o

feedforward da tensão da rede e com a componente ativa, de Seq_p , injetada pela Malha de Regulação da Média Global das tensões CC. Reduzindo as perdas a níveis desprezíveis os erros assumem os valores apresentados na Tabela 7.26.

Tabela 7. 26 – Desempenho do Conversor Δ (SDBC)– Operação Apenas com Sequência Negativa na Corrente Injetada

(valores calculados e obtidos em simulação desconsiderando perdas no conversor)

	Valores Obtidos em Simulação			Valores Calculados		
	1,7A	3,5A	6,1A	1,7A	3,5A	6,1A
Amplitude da Corrente de Linha	1,7A	3,5A	6,1A	1,7A	3,5A	6,1A
 Erro Fase Corrente (máx.)	2,2°	1,7°	1,5°	3,2°	1,8°	1,5°
Erro Amplitude Corrente (máx.)	5,2%	4,2%	3,8%	5,2%	3,9%	3,6%

Como previsto nos cálculos apresentados na Tabela 7.24, a corrente de Seq_z (Figura 7.27(d)) tem a mesma amplitude e fase da corrente de fase injetada e reduz pela metade a faixa de operação do conversor. A Figura 7.27(c) mostra a corrente de fase nos braços incluindo o efeito da componente de Seq_z .

Do lado CC, o sistema mantém a capacidade de regular a Média Global, balancear as tensões CC nos braços e garantir sua equalização entre os submódulo do conversor (vide Figura 7.27(b)).

O Índice de Modulação apresentado na Figura 7.27(e) mostra que, na operação apenas com sequência negativa, a tensão mínima no Barramento CC não sofre impactos. Os níveis mínimos de tensão são os mesmos exigidos quando o conversor opera exclusivamente com sequência positiva.

e. Comportamento das configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) na Presença Concomitante de Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada

Uma condição provável na prática é a operação do sistema em um ambiente onde desbalanços, tanto na Tensão da Rede como na Corrente Injetada, estão presentes.

Nessa condição os efeitos já verificados nos subitens anteriores se combinam trazendo impactos para o nível mínimo requerido na tensão no Barramento CC com a imposição de tensão de Seq_z , no caso Y(SSBC), ou para a máxima corrente injetada nos braços do conversor com a injeção de corrente de Seq_z , no caso Δ (SDBC).

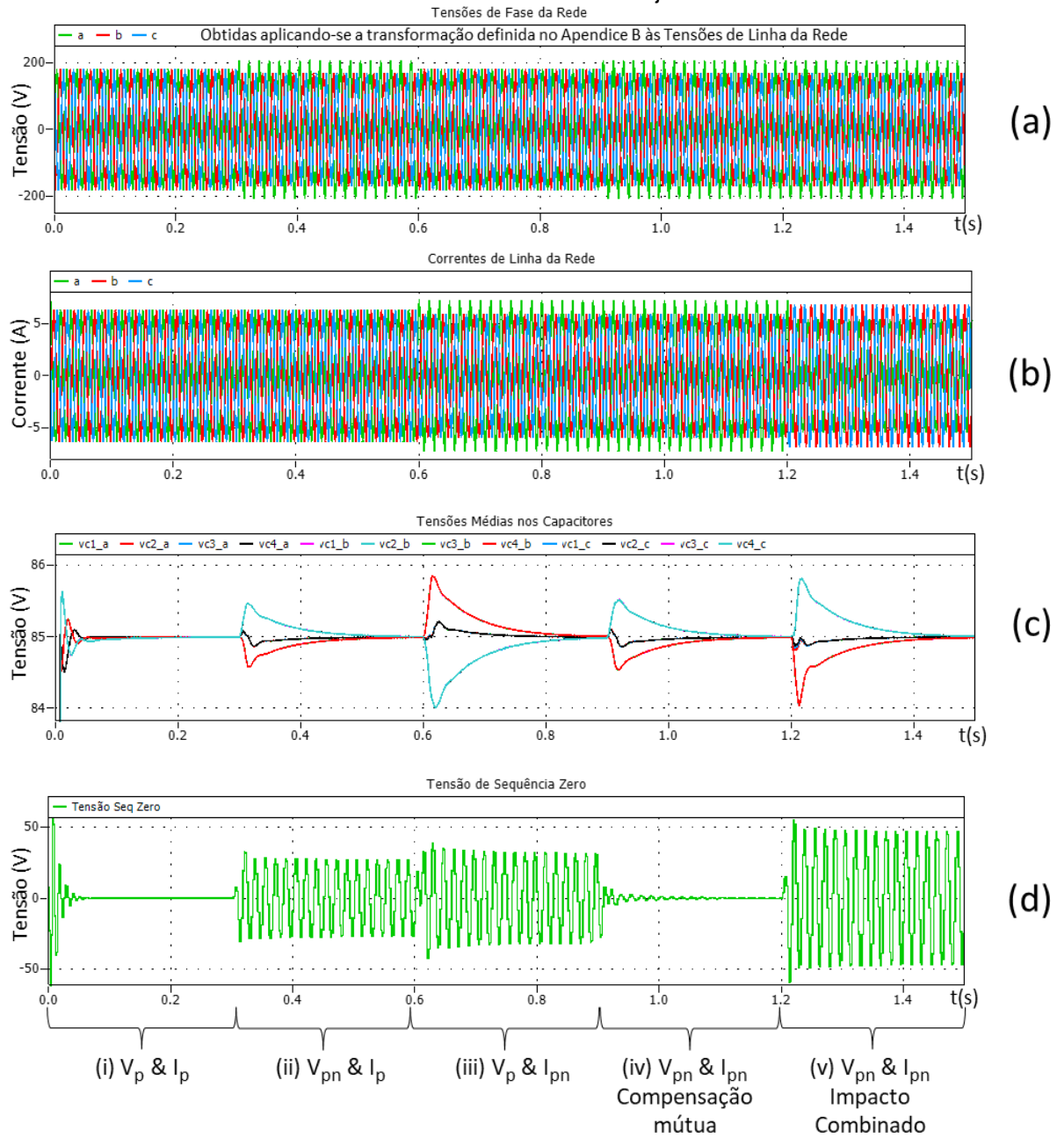
É interessante notar, no entanto, que esses efeitos, ao se combinarem podem, em um extremo, ser cumulativos quando os desbalanços de potência nas fases se somam ($P_{\text{desb}_v} = P_{\text{desb}_i}$) e, em outro, se cancelarem quando os desbalanços se opõem ($P_{\text{desb}_v} = -P_{\text{desb}_i}$) como mostram as figuras 7.29 e 7.30 para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) respectivamente.

Nelas é apresentada a ação da Malha de Balanceamento das tensões CC em cinco condições de operação: (i) sistema equilibrado. Presença exclusiva de Seq_p na tensão da rede e na corrente injetada; (ii) adição de Seq_n (15%) apenas na tensão da rede; (iii) adição de Seq_n (15%) apenas na corrente injetada; (iv) adição de Seq_n na tensão da rede (15%) e na corrente injetada (15%) com compensação mútua de seus efeitos; (v) adição de Seq_n na tensão da rede (15%) e na corrente injetada (15%) com efeito cumulativo.

Observa-se que:

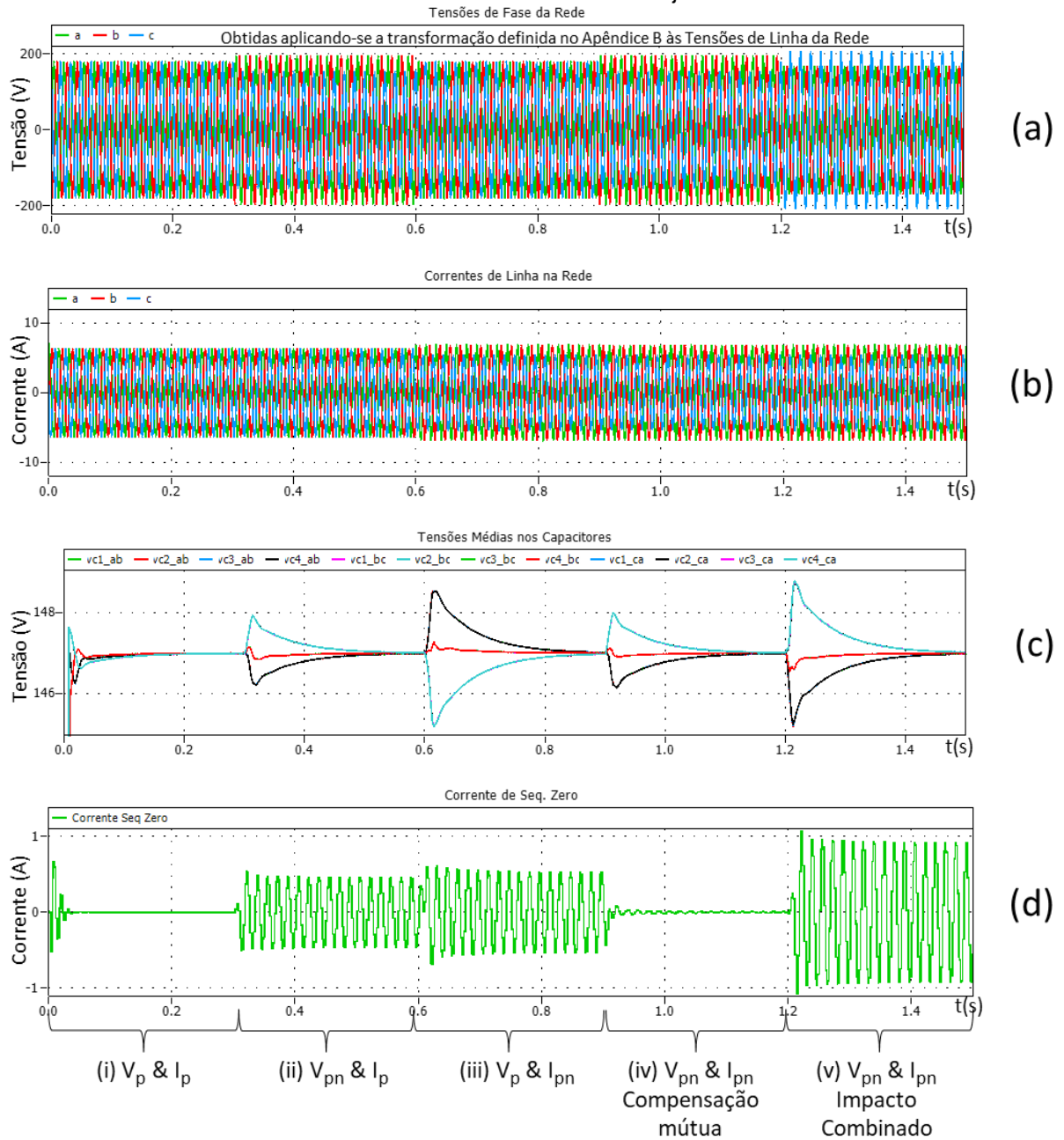
- No intervalo (iv) não há imposição de tensão de Seq_z , no caso Y(SSBC), ou injeção de corrente de Seq_z , no caso Δ (SDBC), devido ao efeito de cancelamento mútuo dos desbalanços provocados pela Seq_n na tensão da rede e na corrente injetada.
- No intervalo (v) o efeito é inverso e os desbalanços causados pela Seq_n na tensão da rede e na corrente injetada se acumulam. Nota-se que as amplitudes dos sinais de Seq_z produzidos se aproximam da soma dos sinais observados nos intervalos (ii) e (iii) onde a Seq_n está presente apenas na tensão ou na corrente.

Figura 7. 29 – Desempenho do Conversor –Y(SSBC)– Operação com Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

Figura 7. 30 – Desempenho do Conversor Δ (SDBC)– Operação com Sequência Negativa na Tensão da Rede e na Corrente Injetada



Fonte: Próprio autor

7.2.3. Operação em Condições Extremas de Tensão na Rede e Corrente de Linha

Neste subitem explora-se o desempenho do conversor em situações extremas envolvendo, de um lado, o afundamento total de uma, duas e três fases da rede (gerador) e, de outro, a operação sem injeção de corrente reativa (corrente injetada nula).

a. Verificação da Capacidade de Operação com Afundamento Total da Tensão de Uma, Duas e Três Fases da Rede (Gerador) (*ZVRT – Zero Voltage Ride Through – Capability*)

As simulações realizadas estão baseadas em [23] e mostram a capacidade da configuração Y(SSBC) de manter a injeção de corrente balanceada, sem alterações significativas na amplitude e fase, na ocorrência dos três tipos de afundamento. Também mostram que, nessa condição, a configuração Δ (SDBC) apresenta uma limitação na medida que a corrente máxima de operação é reduzida pelo fato da injeção de corrente de sequência zero realizada pela Malha de Balanceamento das tensões CC aumentar a corrente nos braços do conversor⁴⁴.

Configuração Y(SSBC)

As simulações são realizadas com o conversor operando no modo capacitivo, injetando a máxima corrente de linha (Amplitude = 12,1A Fase = 90°). Os afundamentos, com duração de 0,1s, ocorrem no intervalo que vai de 0,3s a 0,4s nos gráficos. A Figura 7.31 apresenta o comportamento do sistema diante de um afundamento total em uma das fases do gerador.

A Figura 7.31(a) apresenta as tensões de linha (Fase-Fase) e de Fase (Fase-Neutro)⁴⁵ da rede.

A Figura 7.31(b) apresenta a corrente de linha injetada. Não são observadas alterações (amplitude/fase) ao longo do período de simulação⁴⁶.

⁴⁴ Nas simulações realizadas, em ambas as configurações, Y(SSBC) e Δ (SDBC), o desempenho do PLL sincronizado com a tensão da rede é bastante bom. Contudo, uma avaliação mais precisa e realista do desempenho requer a execução dos testes em um sistema experimental. Nessa condição espera-se uma maior variação (*drifting*) da fase do sinal PLL em relação ao tensão da rede especialmente durante afundamentos totais das 3 fases o que deve resultar em transitórios mais longos no retorno do afundamento à condição normal de operação.

⁴⁵ As Tensões de Fase da rede são obtidas a partir das tensões de linha medidas aplicando a transformação definida no Apêndice B deste documento.

⁴⁶ Como é comentado em [23], embora o conversor possa seguir operando além do intervalo de 0,1s, na prática, um sistema de proteção deve interromper a operação por questões de segurança.

Figura 7. 31 – Configuração Y(SSBC)– Operação com Afundamento Total em Uma Fase do Gerador

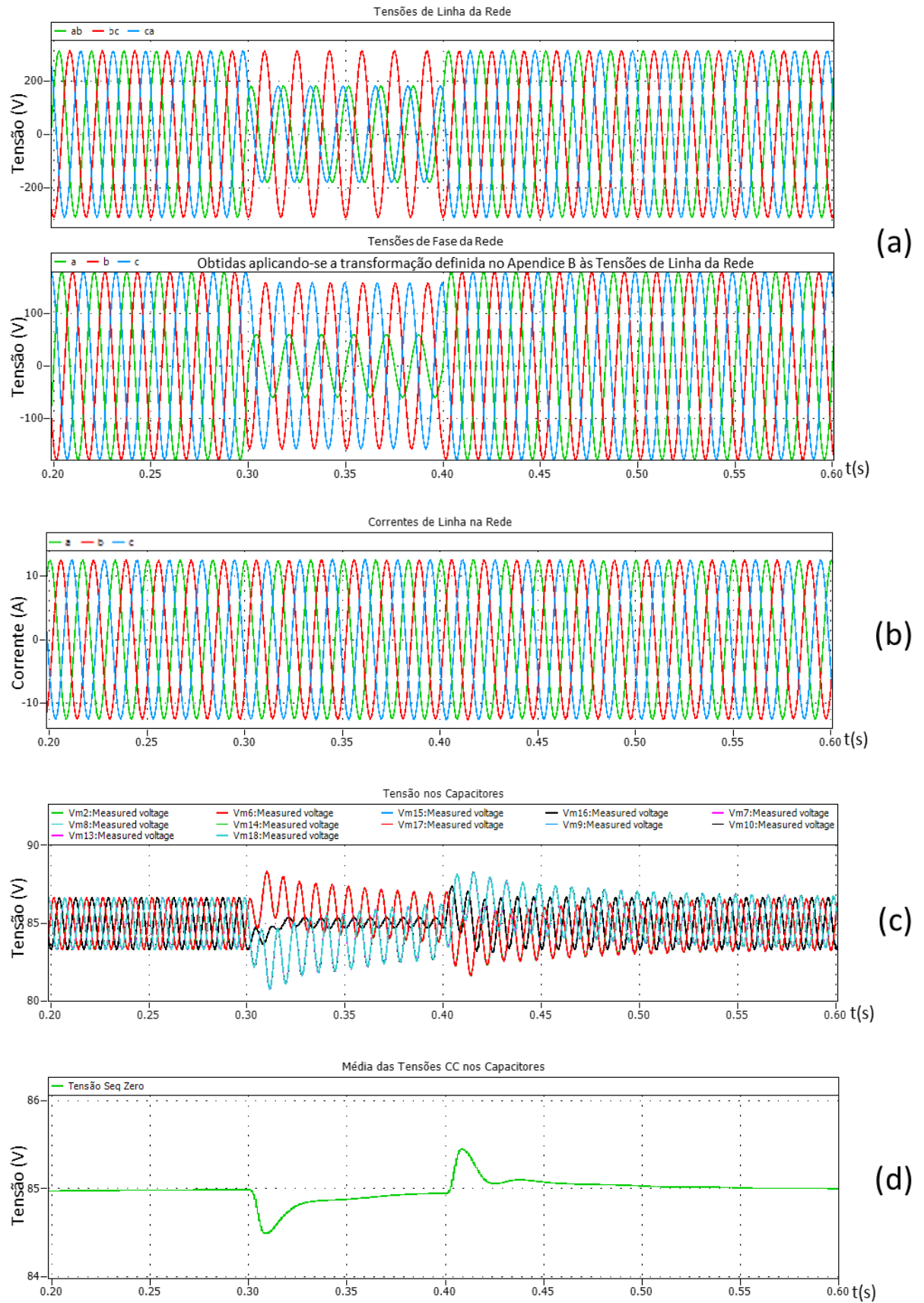
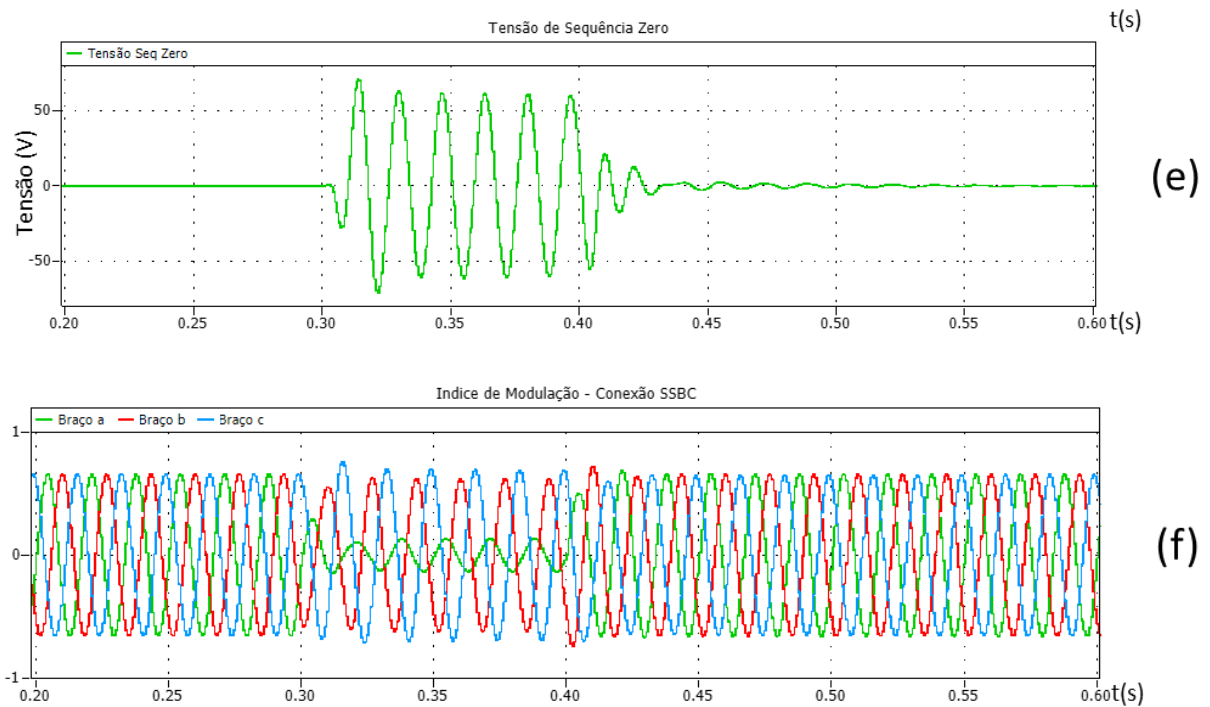


Figura 7.31 continuação



Fonte: Próprio autor

O afundamento de uma fase produz alterações transitórias relativamente pequenas nas tensões CC dos capacitores e na sua média como mostram as figuras 7.31(c) e 7.31(d)⁴⁷ respectivamente, e fica evidente que as malhas de Regulação da Média Global e Balanceamento das tensões CC mantêm a capacidade de alinhar as tensões CC ao nível referência.

A Figura 7.31(e) mostra o sinal de tensão de Seq_z imposto pela Malha de Balanceamento. A Figura 7.31(f) mostra o Índice de Modulação PWM em cada braço do conversor. Como se observa, as amplitudes sofrem pouca alteração em relação à condição equilíbrio.

A seguir, a Figura 7.32 apresenta o comportamento do conversor enfrentando um afundamento total duplo, em duas fases do gerador.

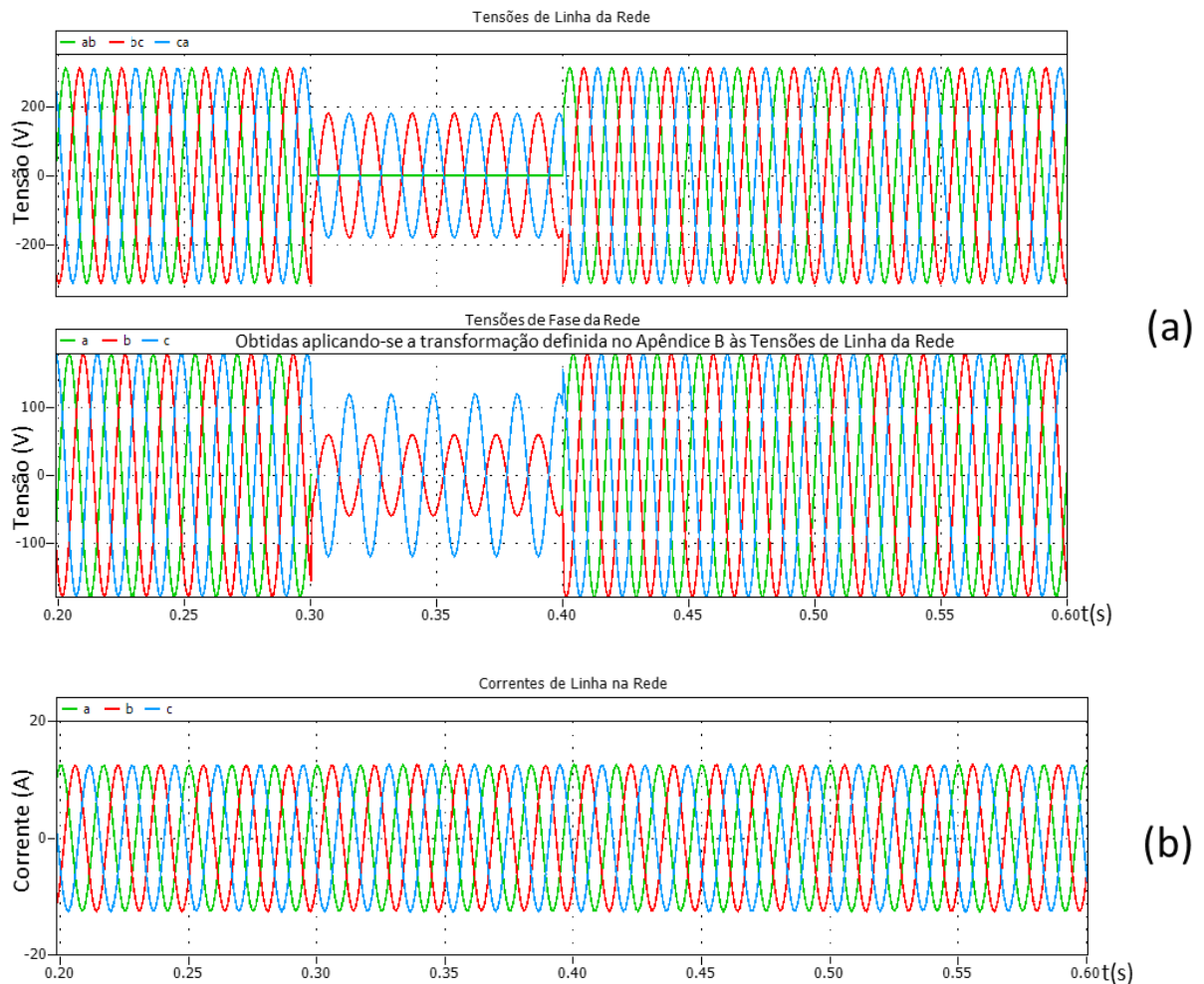
A Figura 7.32(a) apresenta as tensões de linha (Fase-Fase) e de fase (Fase-Neutro) da rede e a Figura 7.32(b) apresenta a corrente de linha injetada sem apresentar alterações significativas.

⁴⁷ O sinal apresentado na Figura 7.31(d) teve a componente de 120Hz filtrada para facilitar a visualização do valor médio da tensão.

A Figura 7.32(c) mostra o comportamento das tensões CC individuais nos capacitores. Nota-se que o afundamento duplo provoca uma alteração transitória mais significativa na média das tensões CC como mostra a Figura 7.32(d)⁴⁸, mas é possível notar que tende a retornar ao nível de referência.

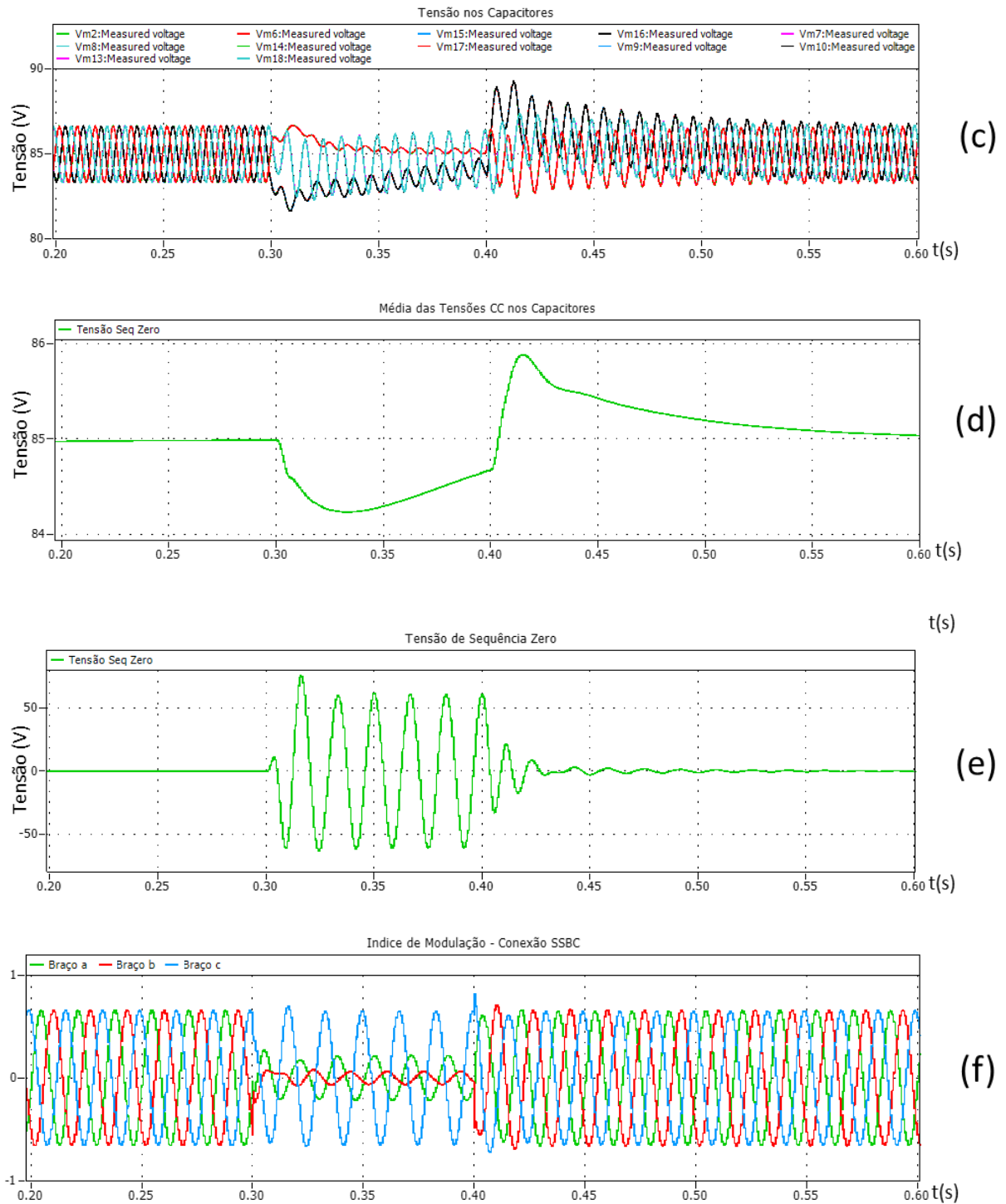
Nas Figuras 7.32(e) e (f) observam-se o sinal de tensão de Seq_z e o Índice de Modulação PWM dos braços do conversor. Vê-se que a Malha de Balanceamento trabalha normalmente. A amplitude do Índice de Modulação nos braços cai na medida que a amplitude na rede também cai com os afundamentos nos respectivos braços.

Figura 7. 32 – Configuração Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total em Duas Fases do Gerador



⁴⁸ O sinal apresentado na Figura 7.32(d) teve a componente de 120Hz filtrada para facilitar a visualização do valor médio da tensão.

Figura 7.32 continuação



Fonte: Próprio autor

A Figura 7.33 apresenta os resultados da simulação com um afundamento total triplo, nas três fases do gerador.

A Figura 7.33(a) apresenta a rede com todas as tensões zeradas.

A Figura 7.33(b) apresenta a corrente de linha injetada. O aumento discreto observado na condição anterior, agora, é considerável e só não cresce exponencialmente porque os limites *anti-windup* do controlador da Malha de Regulação da Média Global entram em ação. Nessa condição, não há como drenar potência da rede para compensar as perdas no conversor e a tensão nos capacitores cai rapidamente como se vê na Figura 7.33(c).

A Malha de Balanceamento, como se conclui da observação da Figura 7.33(d) que apresenta o sinal de tensão de Seq_z , tem ação apenas transitória dado que o afundamento é “equilibrado”. A amplitude do Índice de Modulação dos braços cai ao mínimo necessário para injetar a Corrente de Referência uma vez que a tensão na rede é nula.

Figura 7. 33 – Configuração Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total nas Três Fases do Gerador

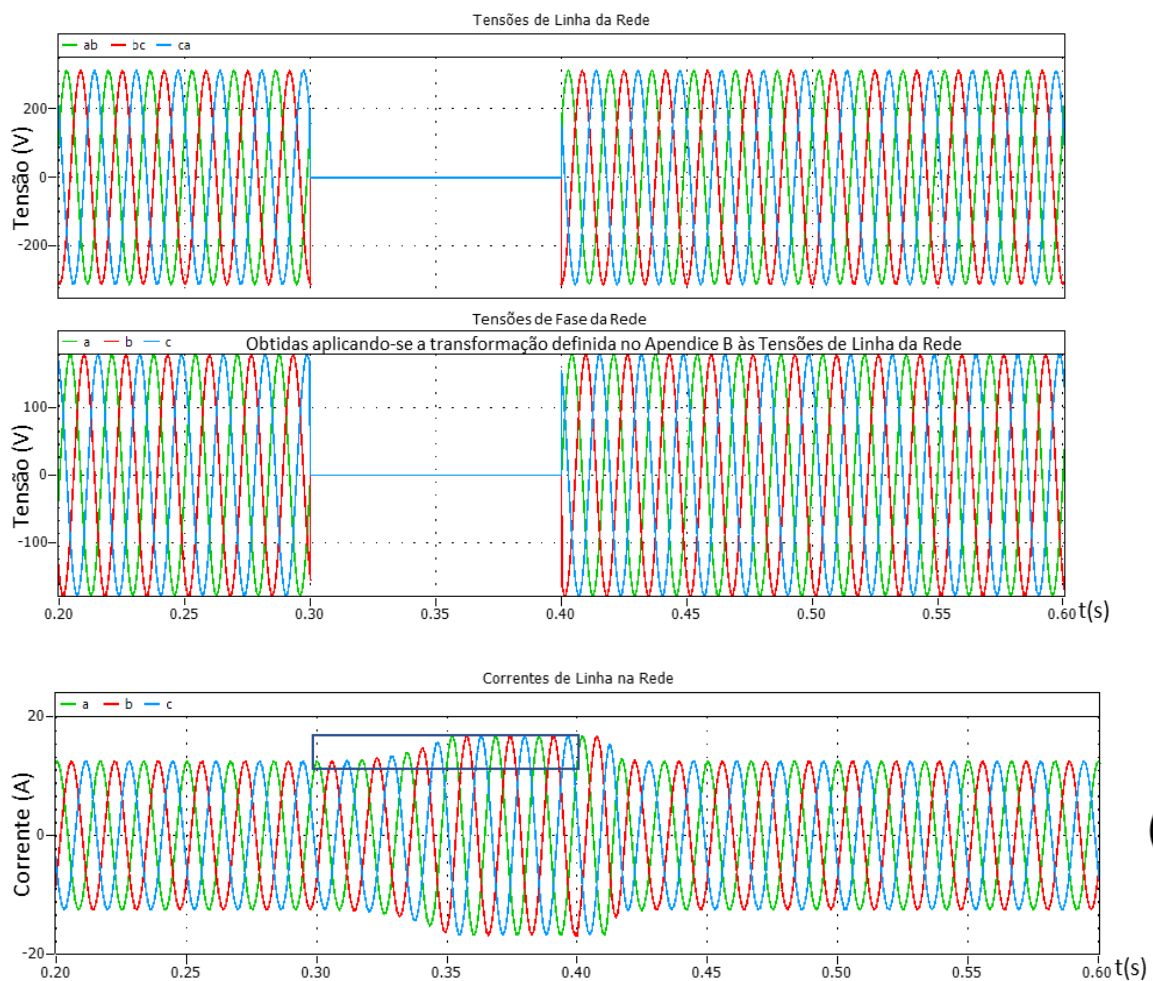
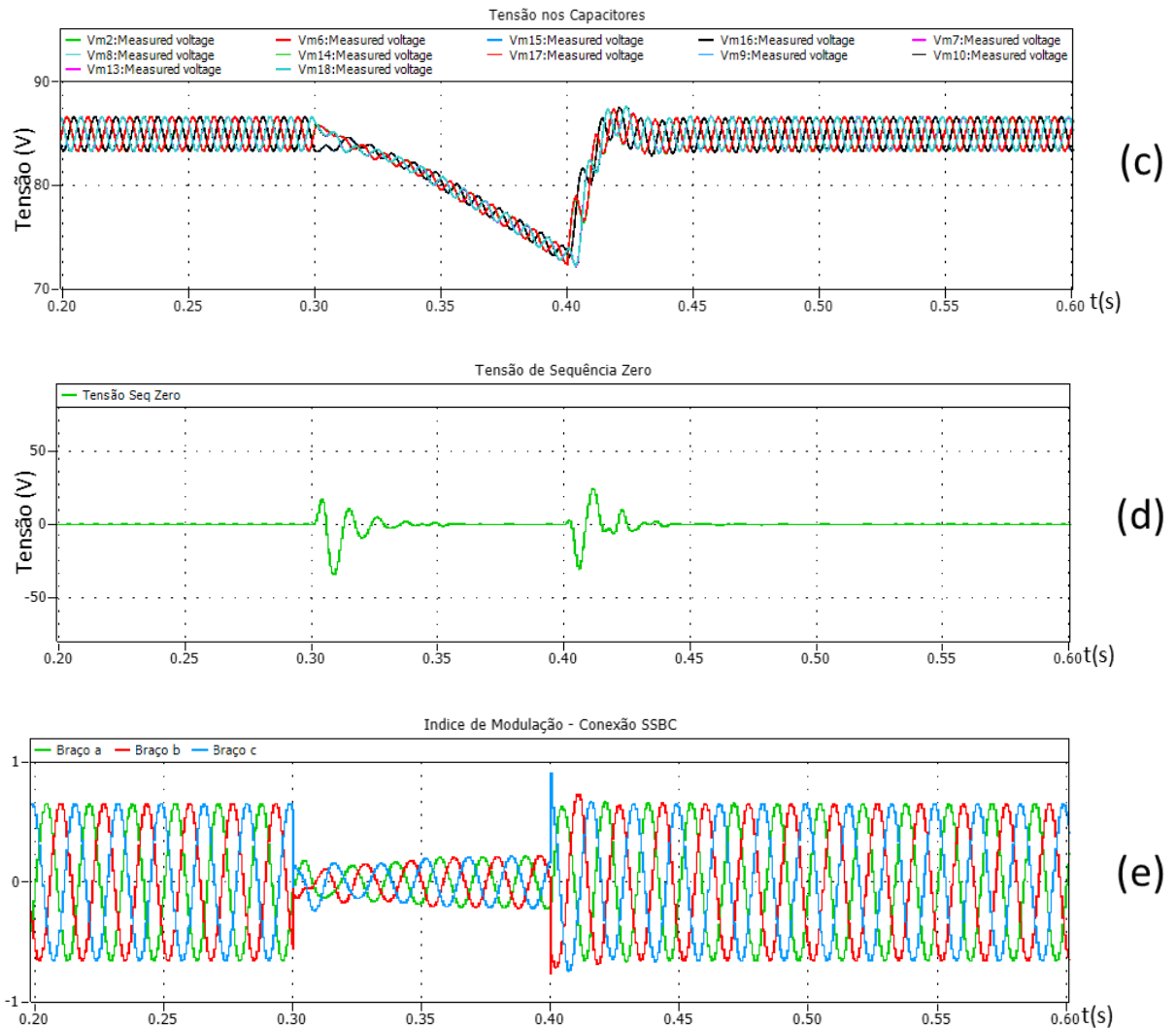


Figura 7.33 continuação



Fonte: Próprio autor

O artigo de referência [23] discute a questão do suprimento de potência para a compensação de perdas no conversor durante um afundamento triplo total e estabelece a fórmula (7.5) que relaciona as perdas totais no conversor, o valor dos capacitores dos submódulos, a queda de tensão no intervalo do afundamento e a duração do intervalo de afundamento.

$$\text{Perdas} = 3N \frac{1}{2} C (\sqrt{V_{ti}^2} - \sqrt{V_{tf}^2}) \frac{1}{t_f - t_i} \quad (7.5)$$

Onde:

Perdas – perdas totais no conversor

N – número de submódulos em cada braço do conversor

C – valor dos capacitores dos submódulos

$\overline{v_{C_{ti}}}$ – tensão média nos capacitores no início do intervalo de afundamento

$\overline{v_{C_{tf}}}$ – tensão média nos capacitores no final do intervalo de afundamento

t_i – instante de tempo que determina o início do intervalo de afundamento

t_f – instante de tempo que determina o final do intervalo de afundamento

Com base em (7.5), e nas perdas calculadas para a configuração utilizada nas simulações, pode-se calcular o valor dos capacitores a ser utilizado para garantir uma queda máxima na tensão CC no intervalo de tempo simulado.

A perda total na configuração Y(SSBC) é dada pela soma das perdas no circuito de acoplamento e das perdas estipuladas no lado CC do conversor.

$$\text{Perdas} = \text{Perdas}_{\text{Acoplamento}} + \text{Perdas}_{\text{Barramento_CC}} \quad (7.6)$$

$$\text{Perdas} = 3 R \frac{I_b^2}{2} + 3N \frac{V_c^2}{R_c} \quad (7.7)$$

$$\text{Perdas} = 3 \times 1 \times \frac{12,1^2}{2} + 3 \times 4 \times \frac{85^2}{6200} = 219,62 + 13,98 = 233,6W \quad (7.8)$$

Considerando as perdas calculadas em (7.8), para uma queda de ~1Volt na tensão média nos capacitores, após o intervalo de 0,1s, calculamos o valor dos Capacitores a partir de (7.5).

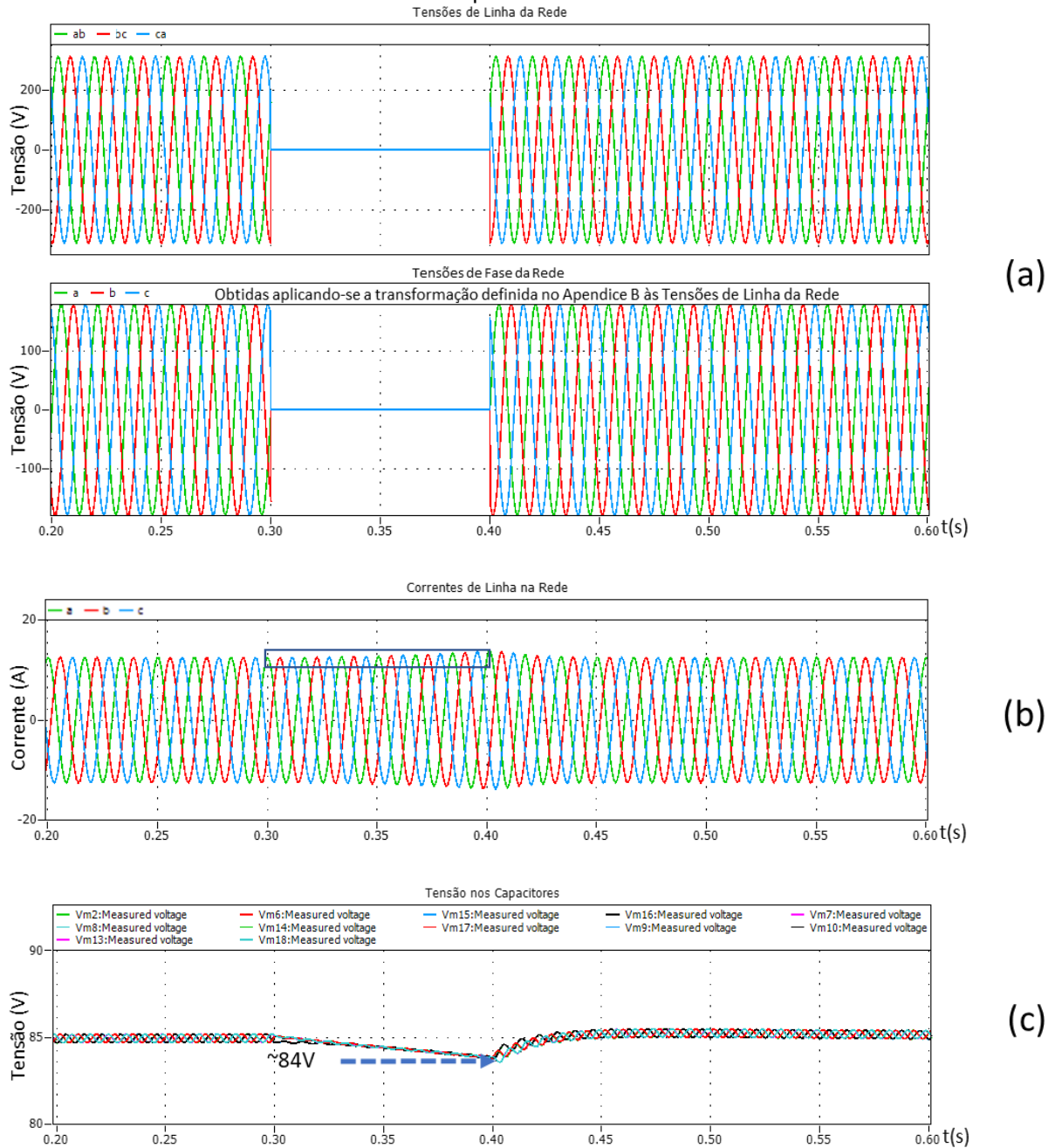
$$233,6 = 3 \times 4 \times \frac{1}{2} \times C \times (85^2 - 84^2) \times \frac{1}{0,1} = 10140 \times C \quad (7.9)$$

$$C = \frac{233,6}{10140} = 23.000\mu F \quad (7.10)$$

A Figura 7.34 apresenta o resultado da simulação com o valor dos capacitores alterado para o calculado em (7.10). Como se pode observar, a queda de tensão no Barramento CC se limita a ~1Volt e a amplitude da corrente injetada tem um crescimento bastante limitado durante o período de afundamento.

Conclui-se que a capacidade de lidar com afundamentos de tensão traduzida no tempo máximo de sustentação da corrente injetada e queda máxima na tensão do Barramento CC é uma característica que deve compor o conjunto de especificações para o projeto do conversor.

Figura 7. 34 – Conversor – Y(SSBC) – Operação com Afundamento Total nas Três Fases do Gerador
Valor dos Capacitores Recalculados



Fonte: Próprio autor

Configuração Δ (SDBC)

A maior sensibilidade dessa configuração a desbalanços na tensão da rede já foi observada nas simulações anteriores realizadas neste item. Dado que a compensação do desbalanço se dá através da injeção de corrente de sequência zero, a faixa de operação se reduz na mesma proporção em que aumenta a amplitude dessa componente. Em afundamentos de duas ou três fases a corrente nos braços

crece bruscamente o que impõe um limite para a operação da configuração Δ (SDBC) nestas condições [44]⁴⁹.

Para essa configuração não serão realizadas simulações para os três casos de afundamento como feito para a configuração Y(SSBC). Apenas a condição envolvendo o afundamento total de apenas uma fase do gerador é apresentada e é suficiente para observar a limitação citada acima.

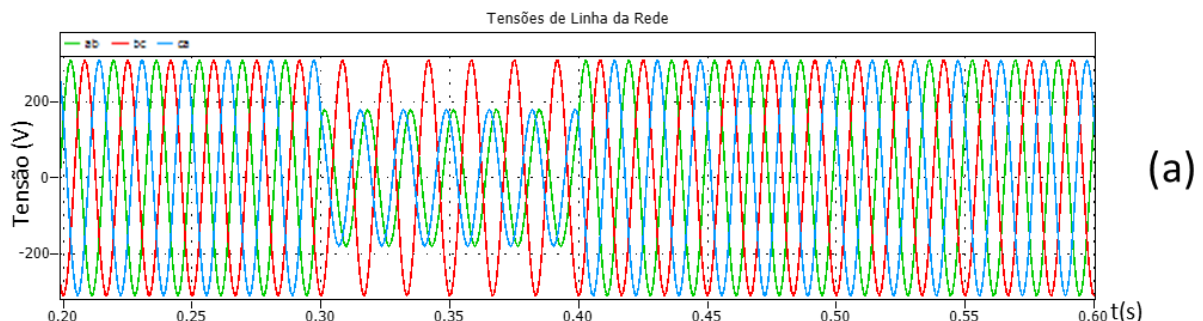
As condições de simulação são as mesmas utilizadas para a configuração Y(SSBC), ou seja, o conversor opera no modo capacitivo, injetando a máxima corrente nominal de linha (Amplitude = 12,1A Fase = 90°). O afundamento, com duração de 0,1s, ocorre no intervalo que vai de 0,3s a 0,4s nos gráficos.

A Figura 7.35 apresenta os resultados da simulação.

A Figura 7.35(a) mostra as tensões de linha da rede sob efeito do afundamento.

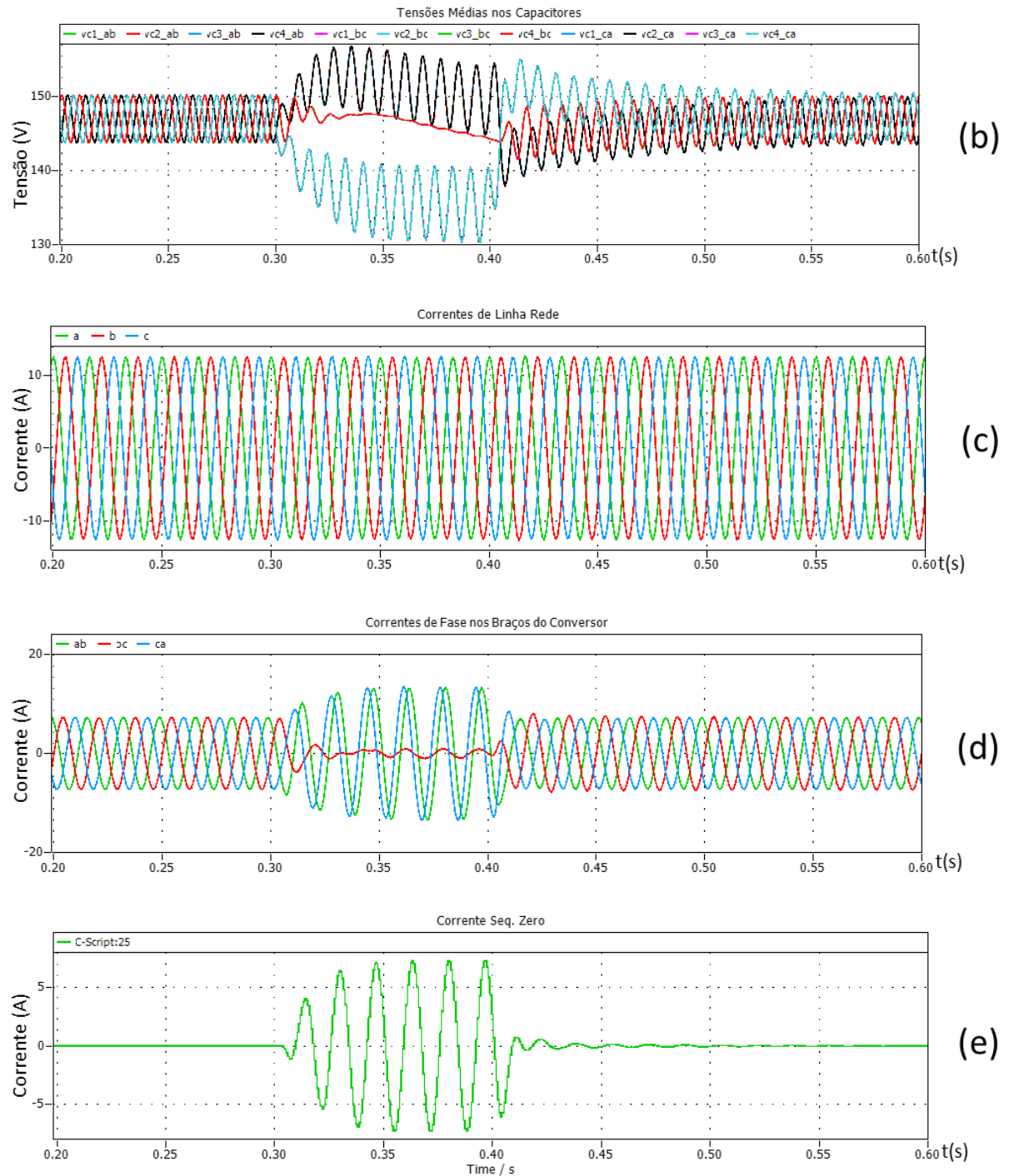
A Figura 7.35(b) mostra a tensão CC dos submódulos mantida em linha com o nível de referência (147V) e a ação dos controladores PI da Malha de Balanceamento atuando para garantir o equilíbrio entre os braços. A Figura 7.35(c) mostra a corrente de linha na rede inalterada no intervalo do afundamento. Contudo, a corrente de fase nos braços do conversor, apresentada na Figura 7.35(d), sofre uma elevação substancial ultrapassando em quase 100% a amplitude da corrente máxima de fase (7A). A Figura 7.35(e) apresenta a corrente de Seqz responsável pela elevação. Para afundamentos duplos e triplos, como comentado acima, a amplitude da corrente nos braços cresce bruscamente.

Figura 7. 35 – Configuração Δ (SDBC) – Operação com Afundamento Total em Uma Fase do Gerador



⁴⁹ O artigo propõe um método que combina da injeção de corrente de sequência zero e negativa associada a um mecanismo de limitação de corrente e permite a operação da configuração nessas condições.

Figura 7.35 continuação



Fonte: Próprio autor

**b. Verificação da Capacidade de Manutenção das Tensões do Barramento CC Balanceadas Sem Injeção de Corrente Reativa
Configuração Y(SSBC)**

Na arquitetura de controle proposta para a configuração Y(SSBC) as malhas de Balanceamento e de Equalização Individual da tensão CC nos braços e submódulos, dependem da presença de corrente para que funcionem adequadamente.

Na simulação o conversor opera no modo capacitivo e inicia a simulação injetando a corrente de linha máxima (amplitude =12,1A Fase=90°) como mostra a Figura 7.35(a)⁵⁰. No instante de tempo igual a 0,2s a Referência de Corrente é reduzida a zero e mantida neste nível por um período de 4,5s. Neste intervalo a única corrente presente é a corrente ativa drenada pelo conversor para compensar perdas e manter o balanceamento e a equalização das tensões CC. Em seguida, a Referência de Corrente retorna ao nível original.

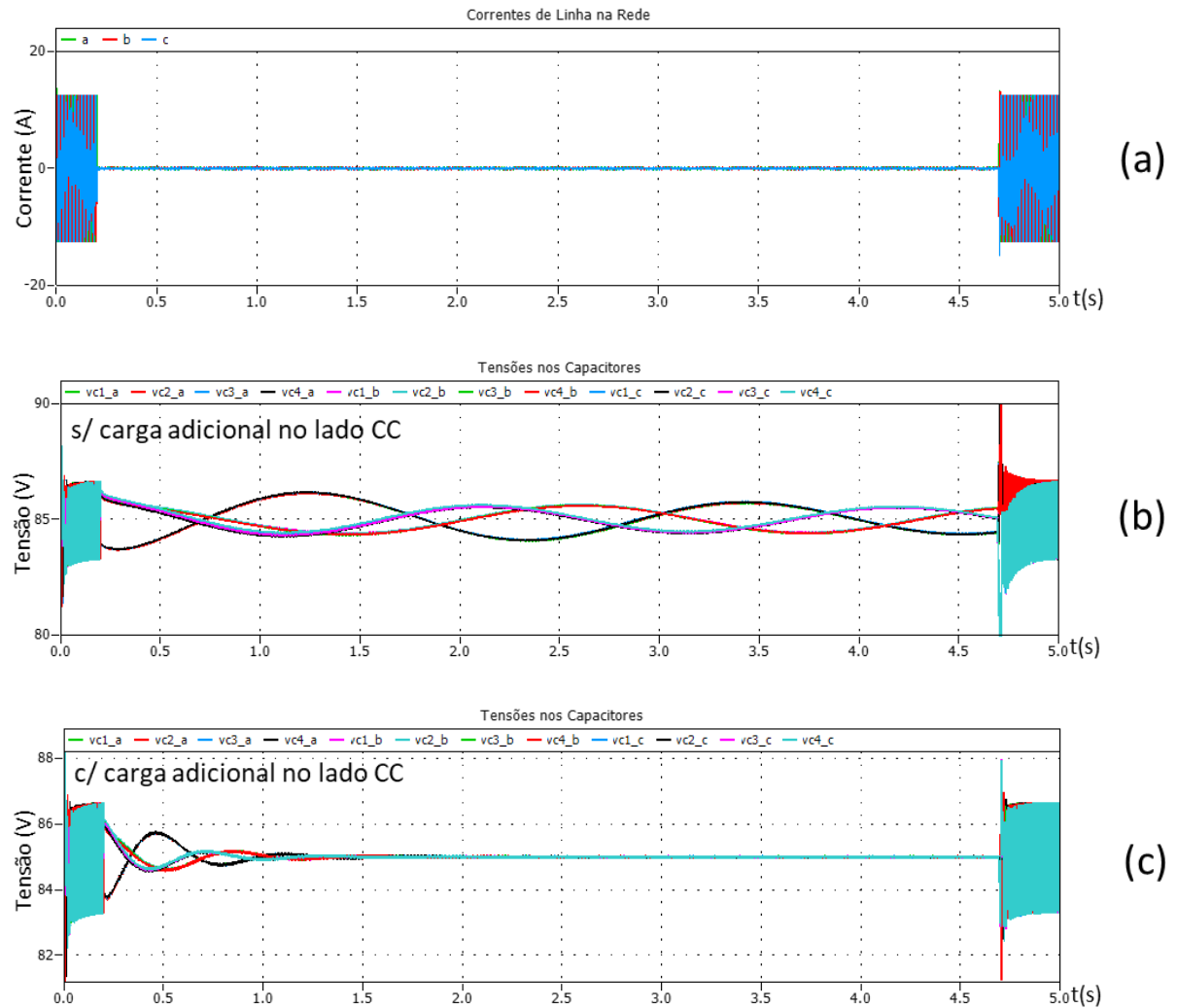
A Figura 7.36(b) apresenta as tensões CC nos capacitores com a configuração respeitando as especificações apresentadas na Tabela 6.1. A perda em cada submódulo é próxima a 1W. Observa-se que as malhas de Equalização Individual não têm dificuldade para realizar a equalização das tensões (note que as tensões CC dos submódulos de um mesmo braço são muito próximas). A Malha de Balanceamento, dada a corrente relativamente baixa, requer um período bastante estendido para equilibrar as tensões nos braços (note que as tensões, embora oscilem em torno do valor médio, tem um caráter convergente).

Como visto no Capítulo 1 (item 1.1(c)), a adição de carga balanceada ao lado CC dos submódulos apresenta-se como uma estratégia para garantir a ação das malhas de Equalização Individual quando a corrente drenada pelas perdas se mostra muito pequena [28]. A Malha de Balanceamento pode se beneficiar da mesma estratégia.

A Figura 7.36(c) apresenta o resultado da mesma simulação considerando a adição de uma carga extra no lado CC de cada submódulo aumentando a dissipação de potência para 5W, apenas no período em que a Referência de Corrente é reduzida a zero. Nota-se que a resposta da Malha de Balanceamento torna-se consideravelmente mais rápida.

⁵⁰ A tensão na rede permanece equilibrada ao longo de toda a simulação.

Figura 7. 36 – Configuração Y(SSBC) – Operação Sem Injeção de Corrente Reativa



Fonte: Próprio autor

Configuração Δ (SDBC)

Já na arquitetura de controle proposta para a configuração Δ (SDBC) a dependência da corrente se dá apenas nas malhas de Equalização Individual da Tensão CC dos submódulos.

A Figura 7.37 apresenta o comportamento desta configuração quando submetida às mesmas condições impostas à configuração Y(SSBC).

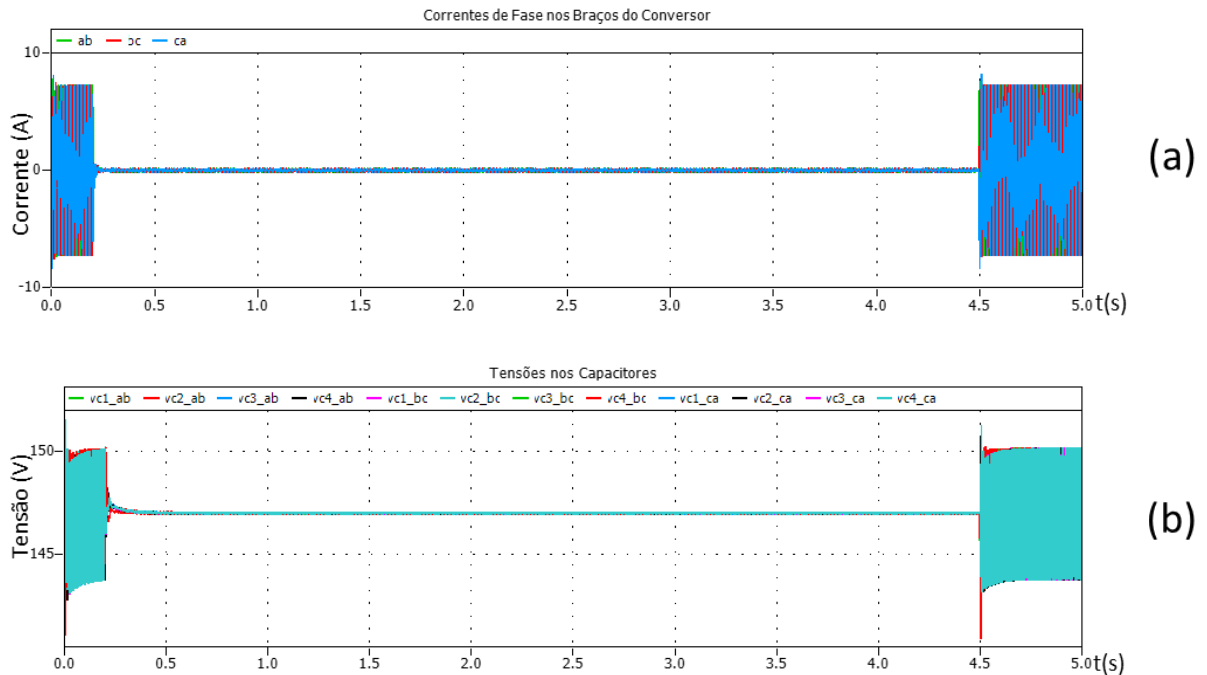
A Figura 7.37(a) apresenta o sinal da corrente de fase em cada braço do conversor.

A Figura 7.37(b) apresenta as tensões CC nos capacitores de cada submódulo. Como se observa, as tensões são mantidas balanceadas nos braços e equilibradas entre os submódulos. A Malha de Balanceamento, como injeta a própria corrente de Seqz

necessária para o balanceamento, atua rapidamente nas transições e mantém as tensões CC dos braços equilibradas em todo o período.

As malhas de Equalização Individual mantêm as tensões equalizadas entre os submódulos. A corrente ativa drenada para compensar perdas no conversor é suficiente para garantir a ação de equalização.

Figura 7. 37 – Configuração Δ (SDBC) – Operação Sem Injeção de Corrente Reativa



Fonte: Próprio autor

Nos casos em que a corrente ativa drenada para compensar perdas é muito pequena, a adição de carga extra também pode ser utilizada na configuração Δ (SDBC). Uma alternativa que essa configuração oferece é a injeção de sequência zero com essa finalidade.

As Figuras 7.38 e 7.39 apresentam os resultados das simulações realizadas fazendo uso das duas estratégias.

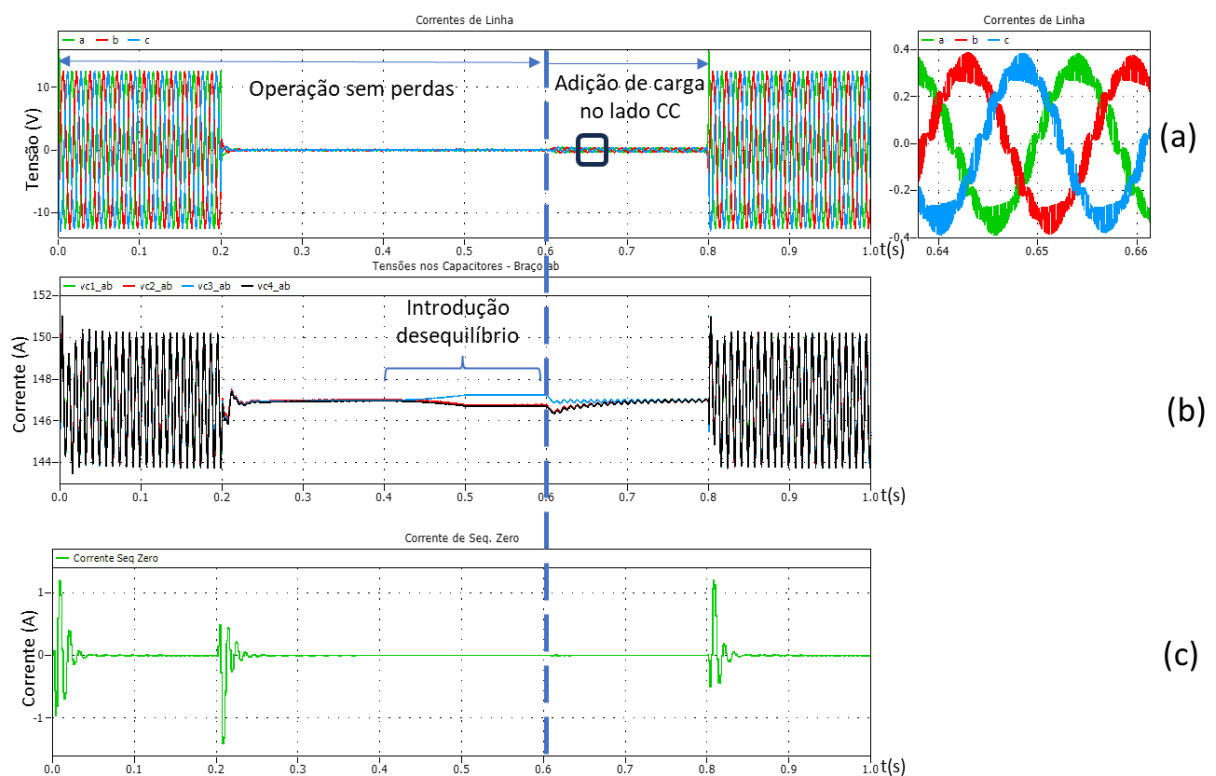
Nas simulações o conversor opera com perdas desprezíveis até o instante de tempo $t=0,6s$. No intervalo entre os instantes $t=0,4s$ e $t=0,5s$, as tensões CC dos submódulos em um braço do conversor são desequilibradas⁵¹. Dessa forma, como a corrente nos braços é muito pequena, o desequilíbrio permanece após o instante $t=0,5s$. A partir

⁵¹ O desequilíbrio é simétrico, ou seja, em dois submódulos a tensão é elevada e em outros dois é reduzida de forma que a tensão CC total no braço não se altera e, com isso, o balanceamento entre os braços não é afetado.

do instante $t = 0,6s$ as estratégias de adição de carga e injeção de corrente de Seq_z são aplicadas produzindo a equalização das tensões.

A Figura 7.38(a) apresenta a corrente de linha na rede durante a simulação da abordagem de Adição de Carga aos circuitos CC dos submódulos. A adição de carga provoca a drenagem de corrente ativa da rede como se observa no destaque. A Figura 7.38(b) mostra o comportamento das tensões nos submódulos do braço. Como se observa, com a adição de carga, as tensões se equalizam e convergem para o valor médio da Tensão CC. A Figura 7.38(c) mostra o sinal de Seq_z produzido pela Malha de Balanceamento. Nota-se que o desequilíbrio provocado e a própria adição de carga não levam a Malha de Balanceamento a injetar Seq_z uma vez que não altera o balanço das tensões CC dos braços.

Figura 7. 38 – Configuração Δ (SDBC) – Comportamento da Equalização Individual Com Adição de Carga no Lado CC

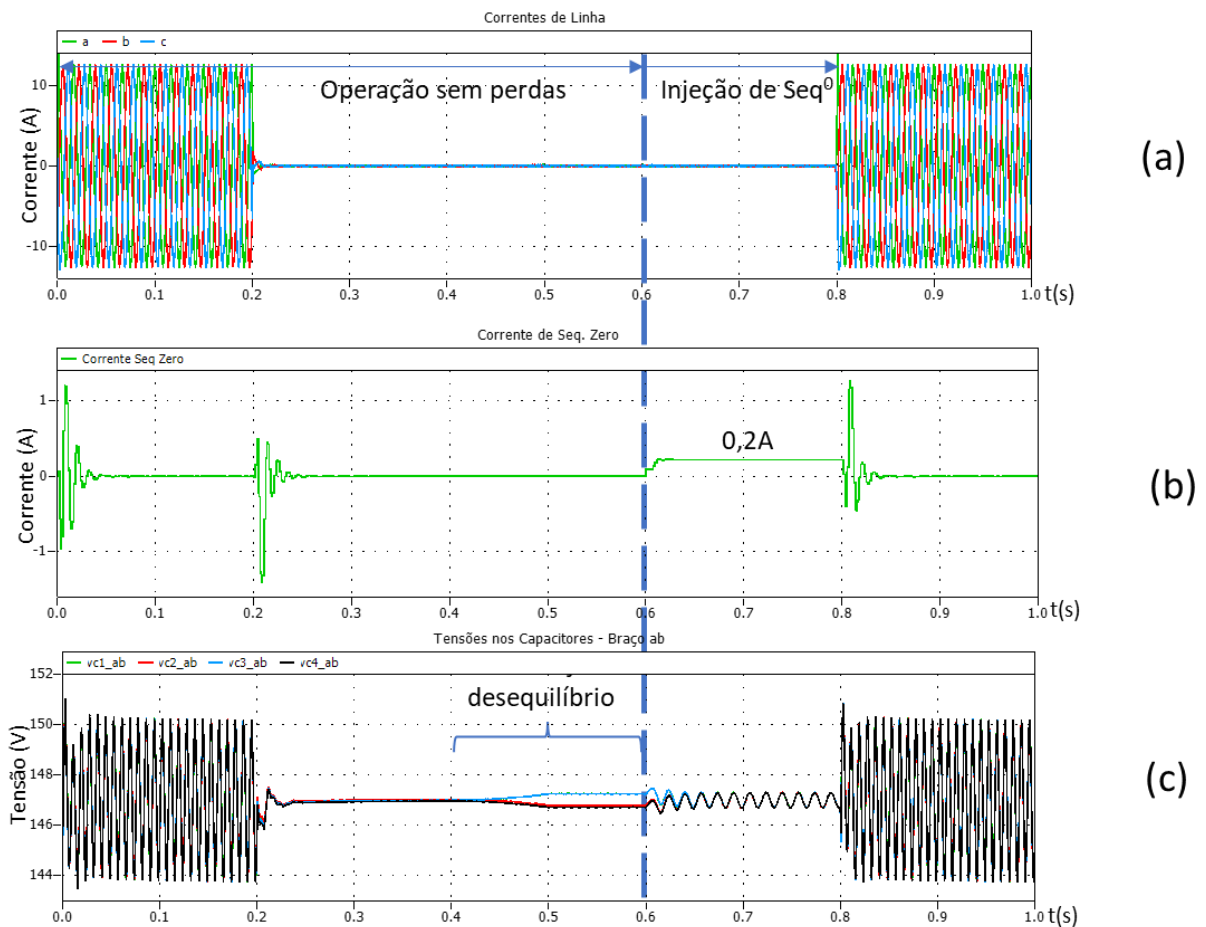


Fonte: Próprio autor

A Figura 7.39(a) apresenta a corrente de linha na rede durante a simulação onde sequência zero é injetada. A Figura 7.39(b) mostra o sinal de Seq_z produzido. Nota-se o nível de 0,2A contínuo no intervalo em que a estratégia é aplicada. A Figura 7.39(c) mostra o comportamento das tensões nos submódulos do braço onde o

desequilíbrio foi provocado. Como se observa, a injeção de Seq_z também leva à equalização das tensões que convergem para o valor médio da Tensão CC. Vale notar o *ripple* de 60Hz introduzido nas tensões CC. Isso se deve ao fato da corrente de Seq_z injetada ser contínua e produzir uma potência instantânea oscilante, com nível médio nulo, em 60Hz. O fato da potência média ser nula é chave para garantir que a estratégia não introduza desbalanços nas tensões CC dos braços.

Figura 7. 39 – Configuração Δ (SDBC) – Comportamento da Equalização Individual Com a injeção de Sequência Zero



Fonte: Próprio autor

Importante notar que essa componente de Seq_z não é produzida pela Malha de Balanceamento. É mais uma componente a ser adicionada à Referência da Malha de Controle da Corrente. Outro aspecto a ser notado é que essa corrente, combinada com as tensões CA dos braços não pode produzir desbalanços e, portanto, deve ser contínua ou ter frequência superior (múltiplo >1) à frequência fundamental da rede. Em [45], por exemplo, o método proposto produz um sinal de 3ª harmônica para realizar a ação de equalização.

7.2.4. Uma Última Avaliação Qualitativa

Em todos os casos simulados nos itens anteriores, as Indutâncias (L) e Perdas (R) no circuito de acoplamento, bem como as Capacitâncias (C) e Perdas (R_c) nos submódulos são iguais independente do braço do conversor. Contudo, na prática sabemos que essas grandezas variam com base na tolerância dos componentes utilizados.

Neste último subitem faz-se uma verificação do comportamento dos sistemas propostos com as grandezas acima citadas apresentando valores variados para cada braço/submódulo do conversor.

A proposta é realizar uma avaliação apenas qualitativa do comportamento dos sistemas operando nesta condição, buscando verificar se há eventuais alterações significativas em seus desempenhos. Não são realizadas medições detalhadas. Também não houve preocupação com rigor estatístico na atribuição de valores às grandezas citadas.

A Tabela 7.27 apresenta as condições simuladas para cada configuração, $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$. Procurou-se avaliar o comportamento das configurações na grande maioria das condições verificadas em mais detalhes nos itens anteriores.

A Tabela 7.28 apresenta os valores de L, R, C e R_c utilizados para cada braço dos conversores. Para a determinação dos valores, utilizou-se a função de geração de números aleatórios, $RAND()$ do *software* MS-Excel®, aplicada em (7.11) e assumindo uma tolerância de 20% para cada grandeza.

$$\text{Valor_usado} = \text{RAND}() * 0,4 * \text{Valor_Base} + 0,8 * \text{Valor_Base} \quad (7.11)$$

Onde Valor_Base é o valor apresentado na Tabela 6.1 para L,R,C, R_c

Tabela 7. 27 – Condições Simuladas Em Cada Configuração – Y(SSBC) e Δ (SDBC)

Condição	Intervalo	Comentário
Sistema Equilibrado	0.0s – 0.4s	Tensões e Correntes Equilibradas Modo Indutivo
Degrau de Amplitude na Corrente	0.4s – 0.8s	Tensões e Correntes Equilibradas Modo Indutivo
Degrau de Fase na Corrente	0.8s – 1.2s	Tensões e Correntes Equilibradas Modo Indutivo -> Capacitivo
Seq_n na Corrente.	1.2s – 1.6s	Tensões Equilibradas Correntes: Seq _p e Seq _n (50%)
Somente Seq_n na Corrente	1.6s – 2.0s	Tensões Equilibradas Correntes: Seq _n (100%)
Seq_n na Tensão	2.0s – 2.4s	Correntes Equilibradas Tensões: Seq _p e Seq _n (50%)
Corrente Nula	2,4s – 3,0s	Tensões Equilibradas Corrente Reativa = 0
Sistema Equilibrado	3,0s – 3,2s	Tensões e Correntes Equilibradas Modo Capacitivo
Afundamento Triplo	3,2s – 3,23s	Correntes Equilibradas Tensões do Gerador = 0
Sistema Equilibrado	3,23s – 3,6s	Tensões e Correntes Equilibradas Modo Capacitivo

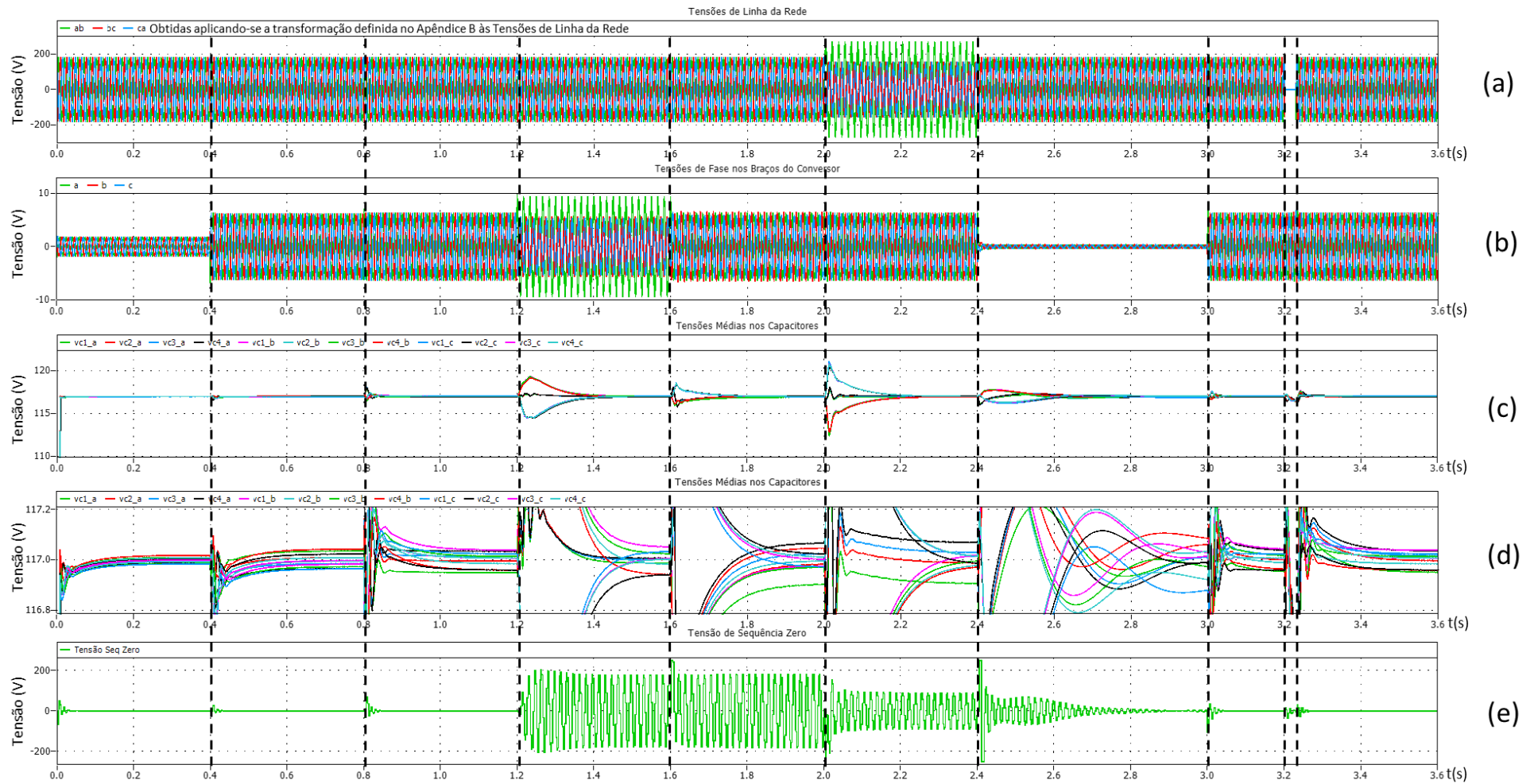
Tabela 7. 28 – Valores das Grandezas – $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$

Configuração	L(mH)	R(ohm)	C(μF)	Rc(ohm)
Y(SSBC)				
Braço a				
Circ. de Acopl.	9,9	0,94		
SM1			3743	6277
SM2			3194	6918
SM3			2939	6308
SM4			2740	6005
Braço b				
Circ. de Acopl.	10,1	1,04		
SM1			2740	6005
SM2			2824	6883
SM3			3216	5034
SM4			2914	5099
Braço c				
Circ. de Acopl.	10,1	1,12		
SM1			2802	4983
SM2			3579	5459
SM3			3073	6159
SM4			3139	7082
$\Delta(SDBC)$				
Braço ab				
Circ. de Acopl.	26	3,47		
SM1			951	5417
SM2			1178	5384
SM3			1036	5675
SM4			852	7313
Braço bc				
Circ. de Acopl.	24	2,70		
SM1			1191	5041
SM2			846	7066
SM3			987	5735
SM4			802	5826
Braço ca				
Circ. de Acopl.	28	2,93		
SM1			1055	6932
SM2			1009	6600
SM3			804	6297
SM4			807	5277

A seguir as Figuras 7.40 e 7.41 apresentam os resultados da simulação realizada com a configuração Y(SSBC). De forma geral, a variação introduzida nos valores das grandezas L, R, C, R_c , não compromete o funcionamento do conversor.

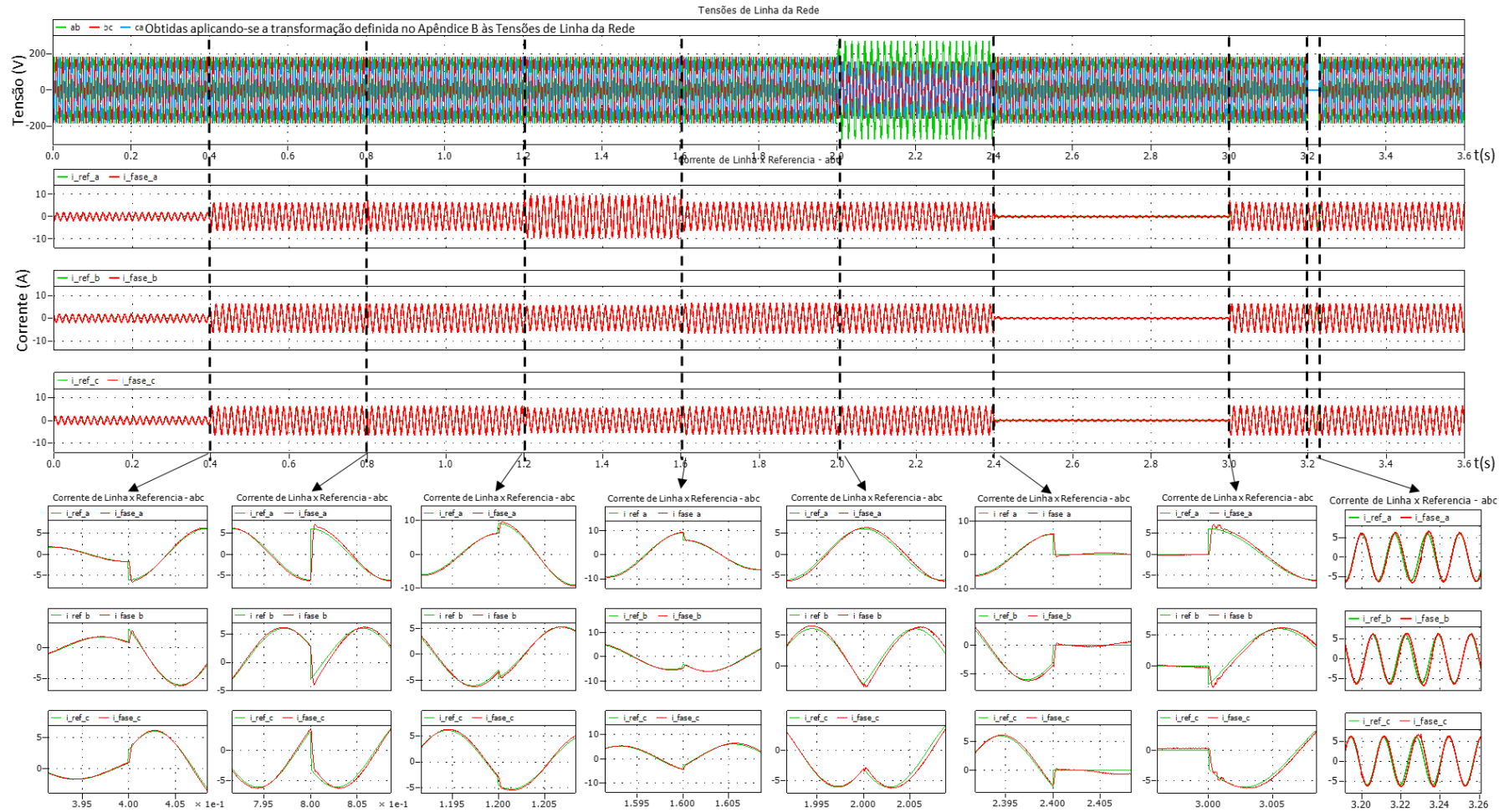
As figuras 7.40(a) e (b) apresentam as tensões nos braços do conversor e as correntes de linha da rede reproduzindo a sequência de eventos estabelecida na Tabela 7.27. A Figura 7.40(c) apresenta o comportamento das tensões CC nos capacitores (o *ripple* de 120Hz foi filtrado no sinal medido para facilitar a visualização). A Figura 7.40(d) apenas focaliza os sinais vistos em 7.40(c) em torno do valor médio de referência (117V). Observam-se pequenas diferenças (note a escala do eixo vertical) em relação ao valor médio de referência. Na Figura 7.40(e) é apresentado o sinal de tensão de Seq_z apresentando amplitudes significativas apenas nos intervalos onde o conversor opera em desbalanço ou nos transitórios após as mudanças de condições de operação. A Figura 7.41 apresenta uma visão mais detalhada das correntes de linha. Como se pode observar o comportamento do conversor é semelhante ao obtido nas simulações realizadas nos itens anteriores.

Figura 7. 40 – Configuração Y(SSBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28



Fonte: Próprio autor

Figura 7. 41 – Configuração Y(SSBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28



(a)

(b)

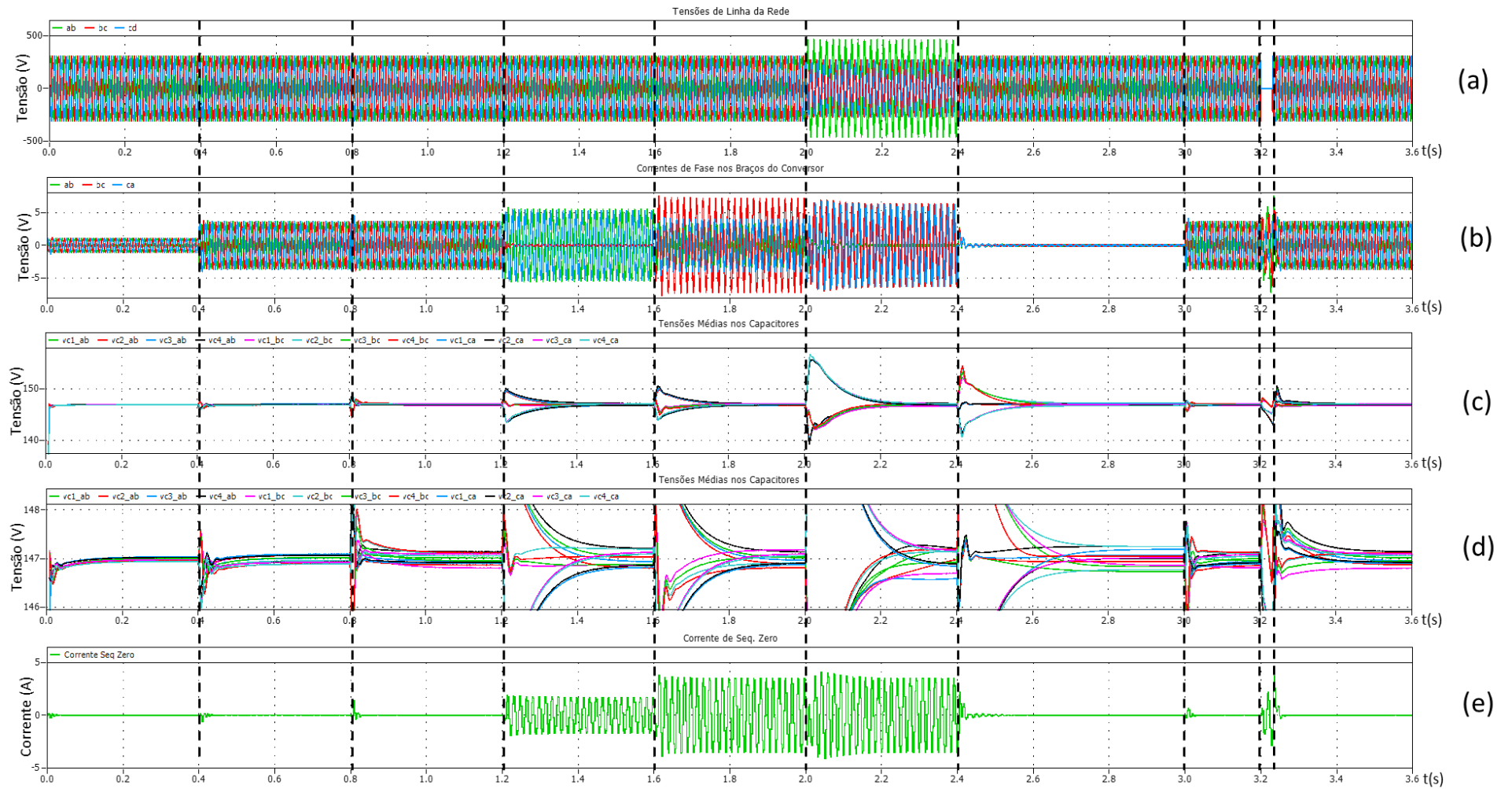
(c)

Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 7.42 e 7.43 são apresentados os resultados da mesma simulação realizada com a configuração Δ (SDBC). De forma geral, o desempenho é comparável ao observado na configuração Y(SSBC). No entanto, observa-se que, embora sejam relativamente muito pequenos em relação à tensão CC total, os desbalanços observados nas tensões CC individuais dos submódulos são relativamente maiores quando comparados aos obtidos na configuração Y(SSBC). Esse resultado parece indicar uma sensibilidade maior dessa configuração à variação introduzida nos valores de L,R,C,Rc⁵².

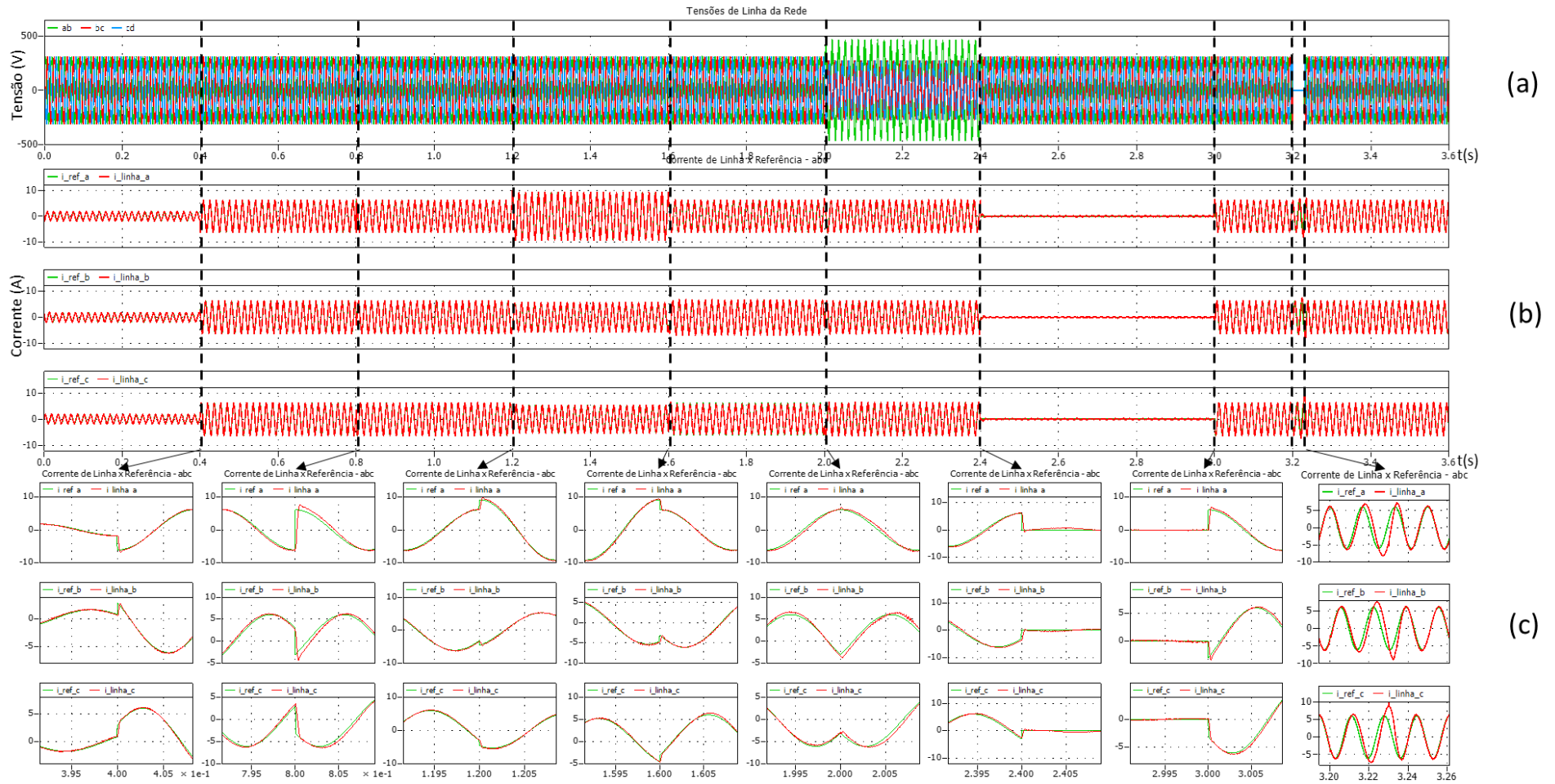
⁵² Dado o objetivo original desta simulação que buscava uma avaliação apenas qualitativa do comportamento das arquiteturas e a magnitude relativamente baixa dos desbalanços observados, o entendimento das diferenças observadas entre as duas configurações não será realizado neste trabalho.

Figura 7. 42 – Configuração Δ (SDBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28



Fonte: Próprio autor

Figura 7. 43 – Configuração Δ (SDBC) – Simulações Seguindo Condições das Tabelas 7.27 e 7.28



Fonte: Próprio autor

8. Conclusão

Este trabalho se propôs a estudar MMCCs operando como STATCOMs nas topologias Y(SSBC) e Δ (SDBC) no sistema de coordenadas natural, abc. A seguir faz-se uma revisão do que foi realizado dentro de cada objetivo estabelecido no Capítulo 2 (item 2.1).

Estudar o efeito das componentes simétricas das tensões e correntes sobre o fluxo de potência ativa total e em cada braço e seu impacto sobre as tensões CC do conversor (Capítulo 3)

O comportamento das parcelas de potência produzidas pelas combinações de tensões e correntes de sequências positiva, negativa e zero foi analisado. Combinações específicas que provocam o fluxo de potência ativa entre conversor e rede e entre os braços do conversor foram identificadas e avaliadas, através de simulações simplificadas, quanto à sua utilização em arquiteturas de controle da tensão CC nos braços do conversor. Com base nas análises e avaliações realizadas conclui-se que:

- Por promover um fluxo equilibrado de potência ativa entre a rede e conversor, a injeção de corrente de mesma sequência e fase da tensão habilita a Regulação da Média Global das Tensões CC dos braços do conversor. O fluxo de potência equilibrado não altera o Balanceamento das tensões CC dos braços.
- A injeção de tensão de sequência zero, na configuração Y(SSBC), ou corrente de sequência zero, na configuração Δ (SDBC), por permitir o controle do fluxo de potência ativa em cada braço, sem produzir potência trifásica (soma das potências produzidas nos braços é nula) habilita o Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor. A ausência de fluxo de potência ativa trifásica não altera a Média Global das tensões.
- A Equalização Individual das tensões CC dos submódulos de cada braço pode ser realizada controlando-se a potência ativa produzida em cada submódulo individualmente. O controle deve se dar através da imposição de ajustes individuais de tensão em fase com a corrente do braço para cada submódulo. Garantindo-se que a somatória dos ajustes seja nula, a tensão total no braço do conversor não sofre alterações.

Tais constatações são a base para arquiteturas de controle que realizam a Regulação da Média Global, Balanceamento e Equalização das tensões CC nos braços e submódulos do conversor separadamente.

Discutir arquiteturas de controle para conversores Y(SSBC) e Δ (SDBC), à luz da discussão sobre efeito das componentes simétricas nas potências. (Capítulo 4)

Para um conversor MMCC operando como STATCOM, os objetivos básicos de controle a serem atingidos são:

- Injetar corrente reativa na rede de acordo com uma referência, impondo uma tensão nos braços do conversor gerada através da modulação das tensões CC dos submódulos que os compõem.
- Regular as tensões CC dos submódulos de cada braço.

Estes dois objetivos representam a imposição de 2 (duas) correntes, no caso Y(SSBC), ou 3 (três) correntes, no caso Δ (SDBC) e 3N tensões a partir de 3N entradas (submódulos do conversor) caracterizando um sistema subatuado. Com base nas constatações do Capítulo 3, a arquitetura proposta para as duas configurações estudadas trata esse problema por meio de um sistema que combina malhas atuando em cascata e em paralelo.

Uma malha de Controle da Corrente e uma outra malha de Regulação da Média Global das tensões CC dos braços, conectadas em cascata, formam um primeiro laço interno de controle que injeta as componentes reativa, proveniente de uma referência externa, e ativa da corrente, proveniente da Malha de Regulação da Média Global. Uma terceira malha se conecta à Malha de Corrente somando à sua entrada, na topologia Δ (SDBC), uma referência de corrente de sequência zero ou, à sua saída, na topologia Y(SSBC), uma referência de tensão de sequência zero responsável por realizar o Balanceamento das tensões CC dos braços. Importante notar que a ação das malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC se dá de forma desacoplada em relação à malha de Controle da Corrente Injetada.

Em cada braço, compondo um segundo laço de controle atuando de forma desacoplada e em paralelo com aquele formado pelas malhas de Corrente e de Regulação e Balanceamento das tensões CC dos braços, um conjunto de malhas realiza a Equalização Individual das tensões CC de cada submódulo que compõe os braços do conversor.

Obter modelos linearizados e simplificados que permitam o projeto das diversas malhas de controle em tempo contínuo e propor um método para ajuste de controladores. (Capítulos 5 e 6)

Realizou-se a modelagem das plantas para cada uma das malhas estabelecidas na arquitetura proposta: i) Malha de Corrente; ii) Malha de Regulação da Média Global das tensões CC dos braços; iii) Malha de Balanceamento das tensões CC dos braços; iv) Malhas de Equalização Individual das tensões CC dos submódulos dos braços.

Modelos linearizados e desacoplados foram obtidos considerando as seguintes premissas de simplificação: i) Na modelagem da planta da Malha de Corrente, o conversor é considerado um bloco ideal de ganho unitário; ii) Na modelagem das plantas das malhas de Controle da Tensão CC a Malha de Corrente é considerada um bloco ideal.

A estratégia de controle proposta empregou controladores PI nas malhas de controle da Corrente e nas malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC dos braços do conversor. As malhas de Equalização Individual empregaram controladores do tipo P. A utilização dos referidos tipos de controladores nas respectivas malhas foi justificado.

Estudou-se, também, os efeitos negativos do *ripple* de 2ª Harmônica presente nas tensões dos capacitores dos submódulos e a necessidade do uso de Filtros Passa-Baixa (FPB) nas malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC.

Métodos para o ajuste dos controladores das malhas foram propostos considerando o atraso de cálculo na Malha de Corrente e o uso de FPBs nas malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC.

Adicionalmente, os apêndices D e E propõem métodos para a definição da tensão no Barramentos CC dos braços com base na corrente nominal e nas características do circuito de acoplamento e, para o cálculo do valor dos capacitores com base em um percentual de *ripple* pré-definido.

Seguem as principais constatações derivadas desta etapa do trabalho:

Em sistemas discretos, em que a Malha de Corrente faz uso de controladores PI e da estratégia de *feedforward* para a compensação do distúrbio causado pela tensão da rede, tem-se uma solução de compromisso que requer atenção aos seguintes fatores:

- O erro de rastreamento não é nulo para $\omega > 0$.
- O *feedforward* da tensão da rede não é totalmente eficaz devido ao atraso de cálculo.
- O distúrbio da rede, por não ser totalmente eliminado, introduz erro na corrente injetada (magnitude e fase) que aumenta em termos relativos na medida que diminui a amplitude da corrente injetada. Além disso, faz com que o desempenho no rastreamento das correntes seja diferente para cargas indutiva e capacitiva.
- O aumento do ganho proporcional com o objetivo de reduzir erros de rastreamento é limitado uma vez que diminui a margem de fase podendo levar à perda de controle no sistema.

A redução de perdas no conversor e a mudança de arquitetura fazendo uso de controladores P-Ressonante na Malha de Corrente são alternativas que podem reduzir significativamente os detratores de desempenho citados acima.

No projeto das malhas de controle das Tensões CC:

- O uso FPBs nas malhas de Regulação da Média Global e de Balanceamento das tensões CC dos braços é fundamental para evitar a introdução de componentes de 3ª Harmônica na corrente injetada e redução da faixa de operação do conversor.
- A introdução de FPBs, por sua vez, força a redução da Frequência de *Crossover* das malhas de controle das tensões CC dos braços tornando-as mais lentas, com tempos de estabilização que consomem vários ciclos de rede.
- As malhas de controle da tensão CC podem operar com controladores P exceto a malha de Balanceamento em que controladores PI são necessários para garantir uma boa atenuação da perturbação gerada na operação em desbalanceo.
- Dado que atuam em sinais contínuos e podem trabalhar com tempos de resposta consideravelmente maiores que os tempos de amostragem do sistema,

o projeto de todas as malhas de controle das tensões CC pode ser realizado desconsiderando o atraso de cálculo.

Validação dos modelos e avaliação do desempenho das arquiteturas de controle apresentados através de simulações numéricas. (Capítulo 7)

Um extenso roteiro de testes foi cumprido em duas etapas.

Na primeira etapa buscou-se avaliar a capacidade da modelagem das plantas e do projeto das malhas de controle propostos nos Capítulos 5 e 6, representado por um modelo simplificado e linearizado (Modelo M), de reproduzir o comportamento de um sistema experimental, representado neste trabalho por um modelo de simulação trifásico (Modelo P), em que limites de saturação nos controladores e no conversor, a modulação PWM e eventuais acoplamentos entre as malhas de controle estão presentes.

Na segunda etapa, fazendo uso do Modelo P, avaliou-se o desempenho das arquiteturas propostas em várias situações específicas incluindo desbalanços de corrente e tensão.

Das simulações realizadas conclui-se que:

- O modelo linearizado e simplificado proposto tem capacidade de representar e reproduzir, com fidelidade, o comportamento esperado de um sistema experimental.
- O projeto das várias malhas de controle e o método de ajuste dos controladores proposto é suficientemente preciso e garante previsibilidade no comportamento do sistema ajustado.
- O comportamento da arquitetura de controle proposta, independentemente da configuração, $Y(SSBC)$ ou $\Delta(SDBC)$, tanto em condições balanceadas (presença exclusiva de sequência positiva na tensão da rede e na corrente injetada) como em condições de desbalanço (presença de sequência negativa na tensão da rede ou na corrente injetada), é equivalente e próximo ao observado nas arquiteturas utilizadas nos artigos de referência [19] [23], que serviram como padrão de comparação.

- O desenvolvimento do sistema de controle totalmente no sistema de coordenadas natural, abc, considerado o conjunto das situações/condições verificadas no trabalho, não impôs dificuldades de projeto ou deficiências de desempenho que possam justificar sua pouca utilização.

Do ponto de vista do projeto e implementação, o desenvolvimento no sistema abc é bastante simplificado na medida que dispensa transformações entre sistemas de coordenadas e possibilita o desacoplamento das fases no projeto da Malha de Corrente que pode trabalhar com a injeção de corrente de qualquer sequência, de forma indistinta. Já uma implementação no sistema de referência dq requer malhas de controle mais complexas com controladores separados para a injeção simultânea de corrente de sequência positiva e negativa. Importante lembrar também que o Balanceamento das Tensões CC dos braços, uma vez que requer o controle do fluxo de potência em cada fase de forma individual, é necessariamente implementado no sistema abc o que torna o projeto neste sistema de coordenadas mais simples e direto.

Se nesse sistema de coordenadas, o uso de controladores PI na Malha de Corrente não elimina erros de rastreamento e exige o *feedforward* da tensão da rede, é importante lembrar que a utilização de controladores do tipo P-Ressonante pode contornar tais fragilidades.

- No que tange o Balanceamento das tensões CC dos braços, o método instantâneo para determinação da componente de sequência zero de tensão, no caso da configuração Y(SSBC), ou de corrente, no caso da configuração Δ (SDBC), mostra-se bastante eficaz e de implementação bastante simples quando comparada a outros métodos que envolvem cálculos mais extensos e complexos para a determinação da amplitude e fase dos referidos sinais.

Na configuração Y(SSBC) o método depende da corrente de linha para sintetizar o sinal de tensão de sequência zero. Essa dependência traz uma sensibilidade maior da arquitetura em situações em que a corrente injetada é muito pequena ou, em uma condição extrema, nula. Nessa situação a configuração Δ (SDBC) oferece mais robustez uma vez que a síntese do sinal de corrente de sequência zero não apresenta esta dependência.

Na condição extrema em que há afundamentos totais nas fases do gerador (ZVRT) a maior sensibilidade se revela na configuração Δ (SDBC). O desbalanço provocado pelos afundamentos leva a Malha de Balanceamento das tensões CC a injetar corrente de sequência zero com amplitudes elevadas exigindo capacidade dos circuitos de chaveamento de lidar com níveis de corrente consideravelmente acima da corrente máxima de operação estipulada para o conversor. Na configuração Y(SSBC) como o desbalanço é compensado com imposição de tensão de sequência zero, a corrente nos circuitos de chaveamento não é afetada.

- Em uma comparação direta entre as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC), verificou-se que a configuração Y(SSBC) é mais sensível a desbalanços na corrente injetada. O aumento da proporção de sequência negativa em relação a sequência positiva na corrente causa um crescimento acelerado da tensão mínima requerida nos Barramentos CC que tende ao infinito quando a proporção é de 1:1.

Em linha com a dualidade existente entre as configurações, a configuração Δ (SDBC) é mais sensível a desbalanços na tensão da rede. O aumento da proporção de sequência negativa em relação a sequência positiva causa um crescimento acelerado da corrente no delta, tendendo ao infinito quando a proporção é de 1:1.

Do ponto de vista da aplicação prática como STATCOM, como observado em [10] [11], a menor sensibilidade a desbalanços na corrente injetada, o fato de apresentar um grau de liberdade a mais ao permitir a injeção de corrente de sequência zero (corrente circulante) e, com isso, o fluxo de potência entre os braços, tornam a configuração Δ (SDBC) adequada à operação em que a injeção concomitante de corrente de sequência positiva e negativa é requerida (por exemplo, compensação de *flicker*).

A configuração Y(SSBC), devido à sua maior sensibilidade a desbalanços na corrente injetada que exige a elevação das tensões de operação dos barramentos CC dos braços do conversor, é usualmente utilizada em aplicações em que se requer apenas injeção de corrente de sequência positiva. Nessa condição a configuração se apresenta como uma opção interessante dada sua

maior simplicidade expressa em malhas de controle mais simples (número menor de controladores na malha de Controle da Corrente) e tensões mais baixas nos barramentos CC o que, em princípio, requer um menor número de submódulos por braço ainda que operando com correntes maiores.

Com o objetivo de complementar o estudo realizado neste trabalho o autor considera as seguintes possibilidades futuras:

- Implementação prática e avaliação de desempenho das arquiteturas propostas na plataforma modular para experimentos com conversores multinível desenvolvida pelo Laboratório de Eletrônica de Potência do PEA-EPUSP [\[41\]](#).
- Estudo e implementação de melhorias nas arquiteturas propostas substituindo controladores PI por controladores P-Ressonante na Malha de Corrente.
- Extensão do estudo à topologia DSCC (*Double Star Chopper Cell*).

Referências

- [1] [Electricity Market Report 2023 – Analysis - IEA](#)
- [2] S. Duan et al., "Current Situation and Prospect of Grid Codes for a Power System with Integrated Photovoltaic Generation," 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), Perth, Australia, 2020, pp. 832-836, doi: 10.1109/SGES51519.2020.00153.
- [3] L. Yan, C. Yongning, T. Haiyan, T. Xinshou, Z. Zhankui and J. Jianqing, "Common Focus and New Requirement on Technical Standards of Renewable Energy Grid Integration," 2019 Chinese Automation Congress (CAC), Hangzhou, China, 2019, pp. 3719-3723, doi: 10.1109/CAC48633.2019.8996943.
- [4] J. Paramalingam, F. Nakamura, A. Matsuda, D. Yamanaka and T. Tsuchiya, "Application of FACTS Devices for a Dynamic Power System within the USA," 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, Japan, 2018, pp. 2329-2334, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507559.
- [5] A. Siddique, Y. Xu, W. Aslam and M. Rasheed, "A Comprehensive Study on FACTS Devices to Improve the Stability and Power Flow Capability in Power System," 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC), Chengdu, China, 2019, pp. 199-205, doi: 10.1109/APEEC.2019.8720685.
- [6] Y. Ma, A. Huang and X. Zhou, "A review of STATCOM on the electric power system," 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2015, pp. 162-167, doi: 10.1109/ICMA.2015.7237475.
- [7] CAVALIERE, CARLOS ANDRÉ CARREIRO Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados [Rio de Janeiro] 2001 XXI, 191 p. 29,7 cm (COPPE / UFRJ, M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, 2001) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE
- [8] O. K. Shinde and V. R. S. V. B. Pulavarthi, "STATCOM converters and control: A review," 2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI), Pune, India, 2017, pp. 145-151, doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073500.
- [9] D. S. Nikam and V. N. Kalkhambkar, "STATCOM and Multilevel VSC Topology: A Review," 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT), Coimbatore, India, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8551170.
- [10] H. Akagi, "Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC)," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3119-3130, Nov. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2143431.

- [11] Cupertino, Allan Fagner. "Modelling, design and fault-tolerant strategies for modular multilevel cascaded converter-based STATCOMs" Allan Fagner Cupertino - 2019. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- [12] Shahnia, F., S. Rajakaruna, and A. Ghosh. *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*. Springer Singapore, 2015. Web. DOI: 10.1007/978-981-287-281-4
- [13] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, June 2008, doi: 10.1109/MIE.2008.923519.
- [14] G. S. Konstantinou and V. G. Agelidis, "Performance evaluation of half-bridge cascaded multilevel converters operated with multicarrier sinusoidal PWM techniques," 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, China, 2009, pp. 3399-3404, doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138833.
- [15] V. G. Agelidis and M. Calais, "Application specific harmonic performance evaluation of multicarrier PWM techniques," *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No.98CH36196)*, Fukuoka, Japan, 1998, pp. 172-178 vol.1, doi: 10.1109/PESC.1998.701896.
- [16] S. Du, J. Liu, J. Lin and Y. He, "A Novel DC Voltage Control Method for STATCOM Based on Hybrid Multilevel H-Bridge Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 101-111, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2195508.
- [17] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.881997.
- [18] L. Maharjan, S. Inoue and H. Akagi, "A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter with Star Configuration," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 5, pp. 1621-1630, Sept.-Oct. 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.2002180.
- [19] E. Behrouzian and M. Bongiorno, "Investigation of Negative-Sequence Injection Capability of Cascaded H-Bridge Converters in Star and Delta Configuration," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1675-1683, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2554322.
- [20] I. Marzo, A. Sanchez-Ruiz, J. A. Barrena, G. Abad and I. Muguruza, "Power Balancing in Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters Under Unbalanced Operation: A Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110525-110543, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103337.
- [21] M. Hagiwara, R. Maeda and H. Akagi, "Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter (MMCC-SDBC)," 2011 IEEE Energy

Conversion Congress and Exposition, Phoenix, AZ, USA, 2011, pp. 3728-3735, doi: 10.1109/ECCE.2011.6064275. Published in: IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 48, Issue: 2, March-April 2012). Patent No. US10103645B2

[22] J. I. Y. Ota, Y. Shibano, N. Niimura and H. Akagi, "A Phase-Shifted-PWM D-STATCOM Using a Modular Multilevel Cascade Converter (SSBC)—Part I: Modeling, Analysis, and Design of Current Control," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 279-288, Jan.-Feb. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2326079.

[23] J. I. Y. Ota, Y. Shibano and H. Akagi, "A Phase-Shifted PWM D-STATCOM Using a Modular Multilevel Cascade Converter (SSBC)—Part II: Zero-Voltage-Ride-Through Capability," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 289-296, Jan.-Feb. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2326078.

[24] F. Z. Peng and Jin Wang, "A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, 2004, pp. 3529-3533 Vol.5, doi: 10.1109/PESC.2004.1355099.

[25] Z. Liu, B. Liu, S. Duan and Y. Kang, "A Novel DC Capacitor Voltage Balance Control Method for Cascade Multilevel STATCOM," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 14-27, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2010.2050337.

[26] J. Chen, R. Wang, C. Liu and H. Li, "Sensorless Capacitor Voltage Detection Method of Cascaded H-Bridge STATCOM Based on Special Switching Mode Identification," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 12, pp. 12181-12189, Dec. 2023, doi: 10.1109/TIE.2023.3236101.

[27] J. Li, S. Wang, R. Zhang, J. Ma, X. Liao and T. Liu, "Cascaded H-bridge Converters with Sensorless Voltage Balance through Parallel Branches," 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China, 2022, pp. 798-802, doi: 10.1109/SPIES55999.2022.10081975.

[28] Z. Yang et al., "Individual DC voltage balancing method at zero current mode for cascaded H-bridge based static synchronous compensator," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017, pp. 1511-1517, doi: 10.1109/APEC.2017.7930899.

[29] L. Maharjan, T. Tajyuta, K. Maruyama, A. Suzuki and A. Toba, "Development and Verification Test of the 6.6-kV 200-kVA Transformerless SDBC-Based STATCOM Using SiC-MOSFET Modules," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 12, pp. 13687-13696, Dec. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2995159.

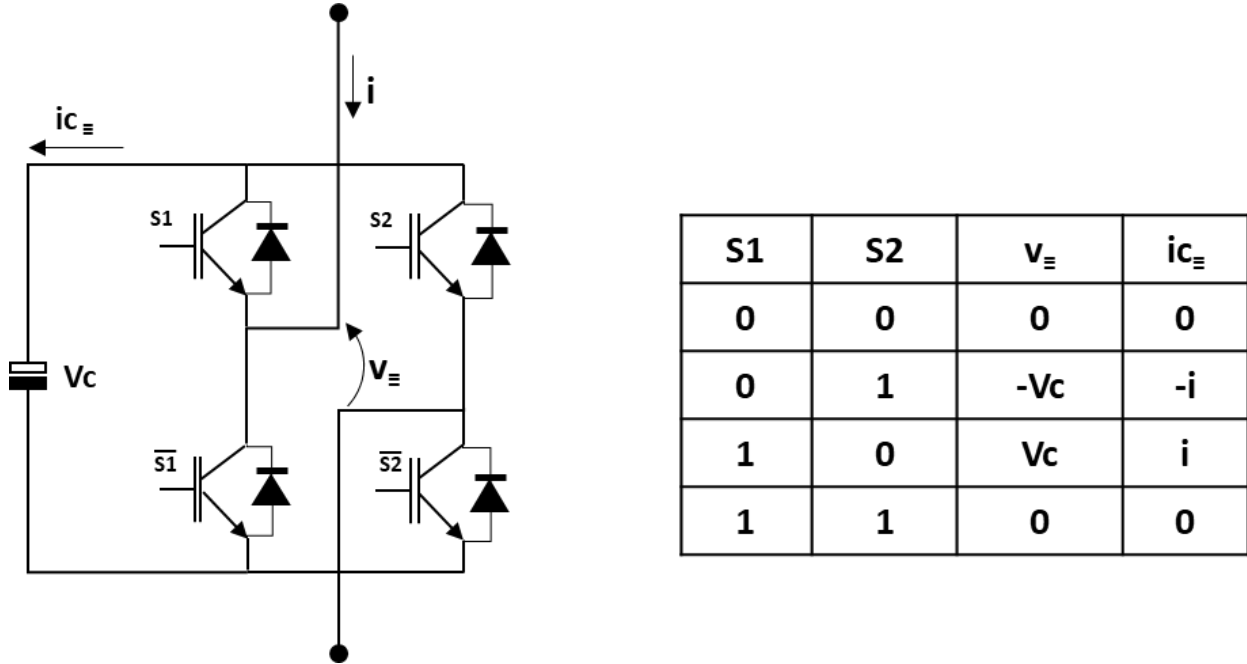
- [30] E. Behrouzian and M. Bongiorno, "DC-link voltage modulation for individual capacitor voltage balancing in cascaded H-bridge STATCOM at zero current mode," 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Riga, Latvia, 2018, pp. P.1-P.10.
- [31] L. F. Encarnação and M. Aredes, "Proposta de um Chaveamento PWM Otimizado para um Conversor Multinível em Cascata Assimétrico", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 17, no. 3, pp. 601–608, Aug. 2012.
- [32] Matakas Junior, Lourenço, "Implementação de controladores para conversores trifásicos, sem transformações de coordenadas: análise geométrica através de vetores espaciais" / L. Matakas Junior. – São Paulo 2012
- [33] Simone Buso and Paolo Matavelli, *Digital Control in Power Electronics* – Morgan & Clayton Publishers – ISBN-10:1598291122; ISBN-13:978-1598291124; ISBN-10:1598291130; ISBN-13:9781598291131; DOI:10.2200/S00047ED1V01Y200609PEL002
- [34] F. Z. Peng, J. W. McKeever and D. J. Adams, "Cascade multilevel inverters for utility applications," *Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* (Cat. No.97CH36066), New Orleans, LA, USA, 1997, pp. 437-442 vol.2, doi: 10.1109/IECON.1997.671773.
- [35] F. Toledo Ghetti, A. de Oliveira Almeida, P. Machado de Almeida and P. Gomes Barbosa, "Simulação Em Tempo Real De Algoritmos De Equalização Das Tensões Cc De Um Conversor Multinível Modular", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 22, no. 4, pp. 362–371, Dec. 2017.
- [36] C. -t. Lee et al., "Average Power Balancing Control of a STATCOM Based on the Cascaded H-Bridge PWM Converter With Star Configuration," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3893-3901, Nov.-Dec. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2312618.
- [37] N. Hatano and T. Ise, "Control Scheme of Cascaded H-Bridge STATCOM Using Zero-Sequence Voltage and Negative-Sequence Current," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 543-550, April 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2035221.
- [38] N. Bisht and A. Das, "A Fundamental Zero-sequence Voltage Injection Technique for Multiple Fault Operation of Cascaded H-Bridge STATCOM," 2021 National Power Electronics Conference (NPEC), Bhubaneswar, India, 2021, pp. 01-06, doi: 10.1109/NPEC52100.2021.9672545.
- [39] P. H. I. Hayashi and L. Matakas, "Decoupled stationary ABC frame current control of three-phase four-leg four-wire converters," 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257268.

- [40] D. G. Holmes, T. A. Lipo, B. P. McGrath and W. Y. Kong, "Optimized Design of Stationary Frame Three Phase AC Current Regulators," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 11, pp. 2417-2426, Nov. 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2029548.
- [41] L. Koleff, "A Flexible DSP-FPGA Based Platform for Experiments with Modular Multilevel Cascade Converters", Revista Eletrônica de Potência, vol. 25, no. 2, pp. 185–197, Jun. 2020.
- [42] Enomoto, Kelly Mingorancia de Carvalho, "Uma proposta de modelagem e controle para conversores MMC em frequência fixa", K. C. M. C. Enomoto – São Paulo, 2019
- [43] R. E. Betz, T. Summers and T. Furney, "Symmetry Compensation using a H-Bridge Multilevel STATCOM with Zero Sequence Injection," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006, pp. 1724-1731, doi: 10.1109/IAS.2006.256768.
- [44] P. -H. Wu, Y. -T. Chen and P. -T. Cheng, "The Delta-Connected Cascaded H-Bridge Converter Application in Distributed Energy Resources and Fault Ride Through Capability Analysis," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4665-4672, Sept.-Oct. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2702110.
- [45] M. Nieves, J. M. Maza, J. M. Mauricio, R. Teodorescu, M. Bongiorno and P. Rodríguez, "Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation," 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta, Finland, 2014, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2014.6911014.
- [46] Yaro Burian Jr., Ana Cristina Cavalcanti Lyra - Circuitos Elétricos — São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006 – ISBN 978-85-7605-072-8 - CDD-621.319207
- [47] Martinz, Fernando Ortiz, Estudo de técnicas de controle de corrente CA em conversores VSC-PWM em sistemas de coordenadas estacionárias ABC / F.O. Martinz. – Versão corr. -- São Paulo, 2013
- [48] N. R. N. Ama, W. Komatsu, and L. M. Junior, "Single and three phase moving average filter PLLs: Digital controller design recipe," Electr. Power Syst. Res., vol. 116, pp. 276–283, 2014.
- [49] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, July 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2014236.

Apêndice A – Modelo do Lado CC do Conversor

A figura abaixo apresenta o circuito simplificado de um submódulo baseado em uma ponte H cujas chaves são acionadas pelos sinais PWM S1 e S2.

Figura A. 1 – Circuito simplificado do submódulo baseado em ponte H



Fonte: Próprio autor

De acordo com a tabela apresentada na Figura A.1 acima temos:

$$v_{\equiv} = (S1 - S2)V_c = S.V_c \quad (\text{A. 1})$$

$$i_{c_{\equiv}} = (S1 - S2)i = S.i \quad . 2)$$

Considerando o período de chaveamento, T , o valor médio local, m , de S no tempo, é dado por (A.3).

$$m = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t S(\tau) d\tau \quad (\text{A. 3})$$

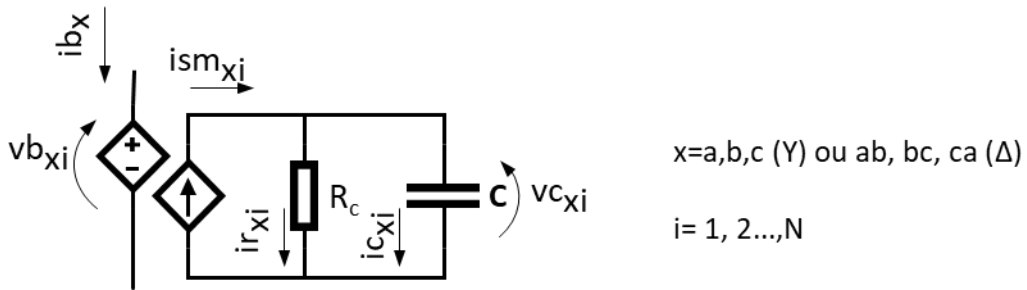
Portanto, a média local de v_{\equiv} e $i_{c_{\equiv}}$ é dada por:

$$v = mV_c \quad (\text{A. 4})$$

$$i_{c_{\equiv}} = mi \quad (\text{A. 5})$$

A partir das relações (A.4) e (A.5) podemos estabelecer modelo equivalente para o submódulo apresentado na Figura A.2.

Figura A. 2 - Modelo equivalente do submódulo



Fonte: Próprio autor

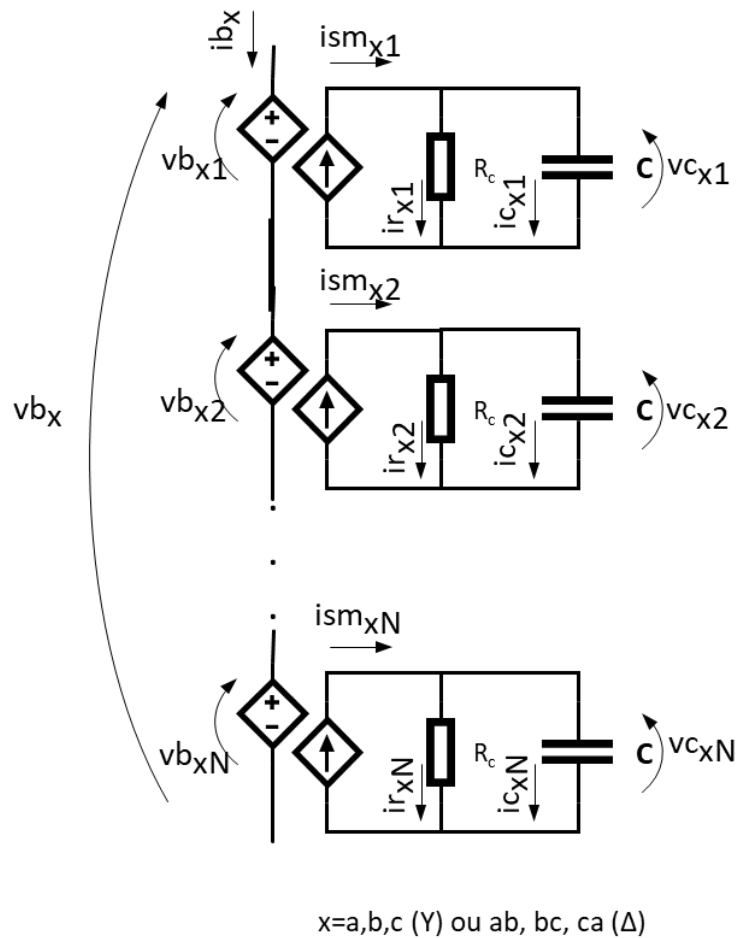
As relações (A.4) e (A.5) são reescritas para o modelo apresentado como segue.

$$v_{b_{xi}} = m_{xi} v_{c_{xi}} \tag{A. 6}$$

$$i_{sm_{xi}} = m_{xi} i_{b_x} \tag{A. 7}$$

O modelo para um único submódulo pode ser estendido para um braço do conversor com N submódulos como mostra a Figura A.3.

Figura A. 3 - Modelo equivalente de um braço do conversor



Fonte: Próprio autor

Da figura pode-se extrair a seguinte relação:

$$vb_x = \sum_{i=1}^N vb_{xi} \quad (\text{A. 8})$$

E, se $vb_{xi} = m_{xi}vc_{xi}$ então:

$$vb_x = \sum_{i=1}^N m_{xi}vc_{xi} \quad (\text{A. 9})$$

Considerando que, em regime, as tensões nos capacitores se estabilizam em um valor, vc_x , e que os índices de modulação para cada submódulo tendem ao mesmo valor, m_x , pode-se escrever:

$$vb_x = \sum_{i=1}^N m_x vc_x = m_x Nvc_x \quad (\text{A. 10})$$

ou,

$$vb_x = m_x vceq_x \quad (\text{A. 11})$$

Onde

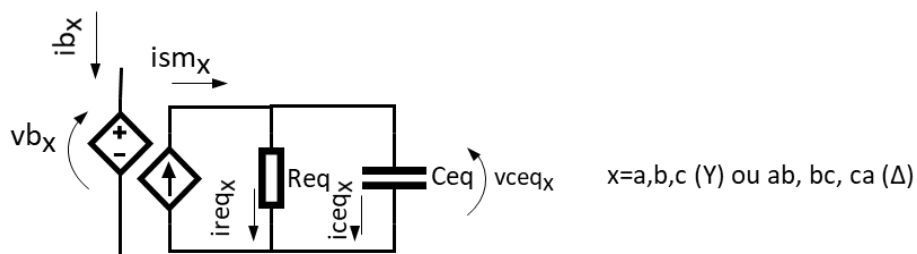
$$vceq_x = Nvc_x \quad (\text{A. 12})$$

Ainda, considerando que os índices de modulação se igualam e a corrente no braço é a mesma para todos os submódulos, conclui-se que as correntes nos lados CC dos submódulos são iguais.

$$ism_{xi} = ism_x = m_x ib_x \quad (\text{A. 13})$$

Dessa forma, o modelo para o braço do conversor pode ser consolidado como mostra a Figura A.4.

Figura A. 4 - Modelo equivalente consolidado de um braço do conversor



Fonte: Próprio autor

Nesse modelo os valores de R e C são concatenados nas resistência e capacitância equivalentes R_{eq} e C_{eq} e seus valores são determinados a seguir.

Sabendo que, em regime, as tensões CC nos submódulos são iguais e que a corrente, i_{bx} , é a mesma para todos os submódulos de um braço, podemos afirmar que:

$$i_{c_{xi}} = i_{c_{eq_x}} = i_{c_x} \quad (\text{A. 14})$$

$$i_{r_{xi}} = i_{r_{eq_x}} = i_{r_x} \quad (\text{A. 15})$$

Portanto, se a tensão nos capacitores dos submódulos é dada por:

$$v_{c_x} = \frac{1}{C} \int i_{c_x} dt \quad (\text{A. 16})$$

Substituindo (A.16) em (A.12) obtém-se:

$$v_{c_{eq_x}} = \frac{N}{C} \int i_{c_x} dt \quad (\text{A. 17})$$

Ou,

$$v_{c_{eq_x}} = \frac{1}{C_{eq}} \int i_{c_x} dt \quad (\text{A. 18})$$

Onde

$$C_{eq} = \frac{C}{N} \quad (\text{A. 19})$$

Ao mesmo tempo, considerando que:

$$v_{c_x} = R_c i_{r_x} \quad (\text{A. 20})$$

Pode-se escrever:

$$N v_{c_x} = N R_c i_{r_x} \quad (\text{A. 21})$$

Ou,

$$v_{c_{eq_x}} = R_{eq} i_{r_x} \quad (\text{A. 22})$$

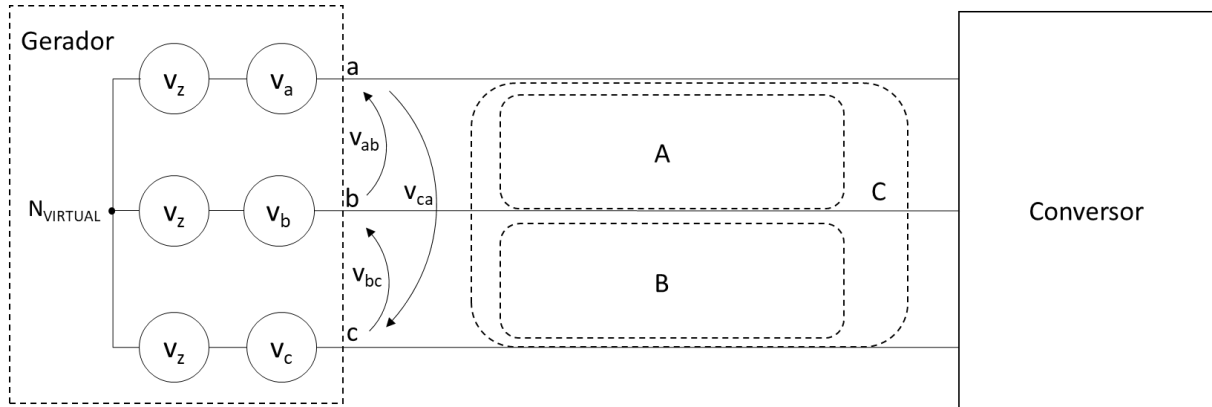
Onde

$$R_{eq} = N R_c \quad (\text{A. 23})$$

Apêndice B - Modelo da Rede a 3 fios

No circuito da Figura B.1 o conversor conecta-se à rede em 3 fios que pode ser modelada considerando seus geradores conectados em Y como apresentado.

Figura B.1 – Conexão em 3 fios – Rede modelada em Y



Fonte: Próprio autor

Considera-se que as tensões de fase produzidas pelos geradores possuem componentes de soma instantaneamente nula, v_a , v_b , v_c e uma componente de sequência zero, v_z , que depende do ponto neutro, $N_{VIRTUAL}$, escolhido.

Observa-se, contudo, que a componente de sequência zero não tem influência nas equações das malhas de tensão A, B e C, pois:

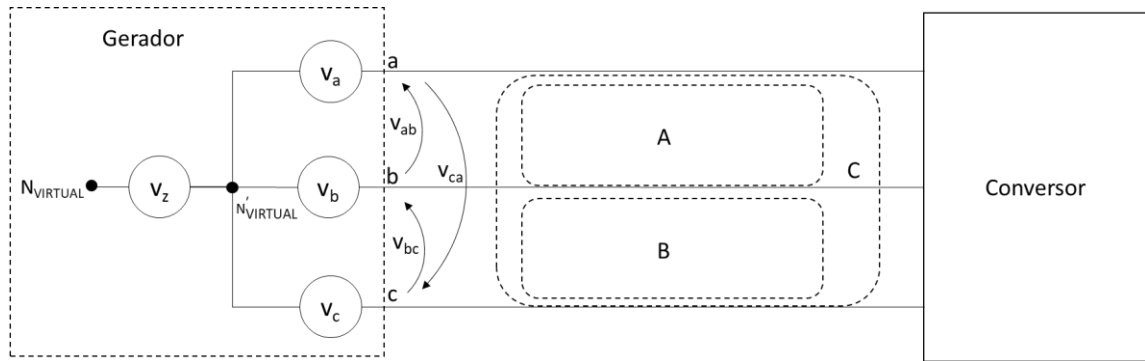
$$v_{ab} = (v_a + v_z) - (v_b + v_z) = v_a - v_b \quad (\text{B. 1})$$

$$v_{bc} = (v_b + v_z) - (v_c + v_z) = v_b - v_c \quad (\text{B. 2})$$

$$v_{ca} = (v_c + v_z) - (v_a + v_z) = v_c - v_a \quad (\text{B. 3})$$

O circuito pode, portanto, ser modificado deslocando v_z para fora das malhas de tensão⁵³ que se fecham no ponto $N'_{VIRTUAL}$ como mostra a Figura B.2.

⁵³ Aplica-se nesta situação o Teorema do Deslocamento de Fontes - Transformação de Blakesley [46]

Figura B.2 – Rede modelada em Y a 3 fios – Deslocamento de v_z 

Fonte: Próprio autor

Fica evidente que, em uma conexão a 3 fios, apenas as componentes de soma instantaneamente nula da tensão da rede têm influência no comportamento do circuito.

Uma questão que permanece é como medir ou determinar v_a , v_b , v_c , uma vez que os pontos N_{VIRTUAL} ou N'_{VIRTUAL} não estão fisicamente disponíveis.

A seguir, uma forma de fazer essa determinação a partir das tensões de linha, v_{ab} , v_{bc} é apresentada.

A partir de (B.1), (B.2) e (B.3) produz-se um novo sistema de equações dado por (B.4), (B.5) e (B.6).

$$v_{ab} - v_{ca} = 2v_a - v_b - v_c \quad (\text{B. 4})$$

$$v_{bc} - v_{ab} = 2v_b - v_a - v_c \quad (\text{B. 5})$$

$$v_{ca} - v_{bc} = 2v_c - v_a - v_b \quad (\text{B. 6})$$

Ou

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{B. 7})$$

Sabendo que v_a , v_b , v_c têm soma instantaneamente nula pode-se reescrever (B.7) como segue:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ -(v_a - v_b) \end{bmatrix} \quad (\text{B. 8})$$

ou

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3V_a \\ 3V_b \\ 3V_c \end{bmatrix} \quad (\text{B. 9})$$

Ou seja, v_a , v_b , v_c podem ser obtidas de v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} aplicando a transformação apresentada em (B.10).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{B. 10})$$

Considerando que v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} são componentes de soma instantaneamente nula pode-se colocar v_{ca} em função de v_{ab} , v_{bc} e obter as três tensões de fase a partir de apenas duas tensões de linha da rede como mostra (B.12).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ -(V_{ab} - V_{bc}) \end{bmatrix} \quad (\text{B. 11})$$

ou

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (\text{B. 12})$$

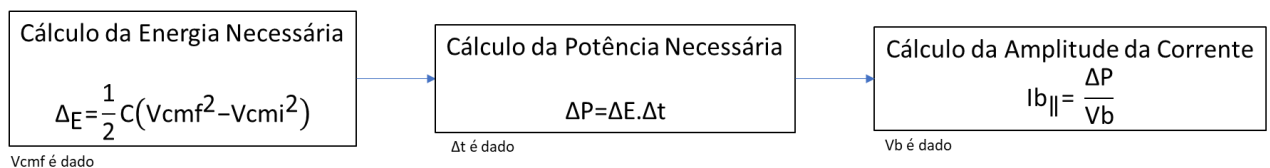
Apêndice C – Método e *Scripts* MATLAB Utilizados nas Simulações dos Itens 3.2 e 3.3

Nos itens 3.2 e 3.3 do documento, uma série de simulações são realizadas para exemplificar como o controle do fluxo de potência entre o conversor e a rede, entre os braços do conversor e entre os submódulos de um braço permite, respectivamente, regular a média das tensões CC nos braços do conversor, promover o balanceamento das tensões CC dos braços e realizar equalização das tensões CC dos submódulos que compõem cada braço do conversor. A seguir são apresentados os métodos e os scripts MATLAB utilizados para isso.

a. Regulação da Média das Tensões CC nos Braços do Conversor

Este método, apresentado na Figura C.1, realiza a simulação cujos resultados são apresentados no subitem 3.2.1 (vide Figura 3.2). Consiste em, partindo de um valor inicial da média das tensões CC dos braços, V_{cmi} , calcular a energia necessária, ΔE , para levar essa média a um nível de referência pré-estabelecido, V_{cmf} . De posse da energia e considerando um intervalo de tempo, Δt , também pré-definido, calcular a potência média necessária, ΔP , a ser drenada da ou injetada na rede e, por fim, conhecendo a potência média, e assumindo uma amplitude pré-definida para a tensão nos braços, V_b , calcular a amplitude da corrente ativa (mesma sequência e fase da tensão da rede), $I_{b||}$, a ser injetada pelo conversor.

Figura C. 1 – Regulação da Média das Tensões CC nos Braços do Conversor – Cálculo da Amplitude da Corrente a Ser Injetada



Fonte: Próprio autor

%Script MATLAB – Regulação da Média das Tensões CC

%Este script demonstra o processo de regulação da média das tensões CC dos braços de um conversor através da injeção de corrente ativa (mesma sequência e fase da tensão da rede).

% Grandezas pré-definidas
 C = 500e-6; % Capacitância em cada braço do conversor
 Vb = 100; % Amplitude da tensão nos braços
 Vcmf = 150; % Tensão CC média final
 ciclos = 6; % Número de ciclos para atingir a média final

% Vetores de tempo
 t=[0:9999]/10000*2*pi;
 tt=[0:119999]/10000/60;
 tx=t;

% Componentes de sequência positiva
 Sr= cos(tx);
 tx=t-2*pi/3;
 Ss=cos(tx);
 tx=t+2*pi/3;
 St=cos(tx);

% Valores iniciais e médio das tensões CC dos braços
 vca0 = 153;
 vcb0 = 144;
 vcc0 = 138;
 Vcmi = (vca0+vcb0+vcc0)/3;

%Cálculo da energia média necessária para levar a tensão média dos braços à tensão de referência

DeltaE = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcmi^2);

% Cálculo da potência média necessária para levar a tensão média dos braços à tensão de referência considerando um número de ciclos da rede

DeltaP = DeltaE/ciclos*60;

% Cálculo da amplitude da corrente a ser injetada

Ib = DeltaP*2/Vb;

% Composição dos vetores para tensões e correntes nos braços do conversor com base nos valores dados e calculados

%Tensão no braço
 Vconva=[Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr];
 Vconvb=[Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss];
 Vconvc=[Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St];

% Setup da variável c que determina o intervalo de injeção da corrente de acordo com o número de ciclos pré-definido

```
c=[0:11];
for k=1:12
  if (c(k)< ciclos)
    c(k)=1;
  else
    c(k)=0;
  end
end
```

%Corrente de sequência positiva para simulação da regulação da média

Iconva=[Ib*c(1)*Sr Ib*c(2)*Sr Ib*c(3)*Sr Ib*c(4)*Sr Ib*c(5)*Sr Ib*c(6)*Sr Ib*c(7)*Sr Ib*c(8)*Sr Ib*c(9)*Sr Ib*c(10)*Sr Ib*c(11)*Sr Ib*c(12)*Sr];

```

Iconvb=[Ib*c(1)*Ss Ib*c(2)*Ss Ib*c(3)*Ss Ib*c(4)*Ss Ib*c(5)*Ss Ib*c(6)*Ss Ib*c(7)*Ss Ib*c(8)*Ss
Ib*c(9)*Ss Ib*c(10)*Ss Ib*c(11)*Ss Ib*c(12)*Ss];
Iconvc=[Ib*c(1)*St Ib*c(2)*St Ib*c(3)*St Ib*c(4)*St Ib*c(5)*St Ib*c(6)*St Ib*c(7)*St Ib*c(8)*St
Ib*c(9)*St Ib*c(10)*St Ib*c(11)*St Ib*c(12)*St];

% Calculando p no braços e trifásica
pconva = Vconva .* Iconva;
pconvb = Vconvb .* Iconvb;
pconvc = Vconvc .* Iconvc;
pconvt = pconva+pconvb+pconvc;

% plotando a potência instantânea no conversor
figure(1);
subplot(211);
hold;
pa=plot(pconva,'r-');
pb=plot(pconvb,'g-');
pc=plot(pconvc,'b-');
title('Potência Instantânea nos Braços');
legend([pa,pb,pc], 'pba(t)', 'pbb(t)', 'pbc(t)');
subplot(212);
plot(pconvt);
axis([0 12*10^4 -20 20]);
title('Potência Instantânea Trifásica');

% cálculo da tensão CC nos braços
vca=vcap(tt,pconva,C,vca0);
vcb=vcap(tt,pconvb,C,vcb0);
vcc=vcap(tt,pconvc,C,vcc0);
vcmedio= (vca+vcb+vcc)/3;

% plotando as tensões CC nos braços
figure(2);
subplot(211);
hold;
va=plot(vca,'r-');
vb=plot(vcb,'g-');
vc=plot(vcc,'b-');
title('Tensões CC nos Braços');
legend([va,vb,vc], 'Vca', 'Vcb', 'Vcc');
subplot(212);
plot(vcmedio);
axis([0 12*10^4 140 155]);
title('Média das Tensões CC nos Braços');

% Plotando Tensão e Corrente nos Braços
figure(3);
subplot(211);
hold;
vba=plot(Vconva,'r-');
vbb=plot(Vconvb,'g-');
vbc=plot(Vconvc,'b-');
title('Tensão nos Braços');
legend([vba,vbb,vbc], 'vba(t)', 'vbb(t)', 'vbc(t)');
subplot(212);
hold;
iba=plot(Iconva,'r-');
ibb=plot(Iconvb,'g-');
ibc=plot(Iconvc,'b-');
title('Corrente Injetada Braços');
legend([iba,ibb,ibc], 'iba(t)', 'ibb(t)', 'ibc(t)');

%Fim do script

```

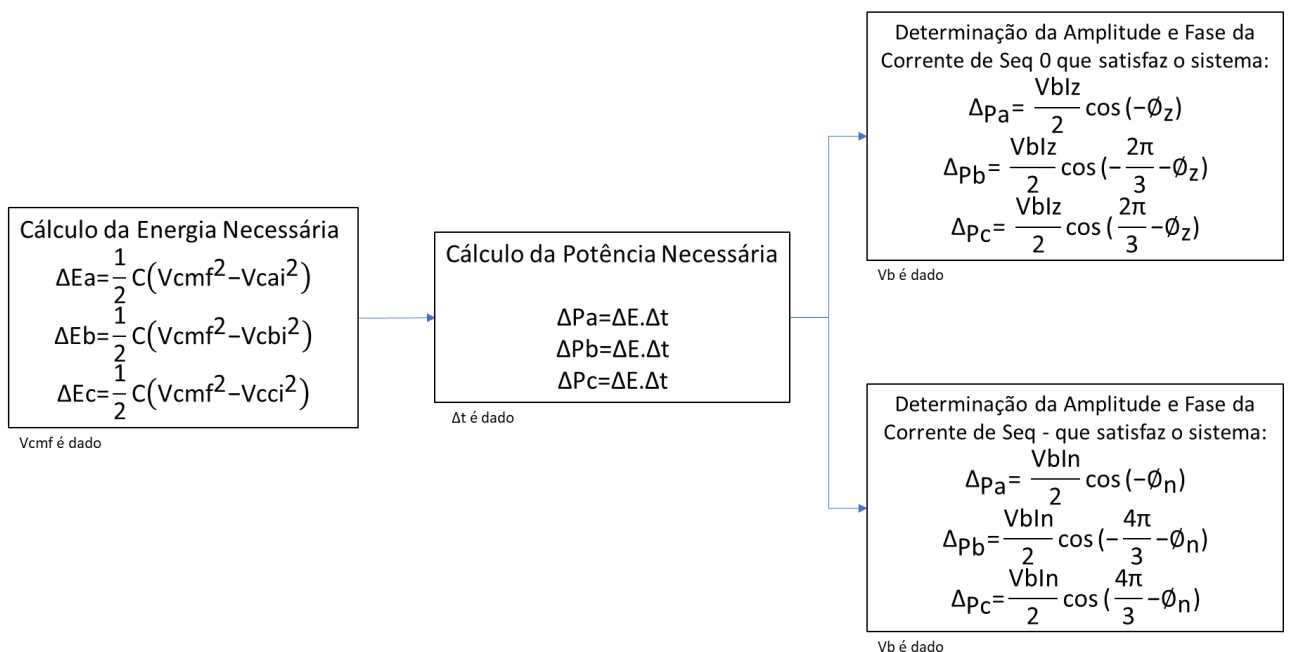
b. Balanceamento das Tensões CC nos Braços do Conversor

Este método, apresentado na Figura C.2, realiza a simulação cujos resultados são apresentados nos subitem 3.2.2 e 3.2.3 (vide figuras 3.3 e 3.4). Ele parte de valores iniciais para as tensões CC nos braços do conversor, V_{cai} , V_{cbi} , V_{cci} , e calcula a energia necessária em cada braço, $\Delta E_{a,b,c}$, para levar as tensões CC de cada braço ao valor pré-definido, V_{cmf} .

De posse das energias, e considerando um intervalo de tempo, Δt , também pré-definido, calcula as potências médias, $\Delta P_{a,b,c}$ necessárias para cada braço e, por fim, com base nas potências calculadas e na amplitude pré-definida para a tensão nos braços, V_b , determina a amplitude e fase da corrente de sequência zero ou negativa a ser a ser injetada pelo conversor para que o balanceamento aconteça.

O processo para determinar amplitude e fase da corrente a ser injetada é iterativo. As iterações são interrompidas quando os valores calculados chegam a um nível de precisão pré-definido.

Figura C. 2 – Balanceamento das Tensões CC nos Braços do Conversor – Cálculo da Amplitude e Fase da Corrente a Ser Injetada



Fonte: Próprio autor

% Script Matlab – Balanceamento das Tensões CC nos Braços – Injeção de Sequência Zero

%Este script demonstra o processo de balanceamento das tensões CC dos braços do conversor fazendo uso da injeção de corrente de sequência zero para promover o fluxo de potência entre os braços do conversor

% Grandezas pré-definidas

C = 500e-6; % Capacitância em cada braço do conversor
Vb = 100; % Amplitude da tensão nos braços
Vcmf = 150; % Tensão CC média final
ciclos = 6; % Número de ciclos para atingir a média final

% Vetores de tempo

t=[0:9999]/10000*2*pi;
tt=[0:119999]/10000/60;
tx=t;

% Componentes de sequência positiva

Sr= cos(tx);
tx=t-2*pi/3;
Ss=cos(tx);
tx=t+2*pi/3;
St=cos(tx);

% Valores iniciais das tensões CC dos braços

Vcai = 157.83;
Vcbi = 149.13;
Vcci = 143.34;

%Cálculo da energia necessária para levar a tensão CC dos braços à tensão de referência

DeltaEa = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcai^2);
DeltaEb = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcbi^2);
DeltaEc = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcci^2);

% Cálculo da potência média necessária para levar a tensão média dos braços à tensão de referência considerando um número de ciclos da rede. Note que DeltaPa, DeltaPb, DeltaPc estabelecem um objetivo. Os loops que seguem vão determinar valores de amplitude e fase que satisfazem esse objetivo dentro de um nível de precisão pré-determinado.

DeltaPa = DeltaEa/ciclos*60;
DeltaPb = DeltaEb/ciclos*60;
DeltaPc = DeltaEc/ciclos*60;

```
for i=0:1000
    k=0;
    lb = i/1000;
    for j = 0:628
        Pa = Vb*lb/2*cos(-j/100);
        Pb = Vb*lb/2*cos(-2*pi/3-j/100);
        Pc = Vb*lb/2*cos(2*pi/3-j/100);
        ErroPa=abs(Pa-DeltaPa);
        ErroPb=abs(Pb-DeltaPb);
        ErroPc=abs(Pc-DeltaPc);
        if (ErroPa<0.2 && ErroPb<0.2 && ErroPc<0.2)
            k=1;
            break;
        end
    end
end
```

```

if (k==1)
    break;
end
end

% Componente de sequência zero a ser imposta com base na amplitude e fase
% determinada

tx=t;
S0 = Ib*cos(tx+j/100); % Componente de sequência zero a ser imposta

% Composição dos vetores para tensões e correntes nos braços do conversor

%Tensão no braço
Vconva=[Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr];
Vconvb=[Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss];
Vconvc=[Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St];

% Setup da variável c que determina o intervalo de injeção da corrente de
% acordo com o número de ciclos pré-definido

c=[0:11];

for k=1:12
    if (c(k)< ciclos)
        c(k)=1;
    else
        c(k)=0;
    end
end

%Corrente de sequência zero para simulação do balanceamento com Seqz
Iconva=[c(1)*S0 c(2)*S0 c(3)*S0 c(4)*S0 c(5)*S0 c(6)*S0 c(7)*S0 c(8)*S0 c(9)*S0 c(10)*S0
        c(11)*S0 c(12)*S0];
Iconvb=[c(1)*S0 c(2)*S0 c(3)*S0 c(4)*S0 c(5)*S0 c(6)*S0 c(7)*S0 c(8)*S0 c(9)*S0 c(10)*S0
        c(11)*S0 c(12)*S0];
Iconvc=[c(1)*S0 c(2)*S0 c(3)*S0 c(4)*S0 c(5)*S0 c(6)*S0 c(7)*S0 c(8)*S0 c(9)*S0 c(10)*S0
        c(11)*S0 c(12)*S0];

% Calculando p no braços e trifásica

pconva = Vconva .* Iconva;
pconvb = Vconvb .* Iconvb;
pconvc = Vconvc .* Iconvc;
pconvt = pconva+pconvb+pconvc;

% plotando a potência instantânea no conversor

figure(1);
subplot(211);
hold;
pa=plot(pconva,'r-');
pb=plot(pconvb,'g-');
pc=plot(pconvc,'b-');
title('Potência Instantânea nos Braços');
legend([pa,pb,pc], 'pba(t)', 'pbb(t)', 'pbc(t)');
subplot(212);
plot(pconvt);
axis([0 12*10^4 -20 20]);
title('Potência Instantânea Trifásica');

% cálculo da tensão CC nos braços

vca=vcap(tt,pconva,C,Vcai);
vcb=vcap(tt,pconvb,C,Vcbi);
vcc=vcap(tt,pconvc,C,Vcci);

```



```

vcmedio= (vca+vcb+vcc)/3;

% plotando as tensões CC nos braços

figure(2);
subplot(211);
hold;
va=plot(vca,'r-');
vb=plot(vcb,'g-');
vc=plot(vcc,'b-');
title('Tensões CC nos Braços');
legend([va,vb,vc], 'Vca', 'Vcb', 'Vcc');
subplot(212);
plot(vcmedio);
axis([0 12*10^4 140 155]);
title('Média das Tensões CC nos Braços');

% Plotando Tensão e Corrente nos Braços

figure(3);
subplot(211);
hold;
vba=plot(Vconva,'r-');
vbb=plot(Vconvb,'g-');
vbc=plot(Vconvc,'b-');
title('Tensão nos Braços');
legend([vba,vbb,vbc], 'vba(t)', 'vbb(t)', 'vbc(t)');
subplot(212);
hold;
iba=plot(Iconva,'r-');
ibb=plot(Iconvb,'g-');
ibc=plot(Iconvc,'b-');
title('Corrente Injetada Braços');
legend([iba,ibb,ibc], 'iba(t)', 'ibb(t)', 'ibc(t)');
% Fim do Script

```

% Script Matlab – Balanceamento das Tensões CC nos Braços – Injeção de Sequência Negativa

%Este script demonstra o processo de balanceamento das tensões CC dos braços do conversor fazendo uso da injeção de corrente de sequência negativa para promover o fluxo de potência entre os braços do conversor
% Grandezas pré-definidas

```

C = 500e-6; % Capacitância em cada braço do conversor
Vb = 100; % Amplitude da tensão nos braços
Vcmf = 150; % Tensão CC média final
ciclos = 6; % Número de ciclos para atingir a média final

```

% Vetores de tempo

```

t=[0:9999]/10000*2*pi;
tt=[0:119999]/10000/60;

```

% Componentes de sequência positiva da tensão

```

tx=t;
Sr= cos(tx);
tx=t-2*pi/3;
Ss=cos(tx);
tx=t+2*pi/3;
St=cos(tx);

```

% Componentes de sequência positiva da corrente injetada

```

tx=t;
Srip=0.4*cos(tx+pi/2);
tx=t-2*pi/3;

```

```

Ssip=0.4*cos(tx+pi/2);
tx=t+2*pi/3;
Stip=0.4*cos(tx+pi/2);

% Valores iniciais das tensões CC dos braços

Vcai = 157.83;
Vcbi = 149.13;
Vcci = 143.34;

% Cálculo da energia necessária para levar a tensão CC dos braços à
% tensão de referência

DeltaEa = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcai^2);
DeltaEb = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcbi^2);
DeltaEc = 1/2*C*(Vcmf^2 - Vcci^2);

% Cálculo da potência média necessária para levar a tensão média dos braços
% à tensão de referência considerando um número de ciclos da rede. Note que
% DeltaPa, DeltaPb, DeltaPc estabelecem um objetivo. Os loops que seguem
% vão determinar valores de amplitude e fase que satisfazem esse objetivo
% dentro de um nível de precisão pré-determinado.

DeltaPa = DeltaEa/ciclos*60;
DeltaPb = DeltaEb/ciclos*60;
DeltaPc = DeltaEc/ciclos*60;

for i=0:1000
    k=0;
    lb = i/1000;
    for j = 0:628
        Pa = Vb*lb/2*cos(-j/100);
        Pb = Vb*lb/2*cos(-4*pi/3-j/100);
        Pc = Vb*lb/2*cos(4*pi/3-j/100);
        ErroPa=abs(Pa-DeltaPa);
        ErroPb=abs(Pb-DeltaPb);
        ErroPc=abs(Pc-DeltaPc);
        if (ErroPa<0.25 && ErroPb<0.25 && ErroPc<0.25)
            k=1;
            break;
        end
    end
    if (k==1)
        break;
    end
end

% Componentes de sequência negativa

tx=t;
Srn = lb*cos(tx+j/100);
tx=t+2*pi/3;
Ssn =lb*cos(tx+j/100);
tx=t-2*pi/3;
Stn =lb*cos(tx+j/100);

% Composição dos vetores para tensões e correntes nos braços do conversor

% Tensão no braço
Vconva=[Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr Vb*Sr];
Vconvb=[Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss Vb*Ss];
Vconvc=[Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St Vb*St];

% Setup da variável c que determina o intervalo de injeção da corrente de

```

```

% acordo com o número de ciclos pré-definido

c=[0:11];

for k=1:12
    if (c(k)< ciclos)
        c(k)=1;
    else
        c(k)=0;
    end
end

%Corrente de sequência negativa para simulação do balanceamento com Seqn
Iconva=[c(1)*Srn+Srip c(2)*Srn+Srip c(3)*Srn+Srip c(4)*Srn+Srip c(5)*Srn+Srip
        c(6)*Srn+Srip c(7)*Srn+Srip c(8)*Srn+Srip c(9)*Srn+Srip c(10)*Srn+Srip
        c(11)*Srn+Srip c(12)*Srn+Srip];
Iconvb=[c(1)*Ssn+Ssip c(2)*Ssn+Ssip c(3)*Ssn+Ssip c(4)*Ssn+Ssip c(5)*Ssn+Ssip
        c(6)*Ssn+Ssip c(7)*Ssn+Ssip c(8)*Ssn+Ssip c(9)*Ssn+Ssip c(10)*Ssn+Ssip
        c(11)*Ssn+Ssip c(12)*Ssn+Ssip];
Iconvc=[c(1)*Stn+Stip c(2)*Stn+Stip c(3)*Stn+Stip c(4)*Stn+Stip c(5)*Stn+Stip
        c(6)*Stn+Stip c(7)*Stn+Stip c(8)*Stn+Stip c(9)*Stn+Stip c(10)*Stn+Stip c(11)*Stn+Stip
        c(12)*Stn+Stip];

% Calculando p no braços e trifásica

pconva = Vconva .* Iconva;
pconvb = Vconvb .* Iconvb;
pconvc = Vconvc .* Iconvc;
pconvt = pconva+pconvb+pconvc;

% plotando a potência instantânea no conversor

figure(1);
subplot(211);
hold;
pa=plot(pconva,'r-');
pb=plot(pconvb,'g-');
pc=plot(pconvc,'b-');
title('Potência Instantânea nos Braços');
legend([pa,pb,pc], 'pba(t)', 'pbb(t)', 'pbc(t)');
subplot(212);
plot(pconvt);
axis([0 12*10^4 -20 20]);
title('Potência Instantânea Trifásica');

% cálculo da tensão CC nos braços

vca=vcap(tt,pconva,C,Vcai);
vcb=vcap(tt,pconvb,C,Vcbi);
vcc=vcap(tt,pconvc,C,Vcci);
vcmedio= (vca+vcb+vcc)/3;

% plotando as tensões CC nos braços

figure(2);
subplot(211);
hold;
va=plot(vca,'r-');
vb=plot(vcb,'g-');
vc=plot(vcc,'b-');
title('Tensões CC nos Braços');
legend([va,vb,vc], 'Vca', 'Vcb', 'Vcc');
subplot(212);
plot(vcmedio);
axis([0 12*10^4 140 155]);
title('Média das Tensões CC nos Braços');

```

```
% Plotando Tensão e Corrente nos Braços

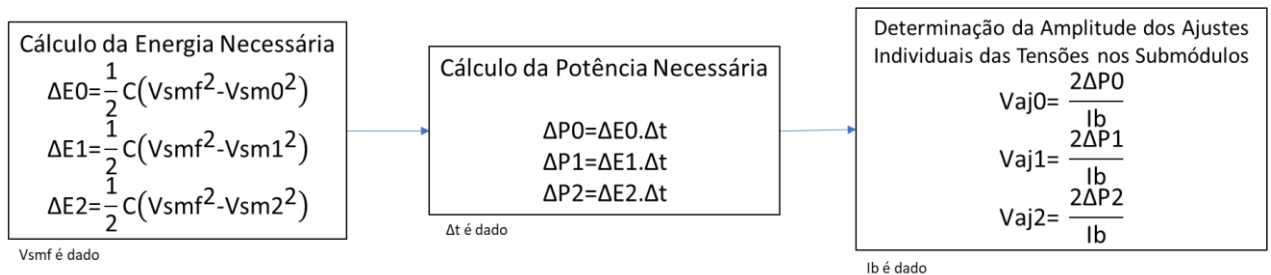
figure(3);
subplot(211);
hold;
vba=plot(Vconva,'r-');
vbb=plot(Vconvb,'g-');
vbc=plot(Vconvc,'b-');
title('Tensão nos Braços');
legend([vba,vbb,vbc], 'vba(t)', 'vbb(t)', 'vbc(t)');
subplot(212);
hold;
iba=plot(Iconva,'r-');
ibb=plot(Iconvb,'g-');
ibc=plot(Iconvc,'b-');
title('Corrente Injetada Braços');
legend([iba,ibb,ibc], 'iba(t)', 'ibb(t)', 'ibc(t)');

% Fim do Script
```

c. Equalização das Tensões CC dos Submódulos de Um Braço do Conversor

Este método, apresentado na Figura C.3, realiza a simulação cujos resultados são apresentados nos no item 3.3 (vide figuras 3.7, 3.8 e 3.9). Parte de valores iniciais, V_{sm1} , V_{sm2} , V_{sm3} , e calcula a energia necessária $\Delta E_{0,1,2}$, para levar as tensões CC de cada submódulo ao valor pré-definido, V_{smf} . De posse das energias, e considerando um intervalo de tempo, Δt , também pré-definido, calcula as potências médias, $\Delta P_{0,1,2}$ necessárias para cada submódulo e, por fim, com base nas potências calculadas e na amplitude pré-definida para a corrente no braço, I_b , determina as amplitudes dos ajustes individuais, $V_{aj0,1,2}$, a serem impostos às tensões produzidas por cada submódulo para que a equalização aconteça.

Figura C. 3 – Equalização das Tensões CC nos Submódulos de Um Braço – Cálculo das Amplitudes dos Ajustes Individuais



Fonte: Próprio autor

% Script MATLAB – Equalização das Tensões CC dos Submódulos de Um Braço do Conversor

%Este script demonstra o processo de equalização das tensões dos submódulos
%de um braço do conversor através da imposição da de um ajuste na tensão
%produzida por cada submódulo em fase com a corrente no braço.

% Grandezas pré-definidas

C = 2000e-6; % Capacitância de cada submódulo

Vsmf = 50; % Amplitude da Tensão CC no submódulo

ciclos = 6; % Número de ciclos para realizar a equalização

Ib = 1; % Amplitude da corrente no braço

Vb = 50; % Amplitude da tensão base produzida por cada submódulo

% Vetores de tempo

t=[0:9999]/10000*2*pi;

tt=[0:119999]/10000/60;

tx=t;

%Tensões e correntes no submódulo

Srv= Vb*cos(tx+pi/4); % tensão de regime (base) em cada submódulo.

Sri = Ib*cos(tx+pi/2+pi/4); % corrente no braço

% Tensões CC iniciais em cada um dos três submódulos do braço

Vsm0 = 53;

Vsm1 = 49;

Vsm2 = 48;

%Cálculo da energia necessária para levar as tensões de cada submódulo à

%tensão de referência

DeltaE0 = 1/2*C*(Vsmf^2 - Vsm0^2);

DeltaE1 = 1/2*C*(Vsmf^2 - Vsm1^2);

DeltaE2 = 1/2*C*(Vsmf^2 - Vsm2^2);

% Cálculo da potência necessária para levar as tensões de cada submódulo à

% tensão de referência considerando um número de ciclos da rede

P0 = DeltaE0/ciclos*60;

P1 = DeltaE1/ciclos*60;

P2 = DeltaE2/ciclos*60;

% Cálculo da amplitude do ajuste da tensão produzida por cada submódulo

vaj0=P0*2/Ib;

vaj1=P1*2/Ib;

vaj2=P2*2/Ib;

% Cálculo do valor médio das tensões CC dos submódulos

Vsmm = (Vsm0+Vsm1+Vsm2)/3;

% Definição das matrizes de vetores para tensões e corrente

% Tensão de regime produzida por cada submódulo

Vconvai0=[Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv];

Vconvai1=[Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv];

Vconvai2=[Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv Srv];

% Setup da variável c que determina o intervalo de injeção das tensões de

% ajuste de acordo com o número de ciclos pré-definido

c=[0:11];

```

for k=1:12
    if (c(k)< ciclos)
        c(k)=1;
    else
        c(k)=0;
    end
end

% Tensões de ajuste a serem impostas

Vconvaj0=[c(1)*vaj0*Sri c(2)*vaj0*Sri c(3)*vaj0*Sri c(4)*vaj0*Sri c(5)*vaj0*Sri c(6)*vaj0*Sri
c(7)*vaj0*Srv c(8)*vaj0*Srv c(9)*vaj0*Srv c(10)*vaj0*Srv c(11)*vaj0*Srv
c(12)*vaj0*Srv];
Vconvaj1=[c(1)*vaj1*Sri c(2)*vaj1*Sri c(3)*vaj1*Sri c(4)*vaj1*Sri c(5)*vaj1*Sri c(6)*vaj1*Sri
c(7)*vaj0*Srv c(8)*vaj0*Srv c(9)*vaj0*Srv c(10)*vaj0*Srv c(11)*vaj0*Srv
c(12)*vaj0*Srv];
Vconvaj2=[c(1)*vaj2*Sri c(2)*vaj2*Sri c(3)*vaj2*Sri c(4)*vaj2*Sri c(5)*vaj2*Sri c(6)*vaj2*Sri
c(7)*vaj0*Srv c(8)*vaj0*Srv c(9)*vaj0*Srv c(10)*vaj0*Srv c(11)*vaj0*Srv
c(12)*vaj0*Srv];

% Tensão produzida por cada submódulo considerando o ajuste

Vconva0=[Srv+c(1)*vaj0*Sri Srv+c(2)*vaj0*Sri Srv+c(3)*vaj0*Sri Srv+c(4)*vaj0*Sri
Srv+c(5)*vaj0*Sri Srv+c(6)*vaj0*Sri Srv+c(7)*vaj0*Sri Srv+c(8)*vaj0*Sri
Srv+c(9)*vaj0*Sri Srv+c(10)*vaj0*Sri Srv+c(11)*vaj0*Sri Srv+c(12)*vaj0*Sri];
Vconva1=[Srv+c(1)*vaj1*Sri Srv+c(2)*vaj1*Sri Srv+c(3)*vaj1*Sri Srv+c(4)*vaj1*Sri
Srv+c(5)*vaj1*Sri Srv+c(6)*vaj1*Sri Srv+c(7)*vaj1*Sri Srv+c(8)*vaj1*Sri
Srv+c(9)*vaj1*Sri Srv+c(10)*vaj1*Sri Srv+c(11)*vaj1*Sri Srv+c(12)*vaj1*Sri];
Vconva2=[Srv+c(1)*vaj2*Sri Srv+c(2)*vaj2*Sri Srv+c(3)*vaj2*Sri Srv+c(4)*vaj2*Sri
Srv+c(5)*vaj2*Sri Srv+c(6)*vaj2*Sri Srv+c(7)*vaj2*Sri Srv+c(8)*vaj2*Sri
Srv+c(9)*vaj2*Sri Srv+c(10)*vaj2*Sri Srv+c(11)*vaj2*Sri Srv+c(12)*vaj2*Sri];

% Tensão e corrente no braço do conversor

vbraco = Vconva0+Vconva1+Vconva2;
Iconva=[Sri Sri Sri Sri Sri Sri Sri Sri Sri Sri];

%Plotando tensões nos submódulos e no braço

figure(1);
subplot (411);
hold;
vbai0=plot(Vconvai0,'r-');
vbai1=plot(Vconvai1,'g-');
vbai2=plot(Vconvai2,'b-');
title('Tensões nos Submodulos-Parcela Comum');
legend([vbai0,vbai1,vbai2],'sm0','sm1','sm2');
subplot (412);
hold;
vbaj0=plot(Vconvaj0,'r-');
vbaj1=plot(Vconvaj1,'g-');
vbaj2=plot(Vconvaj2,'b-');
title('Ajustes Individuais das Tensões nos Submodulos');
subplot (413);
hold;
vba0=plot(Vconva0,'r-');
vba1=plot(Vconva1,'g-');
vba2=plot(Vconva2,'b-');
title('Tensões nos Submodulos Com Ajustes');
subplot (414);
plot(vbraco);
title('Tensão no Braço');

% Calculando a potência (comum, ajuste, total) conversor

% Potência de regime

```

```

pconvai0 = Vconvai0 .* Iconva;
pconvai1 = Vconvai1 .* Iconva;
pconvai2 = Vconvai2 .* Iconva;

% Ajustes de potência

pconvaj0 = Vconvaj0 .* Iconva;
pconvaj1 = Vconvaj1 .* Iconva;
pconvaj2 = Vconvaj2 .* Iconva;

% Potência total em cada submódulo

pconva0 = Vconva0 .* Iconva;
pconva1 = Vconva1 .* Iconva;
pconva2 = Vconva2 .* Iconva;

% plotando a potência instantânea no conversor

figure(2);
subplot(411);
hold;
pai=plot(pconvai0,'r-');
pbi=plot(pconvai1,'g-');
pci=plot(pconvai2,'b-');
title('Potência Instantânea - Parcela Comum');
legend([pai,pbi,pci],'sm0','sm1','sm2');
subplot(412);
hold;
paj=plot(pconvaj0,'r-');
pbj=plot(pconvaj1,'g-');
pcj=plot(pconvaj2,'b-');
title('Potência Instantânea - Ajustes');
subplot(413);
hold;
pa=plot(pconva0,'r-');
pb=plot(pconva1,'g-');
pc=plot(pconva2,'b-');
title('Potência Instantânea Total nos Submodulos');
subplot(414);
plot(pconva0+pconva1+pconva2);
title('Potência Total no Braço');

% cálculo da tensão no capacitor

vcaf0=vcap(tt,pconva0,C,Vsm0);
vcaf1=vcap(tt,pconva1,C,Vsm1);
vcaf2=vcap(tt,pconva2,C,Vsm2);

vcmedio= (vcaf0+vcaf1+vcaf2)/3;
vcbraco= (vcaf0+vcaf1+vcaf2);

% plotando as tensões nos capacitores

figure(3);
subplot(211);
hold;
va=plot(vcaf0,'r-');
vb=plot(vcaf1,'g-');
vc=plot(vcaf2,'b-');
title('Tensões CC nos Submódulos');
legend([va,vb,vc],'sm0','sm1','sm2');
subplot(212);
plot(vcbraco);
axis([0 9*10^4 46 160]);
title('Tensão CC no Braço');

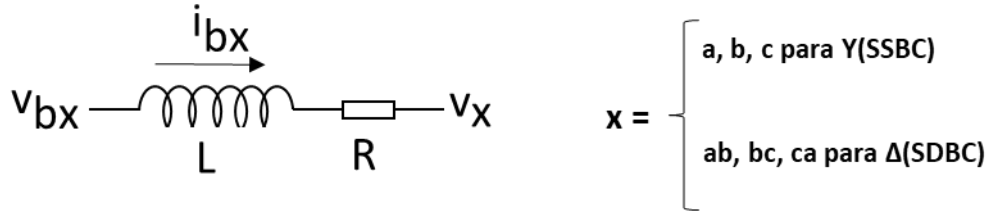
% Fim do Script

```


Apêndice D – Escolha da Tensão CC dos Submódulos

A Figura D.1 apresenta, simplificada, a conexão de um braço do conversor, representado pela tensão v_{bx} à rede, representada pela tensão v_x , através do circuito de acoplamento.

Figura D. 1 – Conversor Y(SSBC)/Δ(SDBC) – Conexão à Rede



Fonte: Próprio Autor

Na operação como STACOM a produção de reativos capacitivos requer que o conversor gere tensões de braço superiores à tensão da rede. Portanto, para especificar uma tensão máxima para cada braço, deve-se considerar a produção de reativos capacitivos com a máxima corrente, $i_{bx_{max}}$ especificada. Assim:

$$i_{bx_{max}} = \frac{V_{bx_{max}} - V_x}{R + j\omega L} \quad (D. 1)$$

Considerando a tensão no braço do conversor, $V_{bx_{max}} = V_{bx_{max||}} + jV_{bx_{max\perp}}$, então:

$$i_{bx_{max}} = \frac{(V_{bx_{max||}} - V_x) + jV_{bx_{max\perp}}}{R + j\omega L} \quad (D. 2)$$

Convertendo (D.2) para a forma polar chega-se a:

$$|i_{bx_{max}}| \angle \varphi_{i_{bx_{max}}} = \frac{\sqrt{((V_{bx_{max||}} - V_x)^2 + V_{bx_{max\perp}}^2) \angle \tan^{-1} \frac{V_{bx_{max\perp}}}{(V_{bx_{max||}} - V_x)}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \angle \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}} \quad (D. 3)$$

A partir de (D.3), extraímos o módulo e fase de $i_{bx_{max}}$:

$$|i_{bx_{max}}| = \frac{\sqrt{((V_{bx_{max||}} - V_x)^2 + V_{bx_{max\perp}}^2)}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (D. 4)$$

$$\varphi_{i_{bx_{max}}} = \tan^{-1} \frac{V_{bx_{max\perp}}}{(V_{bx_{max||}} - V_x)} - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (D. 5)$$

A partir de (D.4) chega-se a:

$$(V_{bx_{max||}} - V_x)^2 + V_{bx_{max\perp}}^2 = i_{bx_{max}}^2 (R^2 + (\omega L)^2) \quad (D. 6)$$

E de (D.5) a:

$$V_{b_{x_{\max\perp}}} = (V_{b_{x_{\max\parallel}}} - V_x) \tan(\varphi_{ib_{x_{\max}}} + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) \quad (D. 7)$$

Operando como STATCOM, no modo capacitivo, a corrente está em quadratura e adiantada em relação à tensão. Assim, (D.7) assume a seguinte forma:

$$V_{b_{x_{\max\perp}}} = (V_{b_{x_{\max\parallel}}} - V_x) \tan(90^\circ + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) \quad (D. 8)$$

Substituindo (D.8) em (D.6) chega-se a:

$$(V_{b_{x_{\max\parallel}}} - V_x)^2 + (V_{b_{x_{\max\parallel}}} - V_x)^2 [\tan(90^\circ + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R})]^2 = I_{b_{x_{\max}}}^2 (R^2 + (\omega L)^2) \quad (D. 9)$$

Reagrupando termos em (D.9) chega-se a (4.10).

$$V_{b_{x_{\max\parallel}}} = V_x + \sqrt{\frac{I_{b_{x_{\max}}}^2 (R^2 + (\omega L)^2)}{1 + [\tan(90^\circ + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R})]^2}} \quad (D. 10)$$

Através de (D.10) e (D.8) calcula-se $V_{b_{x_{\max}}}$:

$$V_{b_{x_{\max}}} = \sqrt{V_{b_{x_{\max\parallel}}}^2 + V_{b_{x_{\max\perp}}}^2} \quad (D. 11)$$

A tensão do lado CC do conversor deve ser grande o suficiente para permitir a síntese da maior tensão do lado CA. Ou seja:

$$V_{c_x} \geq V_{b_{x_{\max}}} \quad (D. 12)$$

Neste estudo, a tensão do lado CC é fixada, inicialmente, 50% acima do valor calculado de $V_{b_{x_{\max}}}$. O objetivo desse incremento é permitir a operação do conversor com um nível pré-determinado de desbalanço (presença de sequência negativa na corrente injetada ou na tensão da rede) sem que haja saturação. O percentual escolhido baseia-se no estudo feito por [19] que estabelece relações entre o percentual de sequência negativa introduzida e a necessidade de elevação da Tensão CC⁵⁴.

$$V_{c_x} = 1,5 * V_{b_{x_{\max}}} \quad (D. 13)$$

Colocando (D.13) em termos da tensão CC em cada submódulo, ou da tensão em cada capacitor, tem-se:

⁵⁴ No Capítulo 7 são identificadas situações em que a elevação da tensão no barramento precisa ser ainda maior para que o conversor opere sem saturação.

$$V_{c_{xi}} = \frac{1,5}{N} V_{b_{x_{max}}} \quad (D. 14)$$

Considerando as características funcionais estabelecidas na Tabela 4.1, a tensão CC nos submódulos pode ser calculada através de (D.8), (D.10), (D.11) e (D.14).

A seguir, é calculado o valor de $V_{b_{x_{max}}}$ para a configuração Y(SSBC).

Com (D.10) calcula-se $V_{b_{max||}}$:

$$V_{b_{x_{max||}}} = 179,6 + \frac{12^2 (1^2 + (2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2)}{\sqrt{1 + [\tan(90^\circ + \tan^{-1} \frac{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{1})]^2}} = 225,3V \quad (D. 15)$$

Com (D.15) e (D.8) calcula-se $V_{b_{x_{max\perp}}}$:

$$V_{b_{x_{max\perp}}} = (225,3 - 179,6) \tan(90^\circ + \tan^{-1} \frac{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{1}) = -12,1V \quad (D. 16)$$

Com (D.15) e (D.16) calcula-se $V_{b_{x_{max}}}$:

$$V_{b_{x_{max}}} = \sqrt{225,3^2 + (-12,1)^2} = 225,6V \quad (D. 17)$$

Com (D.14) e (D.17) chega-se à tensão CC para cada submódulo na configuração Y(SSBC):

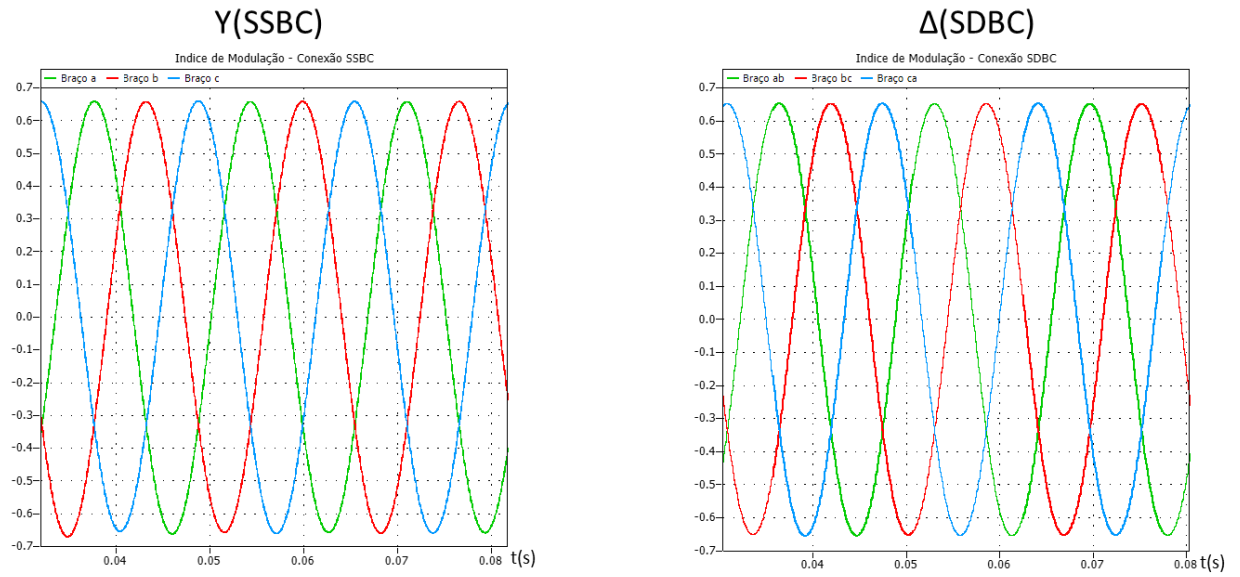
$$V_{c_{xi}} = \frac{1,5}{4} 225,6 \approx 85V \quad \text{para a configuração Y(SSBC)} \quad (D. 18)$$

O mesmo processo é aplicado para o cálculo da tensão na configuração Δ (SDBC) tomando-se o cuidado de considerar as alterações na tensão ($\sqrt{3} \cdot 179,6V = 311,1V$) e na corrente ($\frac{12A}{\sqrt{3}} = 7A$) nos braços do conversor. O valor calculado é apresentado em (D.19).

$$V_{c_{xi}} \approx 147V \quad \text{para a configuração } \Delta \text{(SDBC)} \quad (D. 19)$$

A Figura D.2 apresenta o índice modulação PWM produzido pelo conversor injetando a corrente equilibrada máxima nominal, no modo capacitivo, em cada configuração de conexão à rede. Observa-se que a amplitude se aproxima, como esperado, de 2/3 do máximo.

Figura D. 2 – Índice de Modulação – Máxima Corrente Nominal – Modo Capacitivo Sem Desbalanço



Fonte: Próprio Autor

Apêndice E – Cálculo do Capacitor

A variação de energia nos capacitores dos submódulos de um braço é dada pela equação abaixo:

$$\Delta\Omega Ceq_x = \frac{1}{2} Ceq_x (Vceq_{xmax}^2 - Vceq_{xmin}^2) \quad (E. 1)$$

Do lado CA a potência instantânea é dada por:

$$pc_x = vb_x ib_x \quad (E. 2)$$

Sendo $vb_x = Vb_x \text{sen}(\omega t)$ e $ib_x = Ib_x \text{sen}(\omega t \pm \varphi_i)$:

$$pc_x = Vb_x \text{sen}(\omega t) Ib_x \text{sen}(\omega t \pm \varphi_i) \quad (E. 3)$$

Ou

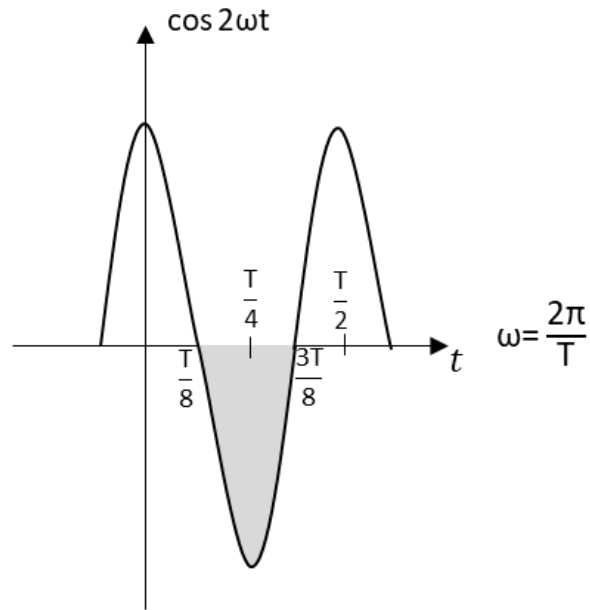
$$pc_x = \frac{Vb_x Ib_x}{2} \cos(\pm \varphi_i) - \frac{Vb_x Ib_x}{2} \cos(2\omega t \pm \varphi_i) \quad (E. 4)$$

Em um STATCOM $\varphi_i \approx \pm \pi/2$, portanto $\frac{Vb_x Ib_x}{2} \cos(\pm \varphi_i) \approx 0$ e $\cos(2\omega t \pm \varphi_i) = -\cos(2\omega t)$.

Com base nessas relações (E.4) assume a seguinte forma:

$$pc_x = \frac{Vb_x Ib_x}{2} \cos(2\omega t) \quad (E. 5)$$

A equação (E.5) possui valor médio nulo. Portanto, o fluxo médio de energia em um período também será nulo. Dessa forma, para se obter a variação máxima desse fluxo, é preciso integrar (E.5) no intervalo de um semi-ciclo (positivo ou negativo) da função e, do resultado, extrair seu módulo. Assim, com base na Figura E.1, realiza-se a integração no intervalo $T/8$ a $3T/8$ (semi-ciclo negativo de $\cos 2\omega t$) e se extrai o seu módulo.

Figura E. 1 – Representação gráfica de $\cos(2\omega t)$ 

Fonte: Próprio Autor

$$\Delta\Omega_x = \left| \int_{\frac{T}{8}}^{\frac{3T}{8}} \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{2} \cos(2\omega t) dt \right| \quad (\text{E. 6})$$

Desenvolvendo (E.6)

$$\Delta\Omega_x = \left| \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{2} \frac{1}{2\omega} \text{sen}(2\omega t) \Bigg|_{t=\frac{T}{8}}^{t=\frac{3T}{8}} \right| \quad (\text{E. 7})$$

$$\Delta\Omega_x = \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{4\omega} \left| \text{sen}\left(2 \frac{2\pi}{T} \frac{3T}{8}\right) - \text{sen}\left(2 \frac{2\pi}{T} \frac{T}{8}\right) \right| \quad (\text{E. 8})$$

$$\Delta\Omega_x = \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{4\omega} |-1-1| \quad (\text{E. 9})$$

$$\Delta\Omega_x = \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{2\omega} \quad (\text{E. 10})$$

A variação de energia deve ser igual nos lados CA e CC do circuito. Portanto, igualando (E.10) a (E.1) chega-se a:

$$\frac{V_{b_x} I_{b_x}}{2\omega} = \frac{1}{2} C_{eq_x} (V_{ceq_{x_{max}}}^2 - V_{ceq_{x_{min}}}^2) \quad (\text{E. 11})$$

Isolando C_{eq_x} :

$$C_{eq_x} = \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{\omega (V_{ceq_{x_{max}}}^2 - V_{ceq_{x_{min}}}^2)} \quad (\text{E. 12})$$

Substituindo (A.12) e (A.19) em (E.12) obtém-se (E.13) que estabelece o valor do capacitor, C, de um submódulo em função da tensão e corrente no braço e dos valores, máximo e mínimo, definidos para a tensão no mesmo.

$$C = \frac{V_{b_x} I_{b_x}}{\omega N (V_{C_{x\max}}^2 - V_{C_{x\min}}^2)} \quad (\text{E. 13})$$

Para o cálculo do capacitor a ser utilizado nas simulações define-se um *ripple* máximo para a máxima tensão no braço do conversor calculada no Apêndice D (equação D.17).

Assim, o valor do capacitor é calculado para a conexão Y(SSBC), para um *ripple* máximo de +/- 2%.

$$C = \frac{225,6 \cdot 12}{377 \cdot 4((85 \cdot 1,02)^2 - (85 \cdot 0,98)^2)} \approx 3100 \mu\text{F} \quad (\text{E. 14})$$

Fazendo uso de um valor comercialmente disponível que garanta o valor calculado considerando sua tolerância, o componente utilizado terá a capacitância especificada em (E.15).

$$C = 3.300 \mu\text{F} \text{ para a configuração Y(SSBC)} \quad (\text{E. 15})$$

Repetindo os mesmos cálculos para a configuração SDBC chega-se ao valor apontado em (E.16).

$$C = 1.000 \mu\text{F} \text{ para a configuração } \Delta(\text{SDBC}) \quad (\text{E. 16})$$

A partir de (E.13), produz-se (E.17) que permite calcular o *ripple* (pico) a partir de um valor pré-determinado para o capacitor.

$$\text{Ripple}\% = \frac{V_{b_b}}{4\omega C N V_C^2} 100\% \quad (\text{E. 17})$$

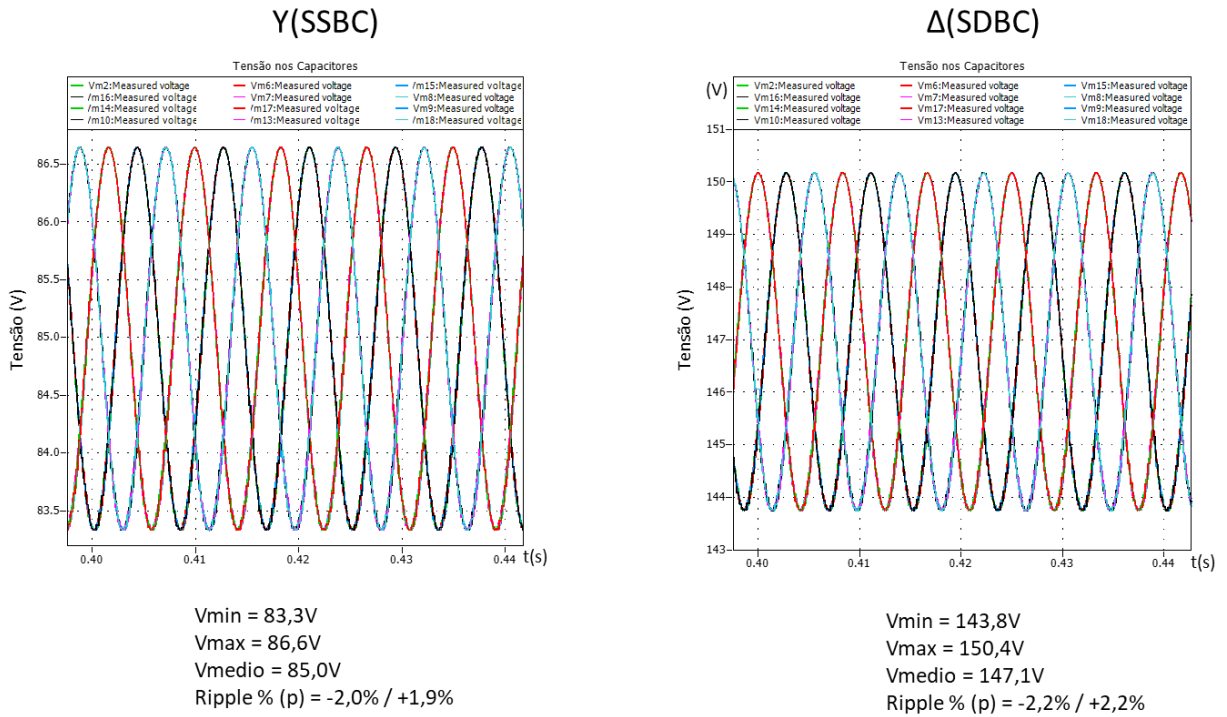
Utilizando (E.17) e o valor do capacitor a ser utilizado nas configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC), a seguir, calculamos o *ripple* esperado para a corrente máxima nominal de cada configuração e comparamos com os valores obtidos nos modelos de simulação.

A Tabela E.1 sumariza os valores calculados e medidos em simulação. A Figura E.2 apresenta as formas de onda obtidas nas simulações para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC). Com se observa, os resultados calculados e obtidos nas simulações se não iguais, se aproximam bastante em ambas as configurações.

Tabela E. 1 – Ripple Calculado e Medido para configurações Y(SSBC) e Δ(SDBC) (Modo Capacitivo)

Configuração	Capacitor Utilizado	Corrente e Tensão Máximas de pico nos Braços calculados (Apêndice D)	Ripple % calculado	Ripple % medido em simulação
Y(SSBC)	3.300 μF	I _b =12.1A; V _b =340V	+/-1,9%	+1,9% / -2,0%
Δ(SDBC)	1.000 μF	I _b =7A; V _b =588V	+/-2,1%	+2,2% / -2,2%

Figura E. 2 – Tensão CC nos capacitores dos Submódulos



Fonte: Próprio autor

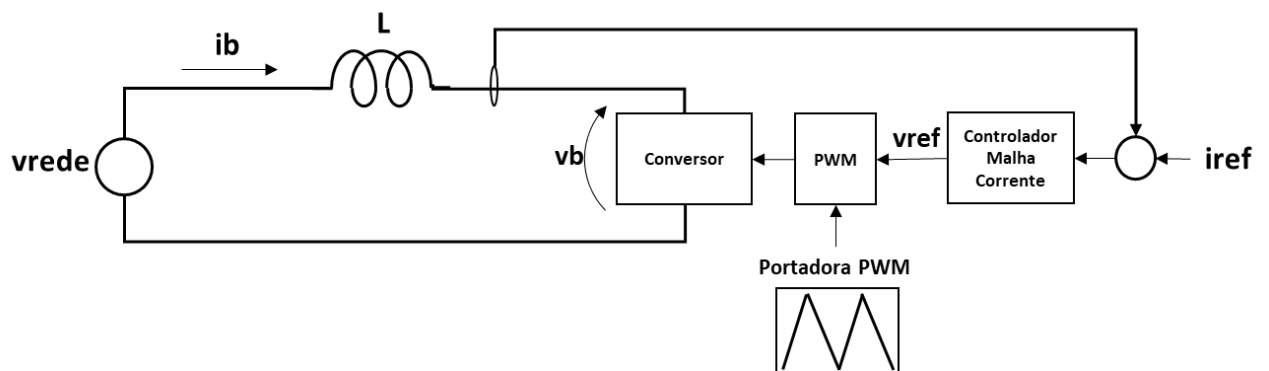
Apêndice F – Cálculo do Limite de Ganho Proporcional Para a Malha de Corrente

Em conversores PWM com portadora triangular, com controle no tempo contínuo, chaveamentos múltiplos surgem quando a taxa de variação (inclinação) do sinal modulador se aproxima da taxa de variação da portadora. Como a taxa de variação do sinal modulador tem relação direta com ganho proporcional da malha de controle é necessário conhecer seu valor máximo ao realizar o projeto dos seus controladores. No tempo discreto, como o atraso de cálculo e de aquisição (ZOH), dada a característica escalonada dos sinais, o fenômeno dos chaveamentos múltiplos não se manifesta, mas a estabilidade da malha de controle é comprometida na medida que o ganho proporcional é elevado. Em [47] os limites são estabelecidos para conversores VSC baseados em PWMs de dois e três níveis. Em [42] determina-se a um valor máximo a ser respeitado pela combinação dos ganhos proporcionais utilizados nas malhas de controle de corrente de rede e circulante em um conversor multinível DSCC. Este apêndice estabelece a relação entre o ganho proporcional da malha de corrente e a frequência de chaveamento, número de submódulos em cada braço e a indutância do circuito de acoplamento com a rede para conversores multinível dos tipos SSBC e SDBC.

No tempo contínuo, o fenômeno dos chaveamentos múltiplos é evitado respeitando-se relação (F.1) que determina que a inclinação (*Slope*) do sinal modulador deve ser menor que a inclinação da portadora triangular.

$$\text{Slope}_{\text{ModuladoraPWM}} < \text{Slope}_{\text{PortadoraPWM}} \quad (\text{F. 1})$$

Figura F. 1 - Conversor – Esquema Básico



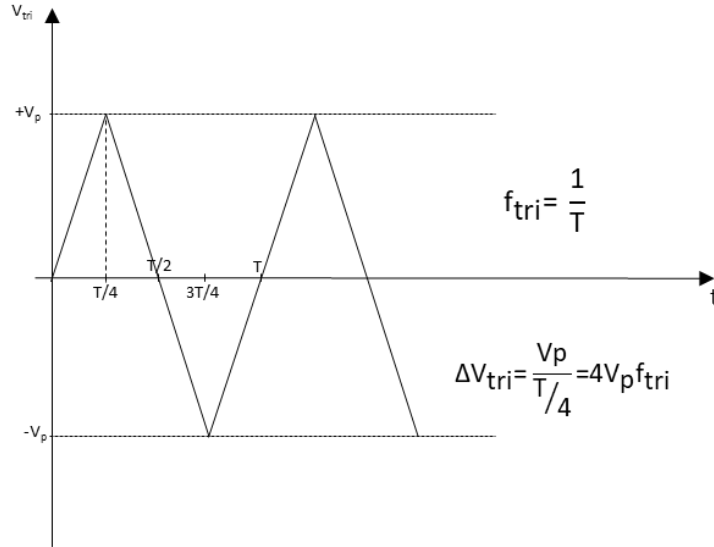
Fonte: Próprio Autor

Com base no esquema apresentado na Figura F.1 desenvolve-se o seguinte raciocínio.

A inclinação da portadora PWM, apresentada na Figura F.2 é dada por (F.2).

$$\text{Slope}_{\text{PortadoraPWM}} = \frac{V_p}{T/4} = \frac{4V_p}{T} = 4V_p \times f_{\text{tri}} \tag{F.2}$$

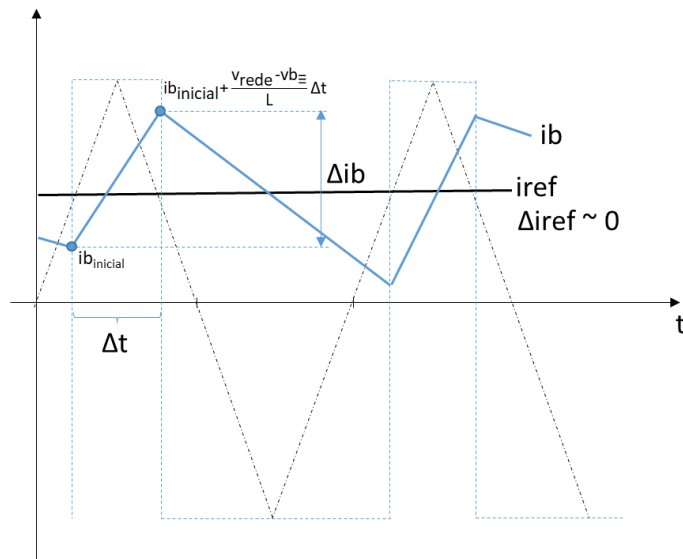
Figura F. 2 - Portadora Triangular – Taxa de Variação



Fonte: Próprio Autor

A Figura F.3 mostra as correntes de referência, iref, e medida, ib.

Figura F. 3 – Corrente de Referência e Medida



Fonte: Próprio Autor

A taxa de variação do sinal v_{ref} , produzido pelo controlador da malha, em um intervalo de tempo Δt , é dado por (F.3).

$$\Delta v_{ref} = K_p (\Delta i_{ref} - \Delta i_b) = K_p \left[\Delta i_{ref} - \left(i_{b_{inicial}} + \frac{v_{b\equiv} - v_{rede}}{L} \Delta t - i_{b_{inicial}} \right) \right] \quad (F.3)$$

Considerando que a taxa de variação da corrente de referência, Δi_{ref} , é desprezível no intervalo de tempo considerado, (F.3) é simplificada levando a (F.4).

$$\Delta v_{ref} = K_p \frac{(v_{b\equiv} - v_{rede})}{L} \Delta t \quad (F.4)$$

Dessa forma, a inclinação de v_{ref} é dada por (F.5).

$$\text{Slope}_{\text{moduladora PWM}} = \frac{\Delta v_{ref}}{\Delta t} = K_p \frac{(v_{b\equiv} - v_{rede})}{L} \quad (F.5)$$

Portanto, voltando à relação (F.1).

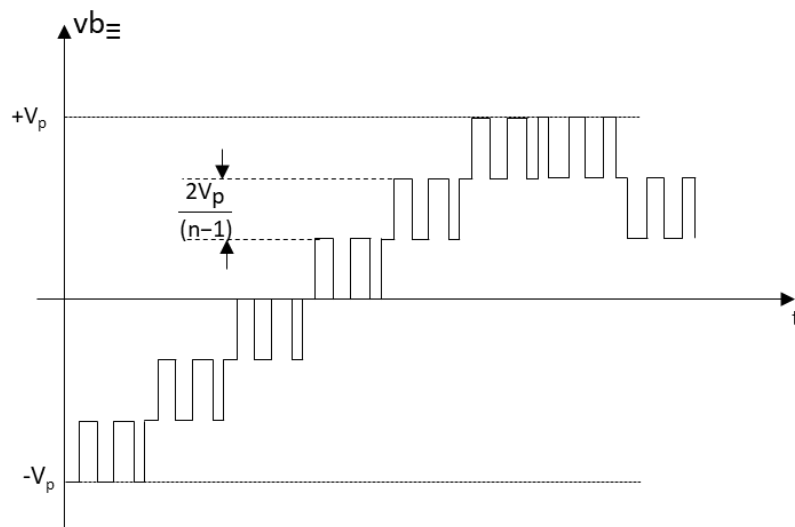
$$K_p \frac{(v_{b\equiv} - v_{rede})}{L} < 4 V_p \times f_{tri} \quad (F.6)$$

Isolando K_p .

$$K_p < 4 \frac{V_p}{(v_{b\equiv} - v_{rede})} \times f_{tri} \times L \quad (F.7)$$

Considerando a forma de onda produzida por um conversor multinível, apresentada na Figura F.4, o valor máximo de $(v_{b\equiv} - v_{rede})$ em qualquer ponto da curva é igual a $2V_p/(n-1)$ onde n é o número de níveis da forma de onda produzida.

Figura F. 4 – Conversor Multinível – Forma de Onda da Tensão no Braço



Fonte: Próprio Autor

Substituindo esse valor máximo em (F.7) tem-se:

$$K_p < 4 \frac{V_p}{2\sqrt{V_p}} \times f_{tri} \times L \quad (F. 8)$$

$$K_p < 2(n-1) \cdot f_{tri} \cdot L \quad (F. 9)$$

Assim, a partir de (F.9), pode-se atribuir um valor máximo para o ganho proporcional no tempo contínuo.

$$K_{p_{cmax}} = 2(n-1) \cdot f_{tri} \cdot L \quad (\text{tempo contínuo}) \quad (F. 10)$$

De acordo com [47], no tempo discreto, o ganho máximo é reduzido pela metade.

$$K_{p_{dmax}} = (n-1) \cdot f_{tri} \cdot L \quad (\text{tempo discreto}) \quad (F. 11)$$

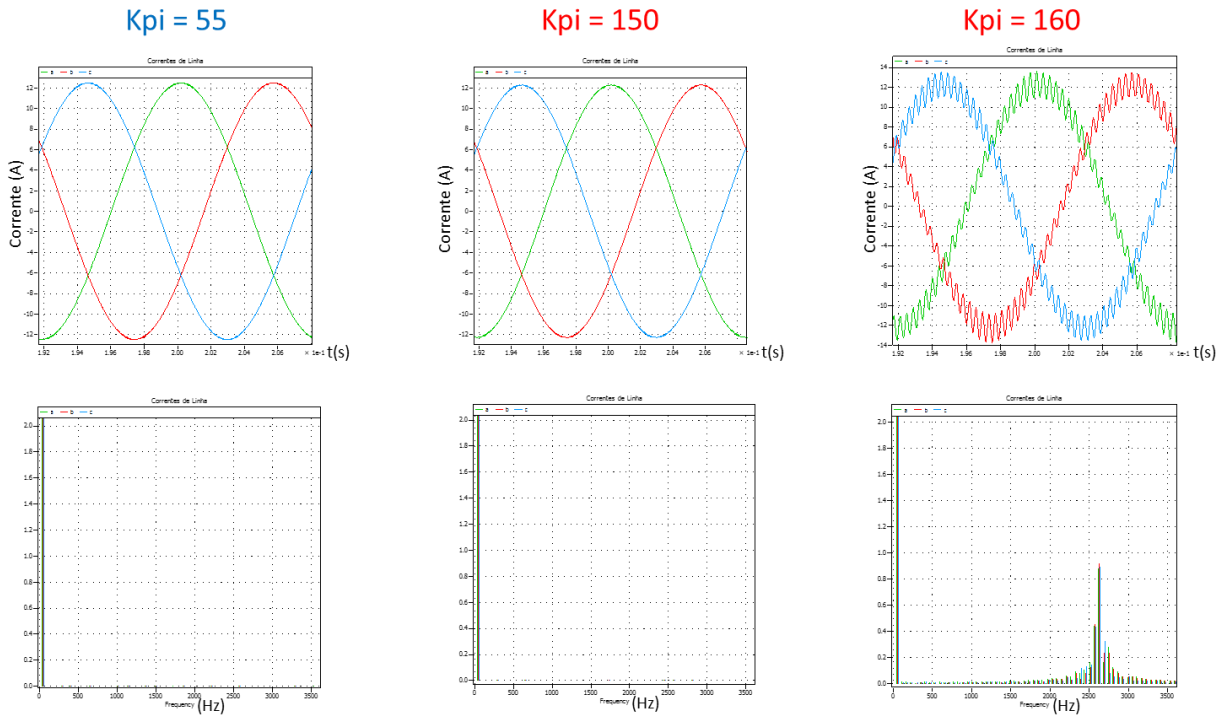
Considerando os parâmetros de projeto dos conversores utilizados nas configurações Y(SSBC) e Δ(SDBC), o ganho máximo a ser considerado no projeto dos controladores da malha de corrente é dado por (F.12) e (F.13) respectivamente.

$$K_{p_{ilim}} = (9-1) \cdot 2000 \cdot 0,01 = 160 \quad \text{para Y(SSBC)} \quad (F. 12)$$

$$K_{p_{ilim}} = (9-1) \cdot 2000 \cdot 0,03 = 480 \quad \text{para } \Delta(\text{SDBC}) \quad (F. 13)$$

A Figura F.5 apresenta o comportamento da corrente injetada com ajustes de ganho proporcional no nível do ajuste proposto e no entorno do limite calculado. Não se nota distorções significativas na corrente injetada mesmo com a elevação do ganho proporcional a um valor ($K_{p_i} = 150$) relativamente próximo do limite ($K_{p_{ilim}} = 160$). Contudo, com o ganho ajustado para o valor limite ($K_{p_i} = K_{p_{ilim}}=160$) a corrente injetada passa a apresentar distorção harmônica significativa produzida pelo agrupamento de componentes harmônicas em torno de 1/6 da frequência PWM (16KHz/6~2,66KHz) que, como indicado no Capítulo 6 (nota de rodapé #25), coincide com a frequência de crossover limite (Margem de Fase = 0°) da função de transferência de malha aberta da malha de Controle da Corrente.

Figura F. 5 – Corrente Injetada em Diferentes Ajustes de Kpi – Configuração Y(SSBC)



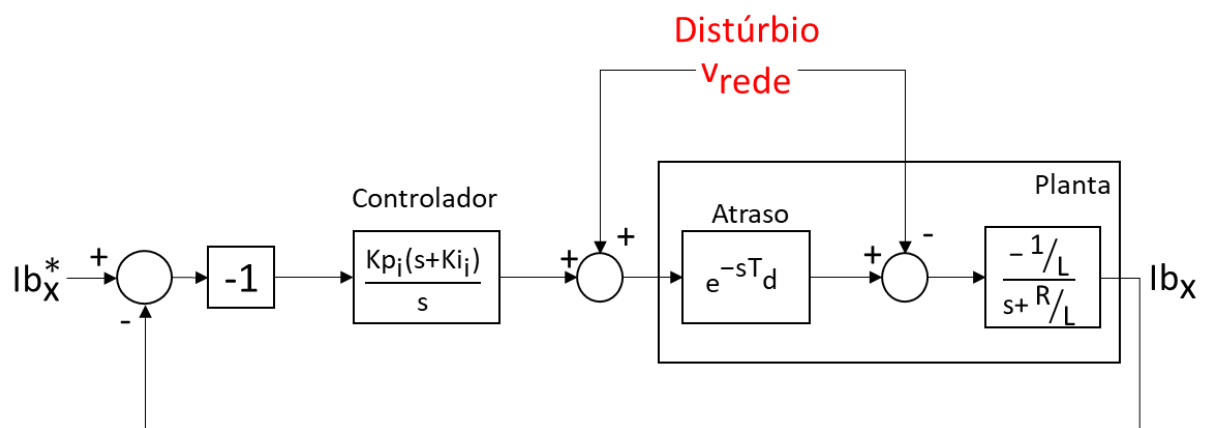
Fonte: Próprio Autor

Apêndice G – Impactos do Atraso de Cálculo no Controle da Corrente Injetada e Determinação da Mínima Frequência de *Crossover* da Malha de Corrente

Neste apêndice é analisado o erro de rastreamento (amplitude e fase) produzido pela malha de Controle da Corrente considerando, além do uso de controladores PI, o atraso de cálculo presente no sistema discreto e os impactos que traz para a estratégia de *feedforward*. Com base na formulação para o cálculo do erro, estabelece-se uma forma de determinar a Mínima Frequência de *Crossover* da malha de Controle da Corrente tendo como condição de contorno os máximos erros permitidos de amplitude ou fase para a corrente injetada dentro da faixa de operação do conversor.

Considere o diagrama na Figura G.1 que apresenta uma versão simplificada da malha de Controle da Corrente Injetada considerando atraso de cálculo e o distúrbio da rede.

Figura G. 1 – Malha de Controle da Corrente Injetada com Atraso de Cálculo e Distúrbio da Rede Considerados



Fonte: Próprio Autor

A partir do diagrama exposto na Figura G.1, obtém-se a equação (G.1) onde são identificadas as funções de transferência de malha fechada da corrente no conversor, I_{b_x} , em função da referência $I_{b_x}^*$, e em função do distúrbio da tensão da rede, V_{rede} , considerando o atraso de cálculo.

$$I_{b_x}(s) = I_{b_x}^*(s) \frac{K_{p_i} K_{i_i} (s + K_{i_i}) e^{-sT_d}}{s^2 + s(R/L) + K_{p_i} K_{i_i} / L e^{-sT_d}} + V_{rede}(s) \frac{1/L (e^{-sT_d} - 1)}{s^2 + s(R/L) + K_{p_i} K_{i_i} / L e^{-sT_d}} = I_{b_{x_ref}}(s) + I_{b_{x_dist}}(s) \quad (G. 1)$$

A partir de (G.1) desenvolvem-se as equações para módulo e fase das funções de transferência da referência e do distúrbio.

$$|I_{b_{x_ref}}| = |I_{b_x}^*| \frac{K_{p_i}/L \sqrt{\omega^2 + K_{i_i}^2}}{\sqrt{\left(-\omega^2 - \frac{\omega K_{p_i}}{L} \sin \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \cos \omega T_d\right)^2 + \left(\frac{\omega R}{L} + \frac{\omega K_{p_i}}{L} \cos \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \sin \omega T_d\right)^2}} \quad (G. 2)$$

$$\angle I_{b_{x_ref}} = \angle I_{b_x}^* + \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{K_{i_i}} \right) - \omega T_d - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega R}{L} + \frac{\omega K_{p_i}}{L} \cos \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \sin \omega T_d}{-\omega^2 - \frac{\omega K_{p_i}}{L} \sin \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \cos \omega T_d} \right) \quad (G. 3)$$

$$|I_{b_{x_dist}}| = |V_{rede}| \frac{1/L \sqrt{(\cos \omega T_d - 1)^2 + \sin^2 \omega T_d}}{\sqrt{\left(-\omega^2 - \frac{\omega K_{p_i}}{L} \sin \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \cos \omega T_d\right)^2 + \left(\frac{\omega R}{L} + \frac{\omega K_{p_i}}{L} \cos \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \sin \omega T_d\right)^2}} \quad (G. 4)$$

$$\angle I_{b_{x_dist}} = \angle V_{rede} + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \omega T_d}{\cos \omega T_d - 1} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega R}{L} + \frac{\omega K_{p_i}}{L} \cos \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \sin \omega T_d}{-\omega^2 - \frac{\omega K_{p_i}}{L} \sin \omega T_d + \frac{K_{p_i} K_{i_i}}{L} \cos \omega T_d} \right) \quad (G. 5)$$

As equações (G.2) a (G.5) podem ser escritas em função da frequência de crossover da malha, ω_{c_i} , fazendo uso das relações da Tabela 6.5.

$$|I_{b_{x_ref}}| = |I_{b_x}^*| \frac{\omega_{c_i} \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{\omega_{c_i}}{10}\right)^2}}{\sqrt{\left(-\omega^2 - \omega \omega_{c_i} \sin \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \cos \omega T_d\right)^2 + \left(\frac{\omega R}{L} + \omega \omega_{c_i} \cos \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \sin \omega T_d\right)^2}} \quad (G. 6)$$

$$\angle I_{b_{x_ref}} = \angle I_{b_x}^* + \tan^{-1} \left(\frac{10\omega}{\omega_{c_i}} \right) - \omega T_d - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega R}{L} + \omega \omega_{c_i} \cos \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \sin \omega T_d}{-\omega^2 - \omega \omega_{c_i} \sin \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \cos \omega T_d} \right) \quad (G. 7)$$

$$|I_{b_{x_dist}}| = |V_{rede}| \frac{1/L \sqrt{(\cos \omega T_d - 1)^2 + \sin^2 \omega T_d}}{\sqrt{\left(-\omega^2 - \omega \omega_{c_i} \sin \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \cos \omega T_d\right)^2 + \left(\frac{\omega R}{L} + \omega \omega_{c_i} \cos \omega T_d + \frac{\omega_{c_i}^2}{10} \sin \omega T_d\right)^2}} \quad (G. 8)$$

$$\angle I_{b_{x_dist}} = \angle V_{rede} + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \omega T_d}{\cos \omega T_d - 1} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega R}{L} + \omega \omega c_i \cos \omega T_d + \frac{\omega c_i^2}{10} \sin \omega T_d}{-\omega^2 - \omega \omega c_i \sin \omega T_d + \frac{\omega c_i^2}{10} \cos \omega T_d} \right) \quad (G. 9)$$

A partir das equações (G.6) a (G.9) determina-se o valor resultante de I_{bx} na forma retangular

$$\text{Re}[I_{b_x}] + j\text{Im}[I_{b_x}] = (|I_{b_{x_ref}}| \cos \angle I_{b_{x_ref}} + |I_{b_{x_dist}}| \cos \angle I_{b_{x_dist}}) + j(|I_{b_{x_ref}}| \sin \angle I_{b_{x_ref}} + |I_{b_{x_dist}}| \sin \angle I_{b_{x_dist}}) \quad (G. 10)$$

E, então, na forma polar.

$$|I_{b_x}| = \sqrt{\text{Re}[I_{b_x}]^2 + \text{Im}[I_{b_x}]^2} \quad (G. 11)$$

$$\angle I_{b_x} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[I_{b_x}]}{\text{Re}[I_{b_x}]} \right) \quad (G. 12)$$

Finalmente calcula-se o erro em relação à referência.

$$\text{Emag}\% = \left(\frac{|I_{b_x}|}{|I_{b_x}^*|} - 1 \right) 100\% \quad (G. 13)$$

$$\text{Efase}^{\circ} = \angle I_{b_x} - \angle I_{b_x}^* \quad (G. 14)$$

Como afirmado anteriormente, o objetivo é determinar a Mínima Frequência de Crossover (e, portanto, a Máxima Margem de Fase) que garante erros de magnitude e fase menores ou iguais a limites estipulados⁵⁵.

Esse objetivo é atingido introduzindo-se a formulação apresentada acima em uma planilha de cálculo eletrônica (MS-Excel) e realizando testes de hipótese (ferramenta *goal seek*) tendo como meta a ser atingida os limites estipulados para os erros de magnitude ou fase da corrente e, como variável de entrada, a Frequência de Crossover.

Deve-se considerar que, pelo fato da amplitude e fase do distúrbio da rede não depender da corrente injetada, sua contribuição para o erro de rastreamento é maior na medida que a amplitude da corrente diminui. Pelo mesmo motivo essa contribuição também é diferente dependendo modo de operação (capacitivo ou indutivo). Assim, o

⁵⁵ Como parâmetro de projeto foi definido que os módulos dos erros de rastreamento, amplitude e fase, não devem ser maiores que 5% e 5° respectivamente dentro da faixa de operação estabelecida.

processo é realizado considerando a menor amplitude da faixa de operação⁵⁶ para os dois modos de injeção de reativos (capacitivo e indutivo).

A Tabela G.1 apresenta os valores obtidos para a Frequência de *Crossover* e Margem de Fase considerando, para cada configuração, Y(SSBC) e Δ (SDBC), e modo de operação, Indutivo e Capacitivo, os limites estabelecidos pelos erros máximos permitidos de +/-5% na magnitude ou de +/-5° na fase da corrente injetada.

Tabela G. 1 – Valores de ω_c e MF para erros máximos permitidos na Corrente Injetada dentro da faixa de operação

Configuração	Modo de Operação	Referência	Distúrbio	Corrente Injetada	ω_c	MF
Y(SSBC)	Indutivo	$I_{b_x}^* = 1,73A \angle -90^\circ$	$V_{rede} = 179,6V \angle 0^\circ$	$I_{b_x} = 1,74A \angle -95,0^\circ$	4519rd/s	65,7°
Y(SSBC)	Capacitivo	$I_{b_x}^* = 1,73A \angle 90^\circ$	$V_{rede} = 179,6V \angle 0^\circ$	$I_{b_x} = 1,82A \angle 90,0^\circ$	5456rd/s	60,7°
Δ (SDBC)	Indutivo	$I_{b_x}^* = 1,00A \angle -60^\circ$	$V_{rede} = 311,1V \angle 30^\circ$	$I_{b_x} = 1,00A \angle -65,0^\circ$	4519rd/s	65,7°
Δ (SDBC)	Capacitivo	$I_{b_x}^* = 1,00A \angle 120^\circ$	$V_{rede} = 311,1V \angle 30^\circ$	$I_{b_x} = 1,05A \angle 121,4^\circ$	5456rd/s	60,7°

Em relação ao valores obtidos deve-se observar que:

- Como os circuitos de acoplamento foram dimensionados para que os conversores tenham um modelo de Thevenin equivalente em ambas as configurações, e as correntes nos braços respeitam a proporção de $1:1/\sqrt{3}$, os valores obtidos para a Frequência de *Crossover*, ω_c , são iguais para as duas configurações em cada modo de operação (indutivo/capacitivo).
- A Margem de Fase, MF, é calculada a partir de ω_c , com base na relação entre as duas grandezas apontada na Tabela 6.3.
- No modo Indutivo é o Erro de Fase na corrente injetada que impõe o limite mínimo para a Frequência de *Crossover*. Já no modo Capacitivo o limite mínimo é determinado pelo Erro de Amplitude (vide valores realçados em vermelho na tabela).

Para que se garanta erros dentro dos limites, independentemente do modo de operação, deve-se escolher o pior caso que é representado pelo maior valor obtido para a Frequência de *Crossover*.

⁵⁶ Para a configuração Y(SSBC): $1,73A(\text{pico}) \leq I_{b_x}^* \leq 12,1A(\text{pico})$. Para a configuração Δ (SDBC): $1,00A(\text{pico}) \leq I_{b_x}^* \leq 7,0A(\text{pico})$. O cálculo é realizado para os valores inferiores das faixas onde o erro relativo é maior.

Dessa forma, a mínima Frequência de *Crossover* e, portanto, a máxima Margem de Fase, considerados os limites de erro de rastreamento e amplitude da corrente injetada pré-definidos, são apresentadas em (G.15) e (G.16).

$$\omega_{c_{\min}}=5456\text{rd/s} \quad (\text{G. 15})$$

$$\text{MF}_{\max}=60,7^\circ \quad (\text{G. 16})$$

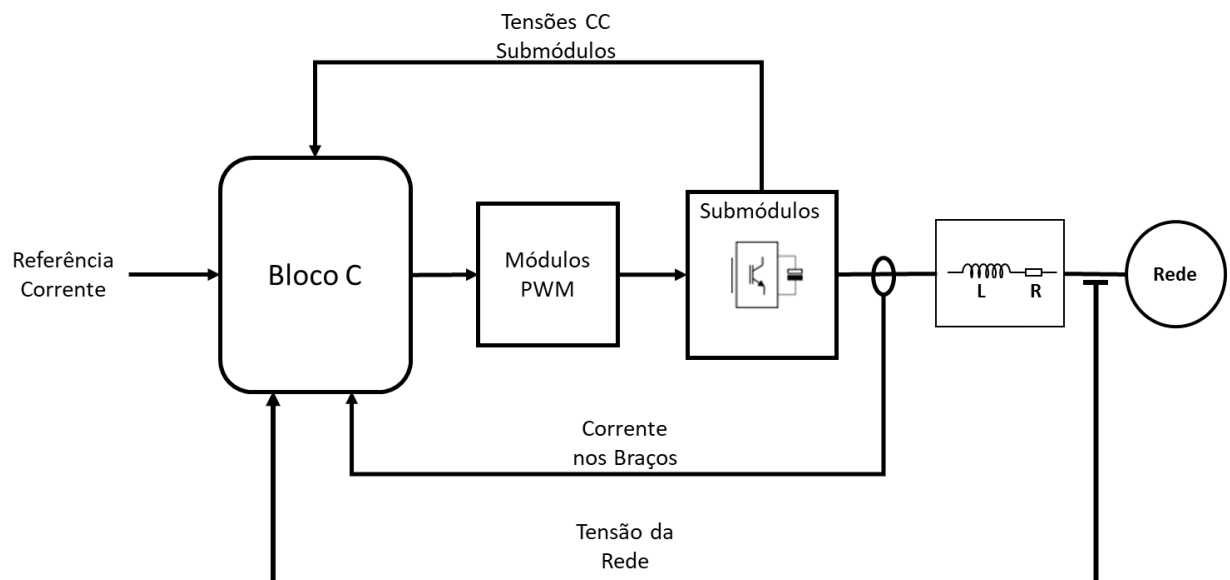
Tais valores devem ser respeitados ao se definir a Frequência de *Crossover* da malha de Controle da Corrente, da qual são derivados os ganhos Proporcional e Integral dos controladores utilizados.

Apêndice H – Descrição do Modelo de Simulação P Utilizando o Software PLECS

Como explicado no capítulo 7 o Modelo P, foi utilizado para representar um sistema experimental. Trata-se de um modelo trifásico, implementado com auxílio do *software* de simulação PLECS, em que limites de saturação nos controladores e no conversor, a modulação PWM e eventuais acoplamentos entre as malhas de controle estão presentes.

A Figura H.1 apresenta a organização do modelo de simulação identificando os principais blocos.

Figura H. 1 – Organização do Modelo de Simulação Implementado no Software PLECS



Fonte: Próprio autor

O Bloco C concentra todas as funções do modelo com a exceção da geração dos sinais PWM, realizada por módulos específicos que acionam os submódulos do conversor.

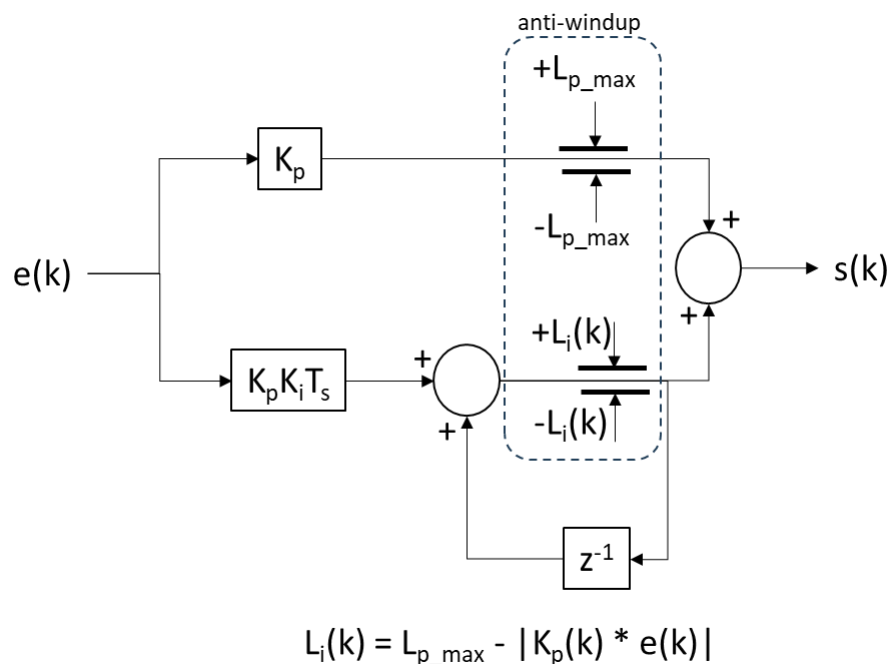
Entre as funções realizadas pelo Bloco C estão:

- Amostragem das tensões de linha da rede, corrente nos braços do conversor, tensões CC dos capacitores dos submódulos, referência de corrente reativa a uma taxa de 16kHz (intervalos de 62,5 μ s).
- Conversões de tensões e correntes de linha x fase conforme a configuração simulada, Y(SSBC) ou Δ (SDBC), de acordo com as transformações indicadas em (B.11) e (4.2) respectivamente.

- PLL Trifásico sincronizado com a tensão da rede (sequência positiva) baseado no projeto realizado em [42]. Seus ganhos Proporcional e Integral foram determinados seguindo o procedimento proposto em [48].
- Malha de Corrente com controladores PI e *feedforward* da tensão da rede.
- Malha de Regulação da Média Global das tensões CC com Filtro Passa-Baixas e controlador PI.
- Malha de Balanceamento das tensões CC com Filtros Passa-Baixas e controladores PI.
- Malhas de Equalização Individual utilizando controladores P.
- Normalização dos sinais entregues aos Módulos PWM com base nas tensões CC dos submódulos.
- Atualização simultânea de todos os módulos PWM (*All Cells Update* [22]) de acordo com a taxa de amostragem de 16kHz (intervalos de 62,5µs).

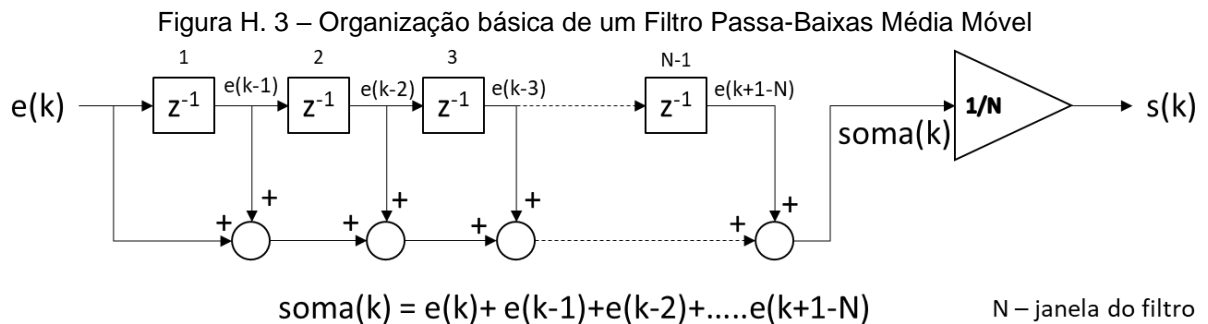
Os controladores PI discretos utilizados nas várias malhas implementadas pelo Bloco C implementa a parcela integral pelo método de integração numérica retangular para trás (*Backward Euler*) e inclui dispositivo *anti-windup* como mostra a Figura H.2 [33]. Os limites de atuação dos dispositivos *anti-windup* foram estabelecidos de forma a não alterarem a dinâmica esperada das malhas de controle.

Figura H. 2 – Organização dos Controladores PI



Fonte: Próprio autor

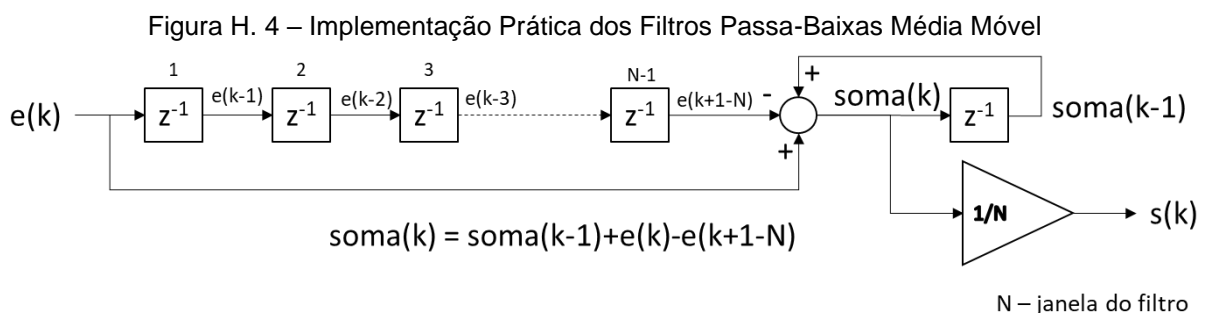
Os filtros Passa-Baixas do tipo Média Móvel tem a organização básica apresentada na Figura H.3.



Fonte: Próprio autor

Do ponto de vista prático a implementação dessa organização é pouco eficiente uma vez que exige que a soma dos valores das N últimas entradas, $soma(k)$, seja refeita a cada nova entrada $e(k)$.

Sendo assim, para tornar o processamento mais eficiente, a implementação dos filtros segue a organização apontada na Figura H.4 onde o algoritmo mantém registro da soma dos valores das últimas N entradas, $soma(k-1)$, mantendo-o atualizado ao somar o valor de cada nova entrada, $e(k)$, e subtrair o valor mais antigo dentro da janela do filtro, $e(k+1-N)$.



Fonte: Próprio autor

As listagens dos códigos fonte, em C, dos blocos para as configurações Y(SSBC) e Δ (SDBC) são incluídos no final deste apêndice.

Os módulos PWM são implementados no tempo contínuo e seguem a organização apresentada na Figura H.5. As portadoras PWM tem frequência de 2kHz. A fase de cada portadora é determinada por (H.1) [11].

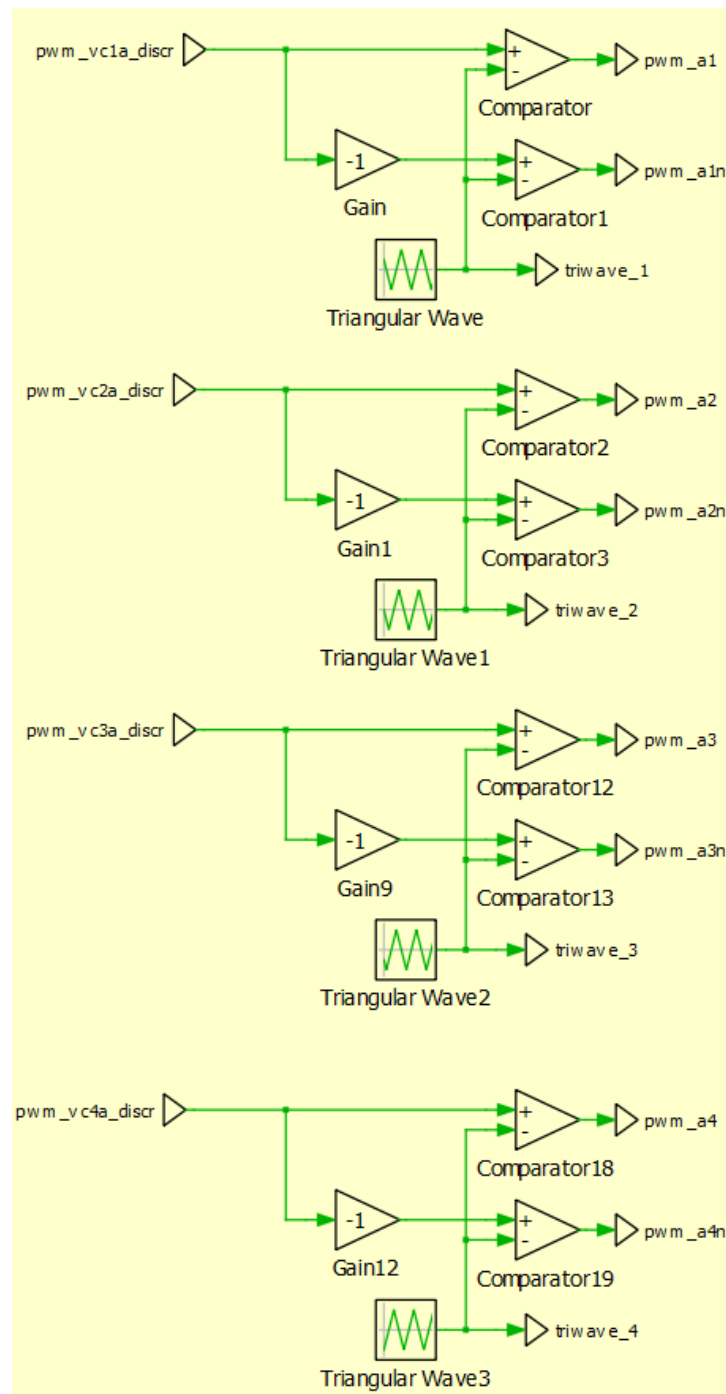
$$\theta_{\text{pwm}}^i = \pi \frac{i-1}{N} \quad (\text{H. 1})$$

Onde $i=1,2,\dots,N$ identifica cada uma das N portadoras utilizadas.

Considerando que nas configurações estudadas $N=4$ e π equivale a um intervalo de tempo de 250us dado que o período das portadoras é de 500us, o deslocamento de tempo entre cada portadora é dado por (H.2).

$$\Delta t_{\text{pwm}} = 250 \frac{1}{4} = 62,5 \text{us} \quad (\text{H. 2})$$

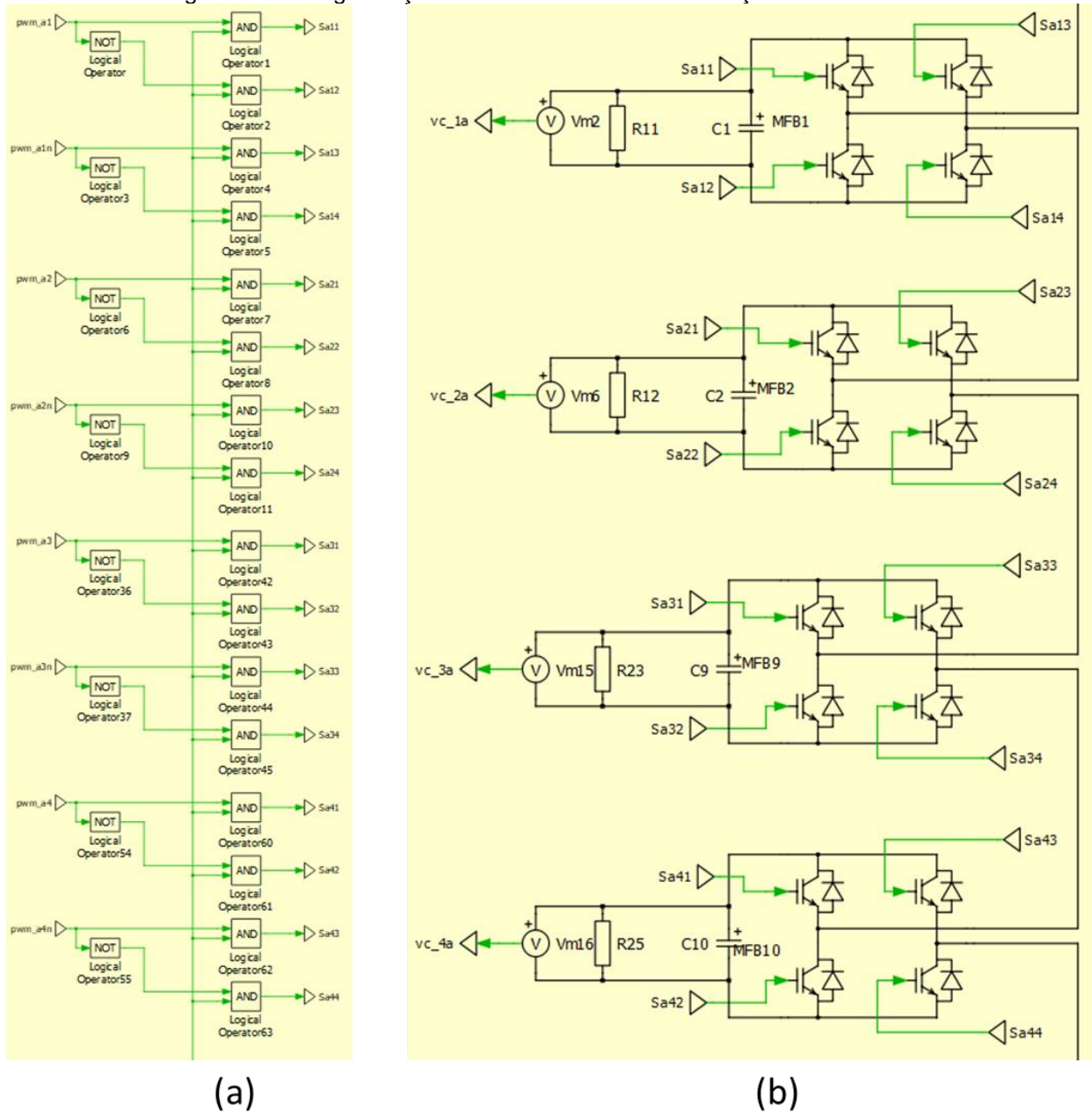
Figura H. 5 – Organização dos Módulos PWM
(a figura mostra os módulos de um braço do conversor)



Fonte: Próprio autor

Os submódulos são implementados com Pontes H completas. A Figura H.6 apresenta a organização dos submódulos de um braço do conversor. A Figura H.6(a) mostra a sessão que, a partir dos sinais provenientes dos módulos PWM, produz os sinais de acionamento das Pontes H. A Figura H.6(b) mostra as Pontes H conectadas em cascata.

Figura H. 6 – Organização dos Submódulos de Um Braço do Conversor



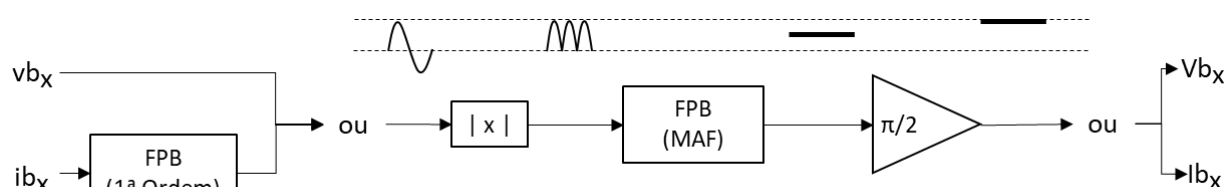
Fonte: Próprio autor

Os modelos das malhas de Regulação da Média Global e Balanceamento das tensões CC dos braços bem como as equalização das tensões CC dos submódulos apresentados no Capítulo 5 (vide itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.3, figuras 5.6 a 5.10) preveem a utilização das amplitudes (pico) das tensões e correntes nos braços do conversor. Também preveem a utilização de um sinal de amplitude unitária, de mesma frequência e fase da corrente nos braços, $ibsinc_x$.

O processo de deteção das amplitudes das tensões e correntes é apresentado na Figura H.6. Ele tem início com a obtenção do módulo do sinal (equivalente a uma

retificação em onda completa) e, em seguida, do seu valor médio através da filtragem das componentes de 120Hz ou superiores realizada por um filtro Passa-Baixas de média móvel. O valor médio é multiplicado por $\pi/2$ para se chegar ao valor de pico do sinal original.

Figura H. 7 – Processo básico para detecção da amplitude (pico) da tensão ou corrente nos braços do conversor



Fonte: Próprio autor

O sinal de tensão, vb_x , no braço utilizado é o produzido pela Malha de Controle da Corrente. O sinal de corrente, ib_x , é o medido pelos sensores de cada braço. No caso da corrente nos braços, quando a amplitude é muito baixa, o sinal obtido apresenta distorção harmônica elevada. Por isso, antes de ser introduzido no detetor passa por uma filtragem cujo objetivo é remover harmônicas superiores. Nas simulações a filtragem é realizada por um filtro externo, de primeira ordem, cuja frequência de corte foi estabelecida em 420Hz. Dessa forma as harmônicas superiores são suficientemente atenuadas sem que a componente fundamental sofra atenuação ou deslocamento de fase considerável.

O sinal, $ibsinc_x$, é obtido dividindo-se o sinal de corrente filtrado pela própria amplitude detectada.

O método proposto apresentou bons resultados em todas as simulações realizadas. Algumas simplificações que, numa implementação prática, podem ser aplicadas são:

- Nas malhas de Regulação da Média Global, o sinal Vb_p (vide item 5.2.1, figuras 5.6 e 5.7), que é a média das amplitudes das tensões nos braços do conversor que divide o sinal de saída dos controladores, pode ser substituído por um valor fixo de magnitude próxima à amplitude da tensão da rede.
- Nas malhas de Equalização Individual, o sinal $ibsinc_x$ pode ser substituído por um sinal quadrado, obtido pela passagem do sinal de corrente por um comparador [11][49].

- Ainda nas malhas de Equalização Individual, o sinal I_{b_x} (vide item 5.3, Figura 5.10), que é a amplitude da corrente nos braços e divide o sinal de saída dos controladores, pode ser substituído por um valor fixo de magnitude próxima à amplitude mínima da faixa de operação de corrente do conversor.

Tais simplificações foram testadas em simulações com resultados similares aos obtidos com o método proposto. A verificação em um sistema experimental é necessária para avaliar aspectos positivos e negativos de cada abordagem e determinar qual apresenta melhor desempenho em condições reais de funcionamento.

As tabelas H.1 e H.2 listam os códigos fonte básicos, na linguagem C, para as configurações $Y(SSBC)$ e $\Delta(SDBC)$.

Tabela H. 1 – Código Fonte, na linguagem C, para a Configuração Y(SSBC)

```

// Declarações

#include <math.h>

// Constantes

#define _PI          3.1415926535898 // pi;
#define _PI_DIV2    1.570796326795 // pi;
#define _2PI        6.2831853071799 // 2*pi;
#define _2PI_DIV3   2.0943951023932 // 2*pi/3;
#define _2_3        0.6666666666667 // 2/3
#define _1_3        0.3333333333333 // 1/3
#define _SQRT3_3    0.5773502691896 // raiz de 3 sobre 3
#define _SQRT3_2    0.8660254037844 // raiz de 3 sobre 2

#define Vrede       179.6 // Valor de pico
#define Ts          6.25e-5 // Intervalo de amostragem
#define omega       376.9911 // Frequência angular da rede
#define N           4 // Número de submódulos por braço
#define Vpwm        1 // Amplitude normalizada da portadora pwm
#define vc_ref      85 // Nível de tensão CC dos submódulos 28900
#define soma_vc2    28900 // Soma dos quadrados das tensões CC dos submódulos de um braço
#define Kpindiv     0.2 // Ganho proporcional malha de equalização individual
#define Kpvc_f      0.26 // Ganho P das malhas de regulação e balanceamento das tensões CC c/ filtro
#define Kpvc        0.44 // Idem s/ filtro
#define Kivc_f      Kpvc_f*13.8 // Produto ganhos P e I das malhas de regulação e balanceamento das tensões
// CC c/ filtro
#define Kivc        Kpvc*0.27 // Idem s/filtro
#define Kpirede     55 // Ganho proporcional malha de corrente
#define Kiirede     Kpirede*546 // Produto ganhos proporcional e integral da malha de corrente
#define LimCorr     800 // Limite anti-windup malha de corrente
#define LimCluster  150 // Limite anti-windup malha de regulação
#define LimTensãoC  1500 // Limite anti-windup malha de balanceamento
#define LimTensãoE  30 // Limite malha de equalização
#define Lim_equ     0.5 // Limite sinal na saída do controlador malha de equalização individual
#define vb_factor   200 // Divisor malha regulação da tensão CC do braço
#define ib_factor   3.5 // Divisor malha de equalização individual
#define vbmin       150 // Limite mínimo amplitude da tensão nos braços
#define ibmin       1 // Limite amplitude mínima da corrente - malha de equalização individual
#define lim_seq0    215 // Limite de amplitude para tensão de sequência zero

#define tamanho_filtro 267 // Parâmetro filtro passa-baixa 60Hz do PLL
#define filtro_tensão 133 // Parâmetro filtro passa-baixa 240Hz tensão CC
#define filtro_corrente 133 // Parâmetro filtro passa-baixa 120HZ corrente

#define Kp_pll      154.69826 // Ganhos PLL
#define Ki_pll      Kp_pll*0.249921

// constantes de controle do programa

#define filtro_hab_cluster 1
#define filtro_hab_balanco 1
#define contr_pi_cluster 1
#define contr_pi_balanco 1
#define a 1

// ***** ATENÇÃO *****
// Para evitar modificações no código os índices indicadores de fase/linha se mantem fixos.
// Para configurações Estrela a=a; b=b; c=c
// Para configurações Delta a=ab; b=bc; c=ca
//*****/

// Entradas
float vc_a[4], vc_b[4], vc_c[4]; // tensões nos capacitores
float ifase_a, ifase_b, ifase_c; // correntes nas fases

```

```

float vbraco_a, vbraco_b, vbraco_c; // amplitude das tensões nos braços
float icarga_a, icarga_b, icarga_c; // correntes na carga
float vfase_a, vfase_b, vfase_c; // tensões de linha
float vfase_ab, vfase_bc, vfase_ca; // tensões de fase
float vb_a, vb_b, vb_c, vb_m; // Valor de pico das tensões nos braços
float ib_a, ib_b, ib_c, ib_m; // Valores de pico e de ajuste das correntes nos braços
float ib_a_an; // Sinal filtrado de corrente nos braços
float ib_b_an; // Sinal filtrado de corrente nos braços
float ib_c_an; // Sinal filtrado de corrente nos braços
float degrau_cluster = 28900; // temporário
float degrau_equpos = 0; // temporário
float degrau_equneg = 0; // temporário

// Saidas PWM

float modpwm_a[4], modpwm_b[4], modpwm_c[4];

// Variáveis Uso Geral
int j, ptr=0, ptrv = 0, ptrvm = 0;
int ptr_vba = 0, ptr_vbb = 0, ptr_vbc = 0;

// Variáveis Detectores da tensão de Pico nos braços
float MAF_vba_buffer[267], MAF_vba_out=0, vba_in;
float MAF_vbb_buffer[267], MAF_vbb_out=0, vbb_in;
float MAF_vbc_buffer[267], MAF_vbc_out=0, vbc_in;
float MAFvc_vm_buffer[267], MAFvc_vm_out=0;

// Variáveis Detectores da corrente de Pico nos braços
float MAF_iba_buffer[267], MAF_iba_out=0, iba_in;
float MAF_ibb_buffer[267], MAF_ibb_out=0, ibb_in;
float MAF_ibc_buffer[267], MAF_ibc_out=0, ibc_in;

// Variáveis PLL Tensão da Rede
float V_pll_par[3], V_pll_per[3], PLL_dp;
float MAF_buffer[268], MAF_out=0;
float PI1=0, PI2=0, erro_PLL, PI1_ABS;
float delta_omega=0, teta=0;
float vpll[3], v[3];

// Variáveis utilizadas na malha de controle de corrente
float iref_comp_a, iref_comp_b, iref_comp_c;
float vcm_a, vcm_b, vcm_c;
float ierro_a, ierro_b;
float Rpcorr_a = 0, Ricorr_a = 0, Rpcorr_b = 0, Ricorr_b = 0;
float Rpcorr_a_abs = 0, Rpcorr_b_abs = 0;
float Ploutcorr_a = 0, Ploutcorr_b = 0;
float Vref_a = 0, Vref_b = 0, Vref_c = 0;

// Variáveis utilizadas na malha de controle de tensão - cluster

float Kpvcluster, Kivcluster, Kpvbalanco, Kivbalanco;

float svc2_a, svc2_b, svc2_c, svc2_m;
float evc2_a, evc2_b, evc2_c, evc2_m;

float MAFvc_a_buffer[133], MAFvc_a_out = 0;
float MAFvc_b_buffer[133], MAFvc_b_out = 0;
float MAFvc_c_buffer[133], MAFvc_c_out = 0;

float Rpcluster_a = 0, Rpcluster_b = 0, Rpcluster_c = 0, Rpcluster_m = 0;

float Rpcluster_a_abs = 0, Rpcluster_b_abs = 0, Rpcluster_c_abs = 0, Rpcluster_m_abs = 0;
float Ricluster_a = 0, Ricluster_b = 0, Ricluster_c = 0, Ricluster_m = 0;
float Ploutcluster_a = 0, Ploutcluster_b = 0, Ploutcluster_c, Ploutcluster_m = 0;

float vref_a, vref_b, vref_c, vz ;
float i_ref_a, i_ref_b, i_ref_m;

```

```
// Variaveis utilizadas na malha de controle de tensões individuais
```

```
float vcm_a = 1, vcm_b = 1, vcm_c = 1, vcm;
float verro_1a, verro_2a, verro_3a, verro_4a;
float verro_1b, verro_2b, verro_3b, verro_4b;
float verro_1c, verro_2c, verro_3c, verro_4c;
float sinal_ia, sinal_ib, sinal_ic;
```

```
float Rpindiv_a1 = 0, Rpindiv_b1 = 0, Rpindiv_c1 = 0;
float Rpindiv_a2 = 0, Rpindiv_b2 = 0, Rpindiv_c2 = 0;
float Rpindiv_a3 = 0, Rpindiv_b3 = 0, Rpindiv_c3 = 0;
float Rpindiv_a4 = 0, Rpindiv_b4 = 0, Rpindiv_c4 = 0;
```

```
float deltavc_1a, deltavc_2a, deltavc_3a, deltavc_4a;
float deltavc_1b, deltavc_2b, deltavc_3b, deltavc_4b;
float deltavc_1c, deltavc_2c, deltavc_3c, deltavc_4c;
```

```
// Código Executado
```

```
// Tensões de Fase-Neutro da Rede
```

```
vfase_ab = Input(0);
vfase_bc = Input(1);
vfase_ca = Input(2);
```

```
//Referência de Corrente Reativa
```

```
iref_comp_a = Input(3);
iref_comp_b = Input(4);
iref_comp_c = Input(5);
```

```
//Tensões nos capacitores
```

```
vc_a[0] = Input(6);
vc_a[1] = Input(7);
vc_a[2] = Input(8);
vc_a[3] = Input(9);
vc_b[0] = Input(10);
vc_b[1] = Input(11);
vc_b[2] = Input(12);
vc_b[3] = Input(13);
vc_c[0] = Input(14);
vc_c[1] = Input(15);
vc_c[2] = Input(16);
vc_c[3] = Input(17);
```

```
//Correntes no conversor
```

```
ifase_a = Input(18);
ifase_b = Input(19);
ifase_c = Input(20);
```

```
// Correntes no conversor filtradas
```

```
ib_a_an = Input(21);
ib_b_an = Input(22);
ib_c_an = Input(23);
```

```
// Degraus de referência
```

```
//degrau_cluster = Input(24);
//degrau_equpos = Input(25);
//degrau_equneg = Input(26);
// ----- = Input(28);
```

```
// -- Conversão das tensões de fase em tensões de linha
```

```
vfase_a = (vfase_ab - vfase_ca)/3;
vfase_b = (vfase_bc - vfase_ab)/3;
```

```

vfase_c = (vfase_ca - vfase_bc)/3;

// -- Captura das tensões nos capacitores e calculo dos valores médios por braço

vcm_a = (vc_a[0]+vc_a[1]+vc_a[2]+vc_a[3])/N;
vcm_b = (vc_b[0]+vc_b[1]+vc_b[2]+vc_b[3])/N;
vcm_c = (vc_c[0]+vc_c[1]+vc_c[2]+vc_c[3])/N;

vcm = (vcm_a+vcm_b+vcm_c)*_1_3;

//-- Sinal com frequência e fase da corrente

if(ib_a_an>0)sinal_ia = 1; else sinal_ia = -1;
if(ib_b_an>0)sinal_ib = 1; else sinal_ib = -1;
if(ib_c_an>0)sinal_ic = 1; else sinal_ic = -1;

// -- Soma do Quadrado das Tensões CC nos Braços
svc2_a = pow(vc_a[0],2) + pow(vc_a[1],2) + pow(vc_a[2],2) + pow(vc_a[3],2);
svc2_b = pow(vc_b[0],2) + pow(vc_b[1],2) + pow(vc_b[2],2) + pow(vc_b[3],2);
svc2_c = pow(vc_c[0],2) + pow(vc_c[1],2) + pow(vc_c[2],2) + pow(vc_c[3],2);

svc2_m = (svc2_a+svc2_b+svc2_c)/3;

//-- Detector do valor de pico das tensões e correntes nos braços

ptr_vba++;
if(ptr_vba==filtro_tensão) ptr_vba=0;

ptr_vbb++;
if(ptr_vbb==filtro_tensão) ptr_vbb=0;

ptr_vbc++;
if(ptr_vbc==filtro_tensão) ptr_vbc=0;

// -- Detecção das amplitudes das tensões

vba_in = fabs(Vref_a*N*vcm_a);
vbb_in = fabs(Vref_b*N*vcm_b);
vbc_in = fabs(Vref_c*N*vcm_c);

// MAF-- braço a

MAF_vba_out+=(vba_in-MAF_vba_buffer[ptr_vba])/filtro_tensão;
MAF_vba_buffer[ptr_vba]=vba_in;

vb_a = MAF_vba_out;
vb_a = vb_a * _PI_DIV2;
if(vb_a < vbmin)vb_a = vbmin;

// MAF--braço b

MAF_vbb_out+=(vbb_in-MAF_vbb_buffer[ptr_vbb])/filtro_tensão;
MAF_vbb_buffer[ptr_vbb]=vbb_in;

vb_b = MAF_vbb_out;
vb_b = vb_b * _PI_DIV2;
if(vb_b < vbmin)vb_b = vbmin;

// MAF-- braço c

MAF_vbc_out+=(vbc_in-MAF_vbc_buffer[ptr_vbc])/filtro_tensão;
MAF_vbc_buffer[ptr_vbc]=vbc_in;

vb_c = MAF_vbc_out;
vb_c = vb_c * _PI_DIV2;
if(vb_c < vbmin)vb_c = vbmin;

```

```

vb_m = (vb_a + vb_b + vb_c) * _1_3;

// -- Detecção das amplitudes das correntes

iba_in = fabs(ib_a_an);
ibb_in = fabs(ib_b_an);
ibc_in = fabs(ib_c_an);

// MAF-- braço a

MAF_iba_out+=(iba_in-MAF_iba_buffer[ptr_vba])/filtro_corrente;
MAF_iba_buffer[ptr_vba]=iba_in;

ib_a = MAF_iba_out;
ib_a = ib_a * _PI_DIV2;
if(ib_a < ibmin)ib_a = ibmin;

// MAF--braço b

MAF_ibb_out+=(ibb_in-MAF_ibb_buffer[ptr_vbb])/filtro_corrente;
MAF_ibb_buffer[ptr_vbb]=ibb_in;

ib_b = MAF_ibb_out;
ib_b = ib_b * _PI_DIV2;
if(ib_b < ibmin)ib_b = ibmin;

// MAF-- braço c

MAF_ibc_out+=(ibc_in-MAF_ibc_buffer[ptr_vbc])/filtro_corrente;
MAF_ibc_buffer[ptr_vbc]=ibc_in;

ib_c = MAF_ibc_out;
ib_c = ib_c * _PI_DIV2;
if(ib_c < ibmin)ib_c = ibmin;

ib_m = (ib_a + ib_b + ib_c) * _1_3;

// -- Fim da rotina de captura da amplitude das tensões e correntes nos braços

//-- PLL Rede Tensão da Rede

V_pll_par[0]=sin(teta);
V_pll_par[1]=sin(teta-_2PI_DIV3);
V_pll_par[2]=sin(teta+_2PI_DIV3);

V_pll_per[0]=cos(teta);
V_pll_per[1]=cos(teta-_2PI_DIV3);
V_pll_per[2]=cos(teta+_2PI_DIV3);

vpll[0]= V_pll_par[0];
vpll[1]= V_pll_par[1];
vpll[2]= V_pll_par[2];

PLL_dp = vfase_a*V_pll_per[0]+ vfase_b*V_pll_per[1]+ vfase_c*V_pll_per[2];
PLL_dp = PLL_dp*_2_3/rede;

// MAF

ptr++;
if(ptr==tamanho_filtro) ptr=0;

MAF_out+=(PLL_dp-MAF_buffer[ptr])/tamanho_filtro;
MAF_buffer[ptr]=PLL_dp;

// CONTROLADOR

```

```

erro_PLL = MAF_out;
PI1= Kp_pll*erro_PLL;
if(PI1 > 30) PI1 = 30;
if(PI1 < -30) PI1 = -30;
PI1_ABS = PI1;
if(PI1_ABS< 0) PI1_ABS= -PI1_ABS;

PI2+= erro_PLL*Ki_pll*Ts;
if(PI2 > 30-PI1_ABS)PI2 = 30-PI1_ABS;
if(PI2 < -30+PI1_ABS) PI2 = -30+PI1_ABS;

delta_omega=PI1+PI2;

// INTEGRADOR

teta+=(omega+delta_omega)*Ts;

if(teta>_PI) teta=-_2PI;
if(teta<-_PI) teta+=_2PI;

// -- FIM DO PLL Tensão da Rede

// -- Malha de Regulação da Média Global

evc2_m = degrau_cluster - svc2_m;

// Filtro

if(filtro_hab_cluster == 1)
{

Kpvcluster = Kpvc_f;
Kivcluster = Kivc_f;

ptrvm++;
if(ptrvm==filtro_tensão) ptrvm=0;

MAFvc_vm_out+=(evc2_m - MAFvc_vm_buffer[ptrvm])/filtro_tensão; // malha a
MAFvc_vm_buffer[ptrvm]=evc2_m;
}
else
{

Kpvcluster = Kpvc;
Kivcluster = Kivc;

MAFvc_vm_out = evc2_m;
}

// Controlador PI

Rpcluster_m = MAFvc_vm_out * Kpvcluster;
if (Rpcluster_m > LimCluster) Rpcluster_m = LimCluster;
if (Rpcluster_m < -LimCluster) Rpcluster_m = -LimCluster;

Rpcluster_m_abs = Rpcluster_m;
if (Rpcluster_m_abs < 0) Rpcluster_m_abs = -Rpcluster_m_abs;

Ricluster_m+= MAFvc_vm_out * Kivcluster * Ts * contr_pi_cluster;
if (Ricluster_m > LimCluster-Rpcluster_m_abs) Ricluster_m = LimCluster - Rpcluster_m_abs;
if (Ricluster_m < -LimCluster+Rpcluster_m_abs) Ricluster_m = -LimCluster + Rpcluster_m_abs;
Ploutcluster_m = Rpcluster_m + Ricluster_m;
if (Ploutcluster_m > LimCluster) Ploutcluster_m = LimCluster;
if (Ploutcluster_m < -LimCluster) Ploutcluster_m = -LimCluster;
iref_m = Ploutcluster_m/vb_m*2;

```



```

i_ref_a = iref_m * vpll[0];
i_ref_b = iref_m * vpll[1];

// -- Fim da malha de regulação da média global

// -- Malha de Balanceamento das Tensões CC dos Braços

evc2_a = svc2_m + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - svc2_a;
evc2_b = svc2_m - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - svc2_b;

// Filtros

if(filtro_hab_balanco == 1)
{
Kpvbalanco = Kpvc_f;
Kivbalanco = Kivc_f;

ptrv++;
if(ptrv==filtro_tensão) ptrv=0;

MAFvc_a_out+=(evc2_a - MAFvc_a_buffer[ptrv])/filtro_tensão; // malha a
MAFvc_a_buffer[ptrv]=evc2_a;

MAFvc_b_out+=(evc2_b - MAFvc_b_buffer[ptrv])/filtro_tensão; // malha b
MAFvc_b_buffer[ptrv]=evc2_b;

}
else
{
MAFvc_a_out = evc2_a;
MAFvc_b_out = evc2_b;

Kpvbalanco = Kpvc;
Kivbalanco = Kivc;
}

// Controladores PI

Rpcluster_a = MAFvc_a_out * Kpvbalanco;
if (Rpcluster_a > LimTensãoC) Rpcluster_a = LimTensãoC;
if (Rpcluster_a < -LimTensãoC) Rpcluster_a = -LimTensãoC;

Rpcluster_a_abs = Rpcluster_a;
if (Rpcluster_a_abs < 0) Rpcluster_a_abs = -Rpcluster_a_abs;

Ricluster_a+= MAFvc_a_out * Kivbalanco * Ts * contr_pi_balanco;
if (Ricluster_a > LimTensãoC-Rpcluster_a_abs) Ricluster_a = LimTensãoC - Rpcluster_a_abs;
if (Ricluster_a < -LimTensãoC+Rpcluster_a_abs) Ricluster_a = -LimTensãoC + Rpcluster_a_abs;
Ploutcluster_a = Rpcluster_a + Ricluster_a;
if (Ploutcluster_a > LimTensãoC) Ploutcluster_a = LimTensãoC;
if (Ploutcluster_a < -LimTensãoC) Ploutcluster_a = -LimTensãoC;
vref_a = Ploutcluster_a/pow(ib_a,2)*4*ib_a_an;

Rpcluster_b = MAFvc_b_out * Kpvbalanco;
if (Rpcluster_b > LimTensãoC) Rpcluster_b = LimTensãoC;
if (Rpcluster_b < -LimTensãoC) Rpcluster_b = -LimTensãoC;

Rpcluster_b_abs = Rpcluster_b;
if (Rpcluster_b_abs < 0) Rpcluster_b_abs = -Rpcluster_b_abs;

Ricluster_b+= MAFvc_b_out * Kivbalanco * Ts * contr_pi_balanco;
if (Ricluster_b > LimTensãoC-Rpcluster_b_abs) Ricluster_b = LimTensãoC - Rpcluster_b_abs;
if (Ricluster_b < -LimTensãoC+Rpcluster_b_abs) Ricluster_b = -LimTensãoC + Rpcluster_b_abs;
Ploutcluster_b = Rpcluster_b + Ricluster_b;

```

```

if (Ploutcluster_b > LimTensãoC) Ploutcluster_b = LimTensãoC;
if (Ploutcluster_b < -LimTensãoC) Ploutcluster_b = -LimTensãoC;
vref_b = Ploutcluster_b/pow(ib_b,2)*4*ib_b_an;

vref_c = (-Ploutcluster_a - Ploutcluster_b)/pow(ib_c,2)*4*ib_c_an;

// -- Geração da tensão de sequência zero

vz = (vref_a+vref_b+vref_c)*_1_3;

if (vz > lim_seq0) vz = lim_seq0;
if (vz < -lim_seq0) vz = -lim_seq0;

//-- MALHA DE CORRENTE

ierro_a = ifase_a - iref_comp_a - i_ref_a;
ierro_b = ifase_b - iref_comp_b - i_ref_b;

// Controladores PI

Rpcorr_a = ierro_a * Kpirede;
if (Rpcorr_a > LimCorr) Rpcorr_a = LimCorr;
if (Rpcorr_a < -LimCorr) Rpcorr_a = -LimCorr;

Rpcorr_a_abs = Rpcorr_a;
if (Rpcorr_a_abs < 0) Rpcorr_a_abs = -Rpcorr_a_abs;

Ricorr_a+= ierro_a * Kiirede * Ts;
if (Ricorr_a > LimCorr-Rpcorr_a_abs) Ricorr_a = LimCorr - Rpcorr_a_abs;
if (Ricorr_a < -LimCorr+Rpcorr_a_abs) Ricorr_a = -LimCorr + Rpcorr_a_abs;
Ploutcorr_a = Rpcorr_a + Ricorr_a;
if (Ploutcorr_a > LimCorr) Ploutcorr_a = LimCorr;
if (Ploutcorr_a < -LimCorr) Ploutcorr_a = -LimCorr;

Rpcorr_b = ierro_b * Kpirede;
if (Rpcorr_b > LimCorr) Rpcorr_b = LimCorr;
if (Rpcorr_b < -LimCorr) Rpcorr_b = -LimCorr;

Rpcorr_b_abs = Rpcorr_b;
if (Rpcorr_b_abs < 0) Rpcorr_b_abs = -Rpcorr_b_abs;

Ricorr_b+= ierro_b * Kiirede * Ts;
if (Ricorr_b > LimCorr-Rpcorr_b_abs) Ricorr_b = LimCorr - Rpcorr_b_abs;
if (Ricorr_b < -LimCorr+Rpcorr_b_abs) Ricorr_b = -LimCorr + Rpcorr_b_abs;
Ploutcorr_b = Rpcorr_b + Ricorr_b;
if (Ploutcorr_b > LimCorr) Ploutcorr_b = LimCorr;
if (Ploutcorr_b < -LimCorr) Ploutcorr_b = -LimCorr;

// -- Fim malha de corrente

// -- Tensão de Referência para PWM

Vref_a = (Ploutcorr_a + vfase_a + vz )/N/vcm_a;
Vref_b = (Ploutcorr_b + vfase_b + vz )/N/vcm_b;
Vref_c = (-Ploutcorr_a - Ploutcorr_b + vfase_c + vz )/N/vcm_c;

// -- MALHAS DE TENSÃO INDIVIDUAL

// impõe limite mínimo para tensão nos capacitores para evitar perda de controle

for (j=0;j<4;j++)
{
if (vc_a[j]<1)
{
vc_a[j]=1;
}
}

```

```

    if (vc_b[j]<1)
    {
        vc_b[j]=1;
    }
    if (vc_c[j]<1)
    {
        vc_c[j]=1;
    }
}

// Cálculo dos erros

verro_1a = svc2_a/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_a[0],2);
verro_2a = svc2_a/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_a[1],2);
verro_3a = svc2_a/N + (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_a[2],2);
verro_4a = svc2_a/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_a[3],2);

verro_1b = svc2_b/N + (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_b[0],2);
verro_2b = svc2_b/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_b[1],2);
verro_3b = svc2_b/N + (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_b[2],2);
verro_4b = svc2_b/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_b[3],2);

verro_1c = svc2_c/N + (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_c[0],2);
verro_2c = svc2_c/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_c[1],2);
verro_3c = svc2_c/N + (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_c[2],2);
verro_4c = svc2_c/N - (degrau_equpos - degrau_equneg) *0 - pow(vc_c[3],2);

// Controladores P

Rpindiv_a1 = verro_1a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a1 > LimTensãoE) Rpindiv_a1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a1 < -LimTensãoE) Rpindiv_a1 = -LimTensãoE;

Rpindiv_a2 = verro_2a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a2 > LimTensãoE) Rpindiv_a2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a2 < -LimTensãoE) Rpindiv_a2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_a3 = verro_3a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a3 > LimTensãoE) Rpindiv_a3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a3 < -LimTensãoE) Rpindiv_a3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_a4 = verro_4a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a4 > LimTensãoE) Rpindiv_a4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a4 < -LimTensãoE) Rpindiv_a4 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b1 = verro_1b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b1 > LimTensãoE) Rpindiv_b1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b1 < -LimTensãoE) Rpindiv_b1 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b2 = verro_2b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b2 > LimTensãoE) Rpindiv_b2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b2 < -LimTensãoE) Rpindiv_b2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b3 = verro_3b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b3 > LimTensãoE) Rpindiv_b3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b3 < -LimTensãoE) Rpindiv_b3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b4 = verro_4b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b4 > LimTensãoE) Rpindiv_b4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b4 < -LimTensãoE) Rpindiv_b4 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c1 = verro_1c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c1 > LimTensãoE) Rpindiv_c1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c1 < -LimTensãoE) Rpindiv_c1 = -LimTensãoE;

```

```

Rpindiv_c2 = verro_2c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c2 > LimTensãoE) Rpindiv_c2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c2 < -LimTensãoE) Rpindiv_c2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c3 = verro_3c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c3 > LimTensãoE) Rpindiv_c3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c3 < -LimTensãoE) Rpindiv_c3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c4 = verro_4c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c4 > LimTensãoE) Rpindiv_c4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c4 < -LimTensãoE) Rpindiv_c4 = -LimTensãoE;

if (a == 1)
{
    deltavc_1a = Rpindiv_a1/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[0];
    if(deltavc_1a > Lim_equ)deltavc_1a = Lim_equ;
    if(deltavc_1a < -Lim_equ)deltavc_1a = -Lim_equ;
    deltavc_2a = Rpindiv_a2/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[1];
    if(deltavc_2a > Lim_equ)deltavc_2a = Lim_equ;
    if(deltavc_2a < -Lim_equ)deltavc_2a = -Lim_equ;
    deltavc_3a = Rpindiv_a3/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[2];
    if(deltavc_3a > Lim_equ)deltavc_3a = Lim_equ;
    if(deltavc_3a < -Lim_equ)deltavc_3a = -Lim_equ;
    deltavc_4a = Rpindiv_a4/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[3];
    if(deltavc_4a > Lim_equ)deltavc_4a = Lim_equ;
    if(deltavc_4a < -Lim_equ)deltavc_4a = -Lim_equ;

    deltavc_1b = Rpindiv_b1/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[0];
    if(deltavc_1b > Lim_equ)deltavc_1b = Lim_equ;
    if(deltavc_1b < -Lim_equ)deltavc_1b = -Lim_equ;
    deltavc_2b = Rpindiv_b2/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[1];
    if(deltavc_2b > Lim_equ)deltavc_2b = Lim_equ;
    if(deltavc_2b < -Lim_equ)deltavc_2b = -Lim_equ;
    deltavc_3b = Rpindiv_b3/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[2];
    if(deltavc_3b > Lim_equ)deltavc_3b = Lim_equ;
    if(deltavc_3b < -Lim_equ)deltavc_3b = -Lim_equ;
    deltavc_4b = Rpindiv_b4/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[3];
    if(deltavc_4b > Lim_equ)deltavc_4b = Lim_equ;
    if(deltavc_4b < -Lim_equ)deltavc_4b = -Lim_equ;

    deltavc_1c = Rpindiv_c1/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[0];
    if(deltavc_1c > Lim_equ)deltavc_1c = Lim_equ;
    if(deltavc_1c < -Lim_equ)deltavc_1c = -Lim_equ;
    deltavc_2c = Rpindiv_c2/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[1];
    if(deltavc_2c > Lim_equ)deltavc_2c = Lim_equ;
    if(deltavc_2c < -Lim_equ)deltavc_2c = -Lim_equ;
    deltavc_3c = Rpindiv_c3/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[2];
    if(deltavc_3c > Lim_equ)deltavc_3c = Lim_equ;
    if(deltavc_3c < -Lim_equ)deltavc_3c = -Lim_equ;
    deltavc_4c = Rpindiv_c4/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[3];
    if(deltavc_4c > Lim_equ)deltavc_4c = Lim_equ;
    if(deltavc_4c < -Lim_equ)deltavc_4c = -Lim_equ;
}
else
{
    deltavc_1a = Rpindiv_a1/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[0];
    if(deltavc_1a > Lim_equ)deltavc_1a = Lim_equ;
    if(deltavc_1a < -Lim_equ)deltavc_1a = -Lim_equ;
    deltavc_2a = Rpindiv_a2/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[1];
    if(deltavc_2a > Lim_equ)deltavc_2a = Lim_equ;
    if(deltavc_2a < -Lim_equ)deltavc_2a = -Lim_equ;
    deltavc_3a = Rpindiv_a3/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[2];
    if(deltavc_3a > Lim_equ)deltavc_3a = Lim_equ;
    if(deltavc_3a < -Lim_equ)deltavc_3a = -Lim_equ;
    deltavc_4a = Rpindiv_a4/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[3];
}

```

```

if(deltavc_4a > Lim_equ)deltavc_4a = Lim_equ;
if(deltavc_4a < -Lim_equ)deltavc_4a = -Lim_equ;

deltavc_1b = Rpindiv_b1/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[0];
if(deltavc_1b > Lim_equ)deltavc_1b = Lim_equ;
if(deltavc_1b < -Lim_equ)deltavc_1b = -Lim_equ;
deltavc_2b = Rpindiv_b2/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[1];
if(deltavc_2b > Lim_equ)deltavc_2b = Lim_equ;
if(deltavc_2b < -Lim_equ)deltavc_2b = -Lim_equ;
deltavc_3b = Rpindiv_b3/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[2];
if(deltavc_3b > Lim_equ)deltavc_3b = Lim_equ;
if(deltavc_3b < -Lim_equ)deltavc_3b = -Lim_equ;
deltavc_4b = Rpindiv_b4/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[3];
if(deltavc_4b > Lim_equ)deltavc_4b = Lim_equ;
if(deltavc_4b < -Lim_equ)deltavc_4b = -Lim_equ;

deltavc_1c = Rpindiv_c1/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[0];
if(deltavc_1c > Lim_equ)deltavc_1c = Lim_equ;
if(deltavc_1c < -Lim_equ)deltavc_1c = -Lim_equ;
deltavc_2c = Rpindiv_c2/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[1];
if(deltavc_2c > Lim_equ)deltavc_2c = Lim_equ;
if(deltavc_2c < -Lim_equ)deltavc_2c = -Lim_equ;
deltavc_3c = Rpindiv_c3/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[2];
if(deltavc_3c > Lim_equ)deltavc_3c = Lim_equ;
if(deltavc_3c < -Lim_equ)deltavc_3c = -Lim_equ;
deltavc_4c = Rpindiv_c4/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[3];
if(deltavc_4c > Lim_equ)deltavc_4c = Lim_equ;
if(deltavc_4c < -Lim_equ)deltavc_4c = -Lim_equ;
}

// -- Fim das malhas de controle de tensões individuais

// -- Geração dos sinais de modulação PWM

modpwm_a[0] = Vref_a + deltavc_1a;
if(modpwm_a[0]>1)modpwm_a[0] = 1;
if(modpwm_a[0]<-1)modpwm_a[0] = -1;

modpwm_a[1] = Vref_a + deltavc_2a;
if(modpwm_a[1]>1)modpwm_a[1] = 1;
if(modpwm_a[1]<-1)modpwm_a[1] = -1;

modpwm_a[2] = Vref_a + deltavc_3a;
if(modpwm_a[2]>1)modpwm_a[2] = 1;
if(modpwm_a[2]<-1)modpwm_a[2] = -1;

modpwm_a[3] = Vref_a + deltavc_4a;
if(modpwm_a[3]>1)modpwm_a[3] = 1;
if(modpwm_a[3]<-1)modpwm_a[3] = -1;

modpwm_b[0] = Vref_b + deltavc_1b;
if(modpwm_b[0]>1)modpwm_b[0] = 1;
if(modpwm_b[0]<-1)modpwm_b[0] = -1;

modpwm_b[1] = Vref_b + deltavc_2b;
if(modpwm_b[1]>1)modpwm_b[1] = 1;
if(modpwm_b[1]<-1)modpwm_b[1] = -1;

modpwm_b[2] = Vref_b + deltavc_3b;
if(modpwm_b[2]>1)modpwm_b[2] = 1;
if(modpwm_b[2]<-1)modpwm_b[2] = -1;

modpwm_b[3] = Vref_b + deltavc_4b;
if(modpwm_b[3]>1)modpwm_b[3] = 1;
if(modpwm_b[3]<-1)modpwm_b[3] = -1;

modpwm_c[0] = Vref_c + deltavc_1c;

```

```
if(modpwm_c[0]>1)modpwm_c[0] = 1;
if(modpwm_c[0]<-1)modpwm_c[0] = -1;

modpwm_c[1] = Vref_c + deltavc_2c;
if(modpwm_c[1]>1)modpwm_c[1] = 1;
if(modpwm_c[1]<-1)modpwm_c[1] = -1;

modpwm_c[2] = Vref_c + deltavc_3c;
if(modpwm_c[2]>1)modpwm_c[2] = 1;
if(modpwm_c[2]<-1)modpwm_c[2] = -1;

modpwm_c[3] = Vref_c + deltavc_4c;
if(modpwm_c[3]>1)modpwm_c[3] = 1;
if(modpwm_c[3]<-1)modpwm_c[3] = -1;

// Funções de Saída:

Output(0) = modpwm_a[0];
Output(1) = modpwm_a[1];
Output(2) = modpwm_a[2];
Output(3) = modpwm_a[3];

Output(4) = modpwm_b[0];
Output(5) = modpwm_b[1];
Output(6) = modpwm_b[2];
Output(7) = modpwm_b[3];

Output(8) = modpwm_c[0];
Output(9) = modpwm_c[1];
Output(10) = modpwm_c[2];
Output(11) = modpwm_c[3];

// Fim do programa
```

Tabela H. 2 – Código Fonte, na linguagem C, para a Configuração Δ (SDBC)

```

// Declarações

#include <math.h>

// Constantes

#define _PI          3.1415926535898 // pi;
#define _PI_DIV2    1.570796326795 // pi;
#define _2PI        6.2831853071799 // 2*pi;
#define _2PI_DIV3   2.0943951023932 // 2*pi/3;
#define _2_3        0.6666666666667 // 2/3
#define _1_3        0.3333333333333 // 1/3
#define _SQRT3      1.732050807568877 // raiz de 3
#define _SQRT3_3    0.5773502691896 // raiz de 3 sobre 3
#define _SQRT3_2    0.8660254037844 // raiz de 3 sobre 2

#define Vrede 311.1 // Valor de pico da fase
#define Ts 6.25e-5 // Intervalo de Amostragem
#define omega 376.9911 // Frequência angular da rede
#define N 4 // Número de submódulos por braço
#define Vpwm 1 // Amplitude normalizada da portadora pwm
#define vc_ref 147 // Nível de tensão CC dos submódulos
#define soma_vc2 86436 // Soma dos quadrados das tensões CC dos submódulos de um braço
#define Kpindiv 0.07 // Ganho proporcional malha de equalização individual
#define Kpvc_f 0.08 // Ganho P das malhas de regulação e balanceamento da tensão CC c/ filtro
#define Kpvc 0.14 // Idem s/filtro
#define Kivc_f Kpvc_f*13.8 // Produto ganhos P e I das malha de regulação e balanceamento da tensão
CC c/filtro
#define Kivc Kpvc*27 // Idem s/filtro
#define Kpirede 164 // Ganho proporcional malha de corrente
#define Kiirede Kpirede*546 // Produto ganhos P e I da malha de corrente
#define LimCorr 400 // Limite anti-windup malha de corrente
#define LimCluster 200 // Limite anti-windup malha de regulação
#define LimTensãoC 1000 // Limite anti-windup malha de balanceamento
#define LimTensãoE 40 // Limite malha de equalização
#define Lim_equ 1 // Limite sinal na saída do controlador malha de equalização individual
#define Lim_seq0 10 // Limite amplitude da corrente de seq. 0
#define ib_factor 2 // Divisor malha equalização individual
#define vb_factor 311 // Divisor malha regulação da tensão CC do braço
#define vbmin 220 // Limite para amplitude da tensão nos braços
#define ibmin 0.3 // Limite amplitude mínima da corrente - malha de equalização individual

#define tamanho_filtro 267 // Parâmetro filtro passa-baixa 60Hz do PLL
#define filtro_tensão 133 // Parâmetro filtro passa-baixa 120Hz tensão
#define filtro_corrente 133 // Parâmetro filtro passa-baixa 120Hz corrente

#define Kp_pll 154.69826 // Ganhos PLL
#define Ki_pll Kp_pll*0.249921

// Constantes de controle do programa

#define filtro_hab_cluster 1
#define filtro_hab_balanco 1
#define contr_pi_cluster 1
#define contr_pi_balanco 1
#define a 0

// Entradas
float vc_a[4], vc_b[4], vc_c[4]; // tensões nos capacitores
float ifase_a, ifase_b, ifase_c; // correntes nas fases
float vbraço_a, vbraço_b, vbraço_c; // amplitude das tensões nos braços
float icarga_a, icarga_b, icarga_c; // correntes na carga
float vfase_a, vfase_b, vfase_c; // tensões nas fases
int pre_carga_ctr; // acionamento do modo de pre-carga

```

```

float vb_a, vb_b, vb_c, vb_m;           // Valor de pico das tensões nos braços
float ib_a, ib_b, ib_c, ib_m;           // Valor de pico das correntes nos braços
float ib_a_an;                           // Sinal da corrente no braço filtrada
float ib_b_an;                           // Sinal da corrente no braço filtrada
float ib_c_an;                           // Sinal da corrente no braço filtrada
float degrau_cluster = 86436;           // temporário
float degrau_equpos;                     // temporário
float degrau_equneg;                     // temporário
float degrau_bal1=0;                     // temporário
float degrau_bal2=0;                     // temporário

// Saidas

float modpwm_a[4], modpwm_b[4], modpwm_c[4];

// Variaveis Uso Geral
int j, ptr=0, ptrv = 0, ptrvm=0;
int ptr_vba = 0, ptr_vbb = 0, ptr_vbc = 0;
int ptr_iba = 0, ptr_ibb = 0, ptr_abc = 0;

// Variaveis Detectores da tensão de Pico nos braços
float MAF_vba_buffer[133], MAF_vba_out=0, vba_in;
float MAF_vbb_buffer[133], MAF_vbb_out=0, vbb_in;
float MAF_vbc_buffer[133], MAF_vbc_out=0, vbc_in;

// Variaveis Detectores da corrente de Pico nos braços
float MAF_iba_buffer[133], MAF_iba_out=0, iba_in;
float MAF_ibb_buffer[133], MAF_ibb_out=0, ibb_in;
float MAF_abc_buffer[133], MAF_abc_out=0, abc_in;

// Variaveis PLL Tensão da Rede
float V_pll_par[3], V_pll_per[3], PLL_dp;
float MAF_buffer[267], MAF_out=0;
float PI1=0, PI2=0, erro_PLL, PI1_ABS;
float delta_omega=0, teta=0;
float vpll[3], v[3];

// Variaveis utilizadas na malha de controle de corrente

float i_ref_a, i_ref_b, i_ref_c, iref_comp_a, iref_comp_b, iref_comp_c;
float ierro_a, ierro_b, ierro_c, iz;
float Rpcorr_a = 0, Ricorr_a = 0, Rpcorr_b = 0, Ricorr_b = 0, Rpcorr_c = 0, Ricorr_c = 0;
float Rpcorr_a_abs = 0, Rpcorr_b_abs = 0, Rpcorr_c_abs = 0;
float Ploutcorr_a = 0, Ploutcorr_b = 0, Ploutcorr_c = 0;
float Vref_a, Vref_b, Vref_c;

// Variaveis utilizadas na malha de controle de tensão - cluster
float vcm, vcm_a, vcm_b, vcm_c;
float svc2_a, svc2_b, svc2_c, svc2_m;
float evc2_a, evc2_b, evc2_c, evc2_m;

float MAFvc_a_buffer[133], MAFvc_a_out = 0;
float MAFvc_b_buffer[133], MAFvc_b_out = 0;
float MAFvc_c_buffer[133], MAFvc_c_out = 0;
float MAFvc_m_buffer[133], MAFvc_m_out = 0;

float Rpcluster_a = 0, Rpcluster_b = 0, Rpcluster_c = 0, Rpcluster_m = 0;
float Rpcluster_a_abs = 0, Rpcluster_b_abs = 0, Rpcluster_c_abs = 0, Rpcluster_m_abs = 0;
float Ricluster_a = 0, Ricluster_b = 0, Ricluster_c = 0, Ricluster_m = 0;
float Ploutcluster_a = 0, Ploutcluster_b = 0, Ploutcluster_c, Ploutcluster_m = 0;

float iref_a, iref_b, iref_c, iref_m;
float i_ref_ca, i_ref_cb, i_ref_cc;
float i_ref_a, i_ref_b, i_ref_c;
float Kpvcluster, Kivcluster, Kpvbalanco, Kivbalanco;

// Variaveis utilizadas na malha de controle de tensões individuais

```



```

float vcm_a = 1, vcm_b = 1, vcm_c = 1, vcm;
float verro_1a, verro_2a, verro_3a, verro_4a;
float verro_1b, verro_2b, verro_3b, verro_4b;
float verro_1c, verro_2c, verro_3c, verro_4c;
int sinal_ia, sinal_ib, sinal_ic;

float Rpindiv_a1 = 0, Rpindiv_b1 = 0, Rpindiv_c1 = 0;
float Rpindiv_a2 = 0, Rpindiv_b2 = 0, Rpindiv_c2 = 0;
float Rpindiv_a3 = 0, Rpindiv_b3 = 0, Rpindiv_c3 = 0;
float Rpindiv_a4 = 0, Rpindiv_b4 = 0, Rpindiv_c4 = 0;

float deltavc_1a, deltavc_2a, deltavc_3a, deltavc_4a;
float deltavc_1b, deltavc_2b, deltavc_3b, deltavc_4b;
float deltavc_1c, deltavc_2c, deltavc_3c, deltavc_4c;

// Código Executado

// Tensões de Fase
vfase_a = Input(0);
vfase_b = Input(1);
vfase_c = Input(2);

// Referência de Corrente Reativa
i_ref_a = Input(3);
i_ref_b = Input(4);
i_ref_c = Input(5);

// Tensões nos capacitores
vc_a[0] = Input(6);
vc_a[1] = Input(7);
vc_a[2] = Input(8);
vc_a[3] = Input(9);
vc_b[0] = Input(10);
vc_b[1] = Input(11);
vc_b[2] = Input(12);
vc_b[3] = Input(13);
vc_c[0] = Input(14);
vc_c[1] = Input(15);
vc_c[2] = Input(16);
vc_c[3] = Input(17);

// Correntes no conversor
ifase_a = Input(18);
ifase_b = Input(19);
ifase_c = Input(20);

// Corrente Filtrada
ib_a_an = Input(21);
ib_b_an = Input(22);
ib_c_an = Input(23);

// Degrau Balanço

// ----- = Input(24);
// degrau_cluster = Input(25)
// degrau_bal1 = Input(26);
// degrau_bal2 = Input(27);

// -- Captura das tensões nos capacitores

vcm_a = (vc_a[0]+vc_a[1]+vc_a[2]+vc_a[3])/N;
vcm_b = (vc_b[0]+vc_b[1]+vc_b[2]+vc_b[3])/N;
vcm_c = (vc_c[0]+vc_c[1]+vc_c[2]+vc_c[3])/N;

```

```

vcm = (vcm_a+vcm_b+vcm_c)*_1_3;

// -- Conversão das correntes de referência de linha para fase

iref_comp_a = (i_ref_a - i_ref_b)/3;
iref_comp_b = (i_ref_b - i_ref_c)/3;
iref_comp_c = (i_ref_c - i_ref_a)/3;

// -- Soma do Quadrado das Tensões CC nos Braços
svc2_a = pow(vc_a[0],2) + pow(vc_a[1],2) + pow(vc_a[2],2) + pow(vc_a[3],2);
svc2_b = pow(vc_b[0],2) + pow(vc_b[1],2) + pow(vc_b[2],2) + pow(vc_b[3],2);
svc2_c = pow(vc_c[0],2) + pow(vc_c[1],2) + pow(vc_c[2],2) + pow(vc_c[3],2);

svc2_m = (svc2_a+svc2_b+svc2_c)/3;

//-- Sinal com frequência e fase da corrente

if(ib_a_an>0)sinal_ia = 1; else sinal_ia = -1;
if(ib_b_an>0)sinal_ib = 1; else sinal_ib = -1;
if(ib_c_an>0)sinal_ic = 1; else sinal_ic = -1;

//-- Detector dos valores de pico das tensões e correntes nos braços

// Detecção das tensões

vba_in = fabs(Vref_a*N*vcm_a);
vbb_in = fabs(Vref_b*N*vcm_b);
vbc_in = fabs(Vref_c*N*vcm_c);

ptr_vba++;
if(ptr_vba==filtro_tensão) ptr_vba=0;

ptr_vbb++;
if(ptr_vbb==filtro_tensão) ptr_vbb=0;

ptr_vbc++;
if(ptr_vbc==filtro_tensão) ptr_vbc=0;

// MAF--braço a

MAF_vba_out+=(vba_in-MAF_vba_buffer[ptr_vba])/filtro_tensão;
MAF_vba_buffer[ptr_vba]=vba_in;

vb_a = MAF_vba_out;
vb_a = vb_a * _PI_DIV2;
if(vb_a < vbmin)vb_a = vbmin;

// MAF--braço b

MAF_vbb_out+=(vbb_in-MAF_vbb_buffer[ptr_vbb])/filtro_tensão;
MAF_vbb_buffer[ptr_vbb]=vbb_in;

vb_b = MAF_vbb_out;
vb_b = vb_b * _PI_DIV2;
if(vb_b < vbmin)vb_b = vbmin;

// MAF-- braço c

MAF_vbc_out+=(vbc_in-MAF_vbc_buffer[ptr_vbc])/filtro_tensão;
MAF_vbc_buffer[ptr_vbc]=vbc_in;

vb_c = MAF_vbc_out;
vb_c = vb_c * _PI_DIV2;
if(vb_c < vbmin)vb_c = vbmin;

vb_m = (vb_a+vb_b+vb_c)*_1_3;

```

```

// Detecção da corrente

// Captura das amplitudes das correntes nos braços

    iba_in = fabs(ib_a_an);
    ibb_in = fabs(ib_b_an);
    ibc_in = fabs(ib_c_an);

// MAF-- braço a

    MAF_iba_out+=(iba_in-MAF_iba_buffer[ptr_vba])/filtro_corrente;
    MAF_iba_buffer[ptr_vba]=iba_in;

    ib_a = MAF_iba_out;
    ib_a = ib_a * _PI_DIV2;
    if(ib_a < ibmin)ib_a = ibmin;

// MAF--braço b

    MAF_ibb_out+=(ibb_in-MAF_ibb_buffer[ptr_vbb])/filtro_corrente;
    MAF_ibb_buffer[ptr_vbb]=ibb_in;

    ib_b = MAF_ibb_out;
    ib_b = ib_b * _PI_DIV2;
    if(ib_b < ibmin)ib_b = ibmin;

// MAF-- braço c

    MAF_ibc_out+=(ibc_in-MAF_ibc_buffer[ptr_vbc])/filtro_corrente;
    MAF_ibc_buffer[ptr_vbc]=ibc_in;

    ib_c = MAF_ibc_out;
    ib_c = ib_c * _PI_DIV2;
    if(ib_c < ibmin)ib_c = ibmin;

// Fim da rotina de captura da amplitudes das tensões e correntes nos braços

//-- PLL Rede Tensão da Rede

    V_pll_par[0]=sin(teta);
    V_pll_par[1]=sin(teta- _2PI_DIV3);
    V_pll_par[2]=sin(teta+ _2PI_DIV3);

    V_pll_per[0]=cos(teta);
    V_pll_per[1]=cos(teta- _2PI_DIV3);
    V_pll_per[2]=cos(teta+ _2PI_DIV3);

    vpll[0]= V_pll_par[0];
    vpll[1]= V_pll_par[1];
    vpll[2]= V_pll_par[2];

    PLL_dp = vfase_a*V_pll_per[0]+ vfase_b*V_pll_per[1]+ vfase_c*V_pll_per[2];
    PLL_dp = PLL_dp*_2_3/Vrede;

// MAF--

    ptr++;
    if(ptr==tamanho_filtro) ptr=0;

    MAF_out+=(PLL_dp-MAF_buffer[ptr])/tamanho_filtro;
    MAF_buffer[ptr]=PLL_dp;

// CONTROLADOR
erro_PLL = MAF_out;

```

```

PI1= Kp_pll*erro_PLL;
if(PI1 > 30) PI1 = 30;
if(PI1 < -30) PI1 = -30;
PI1_ABS = PI1;
if(PI1_ABS < 0) PI1_ABS= -PI1_ABS;

PI2+= erro_PLL*Ki_pll*Ts;
if(PI2 > 30-PI1_ABS)PI2 = 30-PI1_ABS;
if(PI2 < -30+PI1_ABS) PI2 = -30+PI1_ABS;

delta_omega=PI1+PI2;

// INTEGRADOR

teta+=(omega+delta_omega)*Ts;

if(teta>_PI) teta=_2PI;
if(teta<-_PI) teta+=_2PI;

// -- FIM DO PLL Tensão da Rede

// -- Malha de regulação da média global

evc2_m = degrau_cluster - svc2_m;

// MAF--

if(filtro_hab_cluster == 1)
{

Kpvcluster = Kpvc_f;
Kivcluster = Kivc_f;

ptrvm++;
if(ptrvm==filtro_tensão) ptrvm=0;

MAFvc_m_out+=(evc2_m - MAFvc_m_buffer[ptrvm])/filtro_tensão;
MAFvc_m_buffer[ptrvm]=evc2_m;
}
else
{

Kpvcluster = Kpvc;
Kivcluster = Kivc;

MAFvc_m_out = evc2_m;
}

// Controlador PI

Rpcluster_m = MAFvc_m_out * Kpvcluster;
if (Rpcluster_m > LimCluster) Rpcluster_m = LimCluster;
if (Rpcluster_m < -LimCluster) Rpcluster_m = -LimCluster;

Rpcluster_m_abs = Rpcluster_m;
if (Rpcluster_m_abs < 0) Rpcluster_m_abs = -Rpcluster_m_abs;

Ricluster_m+= MAFvc_m_out * Kivcluster * Ts * contr_pi_cluster;
if (Ricluster_m > LimCluster-Rpcluster_m_abs) Ricluster_m = LimCluster - Rpcluster_m_abs;
if (Ricluster_m < -LimCluster+Rpcluster_m_abs) Ricluster_m = -LimCluster + Rpcluster_m_abs;
Ploutcluster_m = Rpcluster_m + Ricluster_m;
if (Ploutcluster_m > LimCluster) Ploutcluster_m = LimCluster;
if (Ploutcluster_m < -LimCluster) Ploutcluster_m = -LimCluster;
iref_m = Ploutcluster_m/vb_m*2;

i_ref_ca = iref_m * vpll[0];

```

```

i_ref_cb = iref_m * vp11[1];
i_ref_cc = iref_m * vp11[2];

// -- Fim da malha de controle de tensão Cluster

//-- Malha de Balanceamento das Tensões CC dos Braços

evc2_a = svc2_m - svc2_a + (degrau_bal1 - degrau_bal2)*0;
evc2_b = svc2_m - svc2_b - (degrau_bal1 - degrau_bal2)*0;
evc2_c = svc2_m - svc2_c;

// MAF--

if(filtro_hab_balanco == 1)
{

Kpvbalanco = Kpvc_f;
Kivbalanco = Kivc_f;

ptrv++;
if(ptrv==filtro_tensão) ptrv=0;

MAFvc_a_out+=(evc2_a - MAFvc_a_buffer[ptrv])/filtro_tensão; // malha a
MAFvc_a_buffer[ptrv]=evc2_a;

MAFvc_b_out+=(evc2_b - MAFvc_b_buffer[ptrv])/filtro_tensão; // malha b
MAFvc_b_buffer[ptrv]=evc2_b;

MAFvc_c_out+=(evc2_c - MAFvc_c_buffer[ptrv])/filtro_tensão; // malha c
MAFvc_c_buffer[ptrv]=evc2_c;
}
else
{
MAFvc_a_out = evc2_a;
MAFvc_b_out = evc2_b;
MAFvc_c_out = evc2_c;

Kpvbalanco = Kpvc;
Kivbalanco = Kivc;
}

// Controladores PI

Rpcluster_a = MAFvc_a_out * Kpvbalanco;
if (Rpcluster_a > LimTensãoC) Rpcluster_a = LimTensãoC;
if (Rpcluster_a < -LimTensãoC) Rpcluster_a = -LimTensãoC;

Rpcluster_a_abs = Rpcluster_a;
if (Rpcluster_a_abs < 0) Rpcluster_a_abs = -Rpcluster_a_abs;

Ricluster_a+= MAFvc_a_out * Kivbalanco * Ts * contr_pi_balanco;
if (Ricluster_a > LimTensãoC-Rpcluster_a_abs) Ricluster_a = LimTensãoC - Rpcluster_a_abs;
if (Ricluster_a < -LimTensãoC+Rpcluster_a_abs) Ricluster_a = -LimTensãoC + Rpcluster_a_abs;
Ploutcluster_a = Rpcluster_a + Ricluster_a;
if (Ploutcluster_a > LimTensãoC) Ploutcluster_a = LimTensãoC;
if (Ploutcluster_a < -LimTensãoC) Ploutcluster_a = -LimTensãoC;
iref_a = Ploutcluster_a/vb_a*4;

Rpcluster_b = MAFvc_b_out * Kpvbalanco;
if (Rpcluster_b > LimTensãoC) Rpcluster_b = LimTensãoC;
if (Rpcluster_b < -LimTensãoC) Rpcluster_b = -LimTensãoC;

Rpcluster_b_abs = Rpcluster_b;
if (Rpcluster_b_abs < 0) Rpcluster_b_abs = -Rpcluster_b_abs;

Ricluster_b+= MAFvc_b_out * Kivbalanco * Ts * contr_pi_balanco;
if (Ricluster_b > LimTensãoC-Rpcluster_b_abs) Ricluster_b = LimTensãoC - Rpcluster_b_abs;

```

```

if (Ricluster_b < -LimTensãoC+Rpcluster_b_abs) Ricluster_b = -LimTensãoC + Rpcluster_b_abs;
Ploutcluster_b = Rpcluster_b + Ricluster_b;
if (Ploutcluster_b > LimTensãoC) Ploutcluster_b = LimTensãoC;
if (Ploutcluster_b < -LimTensãoC) Ploutcluster_b = -LimTensãoC;
iref_b = Ploutcluster_b/vb_b*4;

Rpcluster_c = MAFvc_c_out * Kpvbalanco;
if (Rpcluster_c > LimTensãoC) Rpcluster_c = LimTensãoC;
if (Rpcluster_c < -LimTensãoC) Rpcluster_c = -LimTensãoC;

Rpcluster_c_abs = Rpcluster_c;
if (Rpcluster_c_abs < 0) Rpcluster_c_abs = -Rpcluster_c_abs;

Ricluster_c+= MAFvc_c_out * Kivbalanco * Ts * contr_pi_balanco;
if (Ricluster_c > LimTensãoC-Rpcluster_c_abs) Ricluster_c = LimTensãoC - Rpcluster_c_abs;
if (Ricluster_c < -LimTensãoC+Rpcluster_c_abs) Ricluster_c = -LimTensãoC + Rpcluster_c_abs;
Ploutcluster_c = Rpcluster_c + Ricluster_c;
if (Ploutcluster_c > LimTensãoC) Ploutcluster_c = LimTensãoC;
if (Ploutcluster_c < -LimTensãoC) Ploutcluster_c = -LimTensãoC;
iref_c = Ploutcluster_c /vb_c*4;

    iref_a = iref_a * vpII[0];
    iref_b = iref_b * vpII[1];
    iref_c = iref_c * vpII[2];

//---- Geração da corrente de sequência zero

    iz = (iref_a+iref_b+iref_c) * _1_3;
    if (iz > Lim_seq0) iz = Lim_seq0;
    if (iz < -Lim_seq0) iz = -Lim_seq0;

//-- MALHA DE CORRENTE

ierro_a = ifase_a - iref_comp_a - i_ref_ca - iz;
ierro_b = ifase_b - iref_comp_b - i_ref_cb - iz;
ierro_c = ifase_c - iref_comp_c - i_ref_cc - iz;

Rpcorr_a = ierro_a * Kpirede;
if (Rpcorr_a > LimCorr) Rpcorr_a = LimCorr;
if (Rpcorr_a < -LimCorr) Rpcorr_a = -LimCorr;

Rpcorr_a_abs = Rpcorr_a;
if (Rpcorr_a_abs < 0) Rpcorr_a_abs = -Rpcorr_a_abs;

Ricorr_a+= ierro_a * Kiirede * Ts;
if (Ricorr_a > LimCorr-Rpcorr_a_abs) Ricorr_a = LimCorr - Rpcorr_a_abs;
if (Ricorr_a < -LimCorr+Rpcorr_a_abs) Ricorr_a = -LimCorr + Rpcorr_a_abs;
Ploutcorr_a = Rpcorr_a + Ricorr_a;
if (Ploutcorr_a > LimCorr) Ploutcorr_a = LimCorr;
if (Ploutcorr_a < -LimCorr) Ploutcorr_a = -LimCorr;

Rpcorr_b = ierro_b * Kpirede;
if (Rpcorr_b > LimCorr) Rpcorr_b = LimCorr;
if (Rpcorr_b < -LimCorr) Rpcorr_b = -LimCorr;

Rpcorr_b_abs = Rpcorr_b;
if (Rpcorr_b_abs < 0) Rpcorr_b_abs = -Rpcorr_b_abs;

Ricorr_b+= ierro_b * Kiirede * Ts;
if (Ricorr_b > LimCorr-Rpcorr_b_abs) Ricorr_b = LimCorr - Rpcorr_b_abs;
if (Ricorr_b < -LimCorr+Rpcorr_b_abs) Ricorr_b = -LimCorr + Rpcorr_b_abs;
Ploutcorr_b = Rpcorr_b + Ricorr_b;
if (Ploutcorr_b > LimCorr) Ploutcorr_b = LimCorr;
if (Ploutcorr_b < -LimCorr) Ploutcorr_b = -LimCorr;

```

```

Rpcorr_c = ierro_c * Kpirede;
if (Rpcorr_c > LimCorr) Rpcorr_c = LimCorr;
if (Rpcorr_c < -LimCorr) Rpcorr_c = -LimCorr;

Rpcorr_c_abs = Rpcorr_c;
if (Rpcorr_c_abs < 0) Rpcorr_c_abs = -Rpcorr_c_abs;

Ricorr_c+= ierro_c * Kiirede * Ts;
if (Ricorr_c > LimCorr-Rpcorr_c_abs) Ricorr_c = LimCorr - Rpcorr_c_abs;
if (Ricorr_c < -LimCorr+Rpcorr_c_abs) Ricorr_c = -LimCorr + Rpcorr_c_abs;
Ploutcorr_c = Rpcorr_c + Ricorr_c;
if (Ploutcorr_c > LimCorr) Ploutcorr_c = LimCorr;
if (Ploutcorr_c < -LimCorr) Ploutcorr_c = -LimCorr;

// -- Fim malha de corrente

// -- Geração dos sinais de modulação PWM

Vref_a = (Ploutcorr_a + vfase_a)/N/vcm_a;
Vref_b = (Ploutcorr_b + vfase_b)/N/vcm_b;
Vref_c = (Ploutcorr_c + vfase_c)/N/vcm_c;

// -- MALHAS DE TENSÃO INDIVIDUAL

// Estabelece valor mínimo para as tensões dos capacitores para evitar perda de controle

for (j = 0;j<4;j++)
{
    if (vc_a[j]<1)
    {
        vc_a[j]=1;
    }
    if (vc_b[j]<1)
    {
        vc_b[j]=1;
    }
    if (vc_c[j]<1)
    {
        vc_c[j]=1;
    }
}

verro_1a = svc2_a/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_a[0],2);
verro_2a = svc2_a/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_a[1],2);
verro_3a = svc2_a/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_a[2],2);
verro_4a = svc2_a/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_a[3],2);

verro_1b = svc2_b/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_b[0],2);
verro_2b = svc2_b/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_b[1],2);
verro_3b = svc2_b/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_b[2],2);
verro_4b = svc2_b/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_b[3],2);

verro_1c = svc2_c/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_c[0],2);
verro_2c = svc2_c/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_c[1],2);
verro_3c = svc2_c/N + (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_c[2],2);
verro_4c = svc2_c/N - (degrau_equpos - degrau_equneg)*0 - pow(vc_c[3],2);

// Controladores P

Rpindiv_a1 = verro_1a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a1 > LimTensãoE) Rpindiv_a1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a1 < -LimTensãoE) Rpindiv_a1 = -LimTensãoE;

```

```

Rpindiv_a2 = verro_2a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a2 > LimTensãoE) Rpindiv_a2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a2 < -LimTensãoE) Rpindiv_a2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_a3 = verro_3a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a3 > LimTensãoE) Rpindiv_a3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a3 < -LimTensãoE) Rpindiv_a3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_a4 = verro_4a * Kpindiv;
if (Rpindiv_a4 > LimTensãoE) Rpindiv_a4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_a4 < -LimTensãoE) Rpindiv_a4 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b1 = verro_1b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b1 > LimTensãoE) Rpindiv_b1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b1 < -LimTensãoE) Rpindiv_b1 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b2 = verro_2b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b2 > LimTensãoE) Rpindiv_b2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b2 < -LimTensãoE) Rpindiv_b2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b3 = verro_3b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b3 > LimTensãoE) Rpindiv_b3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b3 < -LimTensãoE) Rpindiv_b3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_b4 = verro_4b * Kpindiv;
if (Rpindiv_b4 > LimTensãoE) Rpindiv_b4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_b4 < -LimTensãoE) Rpindiv_b4 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c1 = verro_1c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c1 > LimTensãoE) Rpindiv_c1 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c1 < -LimTensãoE) Rpindiv_c1 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c2 = verro_2c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c2 > LimTensãoE) Rpindiv_c2 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c2 < -LimTensãoE) Rpindiv_c2 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c3 = verro_3c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c3 > LimTensãoE) Rpindiv_c3 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c3 < -LimTensãoE) Rpindiv_c3 = -LimTensãoE;

Rpindiv_c4 = verro_4c * Kpindiv;
if (Rpindiv_c4 > LimTensãoE) Rpindiv_c4 = LimTensãoE;
if (Rpindiv_c4 < -LimTensãoE) Rpindiv_c4 = -LimTensãoE;

if (a == 1)
{
    deltavc_1a = Rpindiv_a1/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[0];
    if(deltavc_1a > Lim_equ)deltavc_1a = Lim_equ;
    if(deltavc_1a < -Lim_equ)deltavc_1a = -Lim_equ;
    deltavc_2a = Rpindiv_a2/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[1];
    if(deltavc_2a > Lim_equ)deltavc_2a = Lim_equ;
    if(deltavc_2a < -Lim_equ)deltavc_2a = -Lim_equ;
    deltavc_3a = Rpindiv_a3/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[2];
    if(deltavc_3a > Lim_equ)deltavc_3a = Lim_equ;
    if(deltavc_3a < -Lim_equ)deltavc_3a = -Lim_equ;
    deltavc_4a = Rpindiv_a4/ib_factor *2 * sinal_ia/vc_a[3];
    if(deltavc_4a > Lim_equ)deltavc_4a = Lim_equ;
    if(deltavc_4a < -Lim_equ)deltavc_4a = -Lim_equ;

    deltavc_1b = Rpindiv_b1/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[0];
    if(deltavc_1b > Lim_equ)deltavc_1b = Lim_equ;
    if(deltavc_1b < -Lim_equ)deltavc_1b = -Lim_equ;
    deltavc_2b = Rpindiv_b2/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[1];
    if(deltavc_2b > Lim_equ)deltavc_2b = Lim_equ;
    if(deltavc_2b < -Lim_equ)deltavc_2b = -Lim_equ;
}

```



```

deltavc_3b = Rpindiv_b3/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[2];
if(deltavc_3b > Lim_equ)deltavc_3b = Lim_equ;
if(deltavc_3b < -Lim_equ)deltavc_3b = -Lim_equ;
deltavc_4b = Rpindiv_b4/ib_factor *2 * sinal_ib/vc_b[3];
if(deltavc_4b > Lim_equ)deltavc_4b = Lim_equ;
if(deltavc_4b < -Lim_equ)deltavc_4b = -Lim_equ;

deltavc_1c = Rpindiv_c1/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[0];
if(deltavc_1c > Lim_equ)deltavc_1c = Lim_equ;
if(deltavc_1c < -Lim_equ)deltavc_1c = -Lim_equ;
deltavc_2c = Rpindiv_c2/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[1];
if(deltavc_2c > Lim_equ)deltavc_2c = Lim_equ;
if(deltavc_2c < -Lim_equ)deltavc_2c = -Lim_equ;
deltavc_3c = Rpindiv_c3/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[2];
if(deltavc_3c > Lim_equ)deltavc_3c = Lim_equ;
if(deltavc_3c < -Lim_equ)deltavc_3c = -Lim_equ;
deltavc_4c = Rpindiv_c4/ib_factor *2 * sinal_ic/vc_c[3];
if(deltavc_4c > Lim_equ)deltavc_4c = Lim_equ;
if(deltavc_4c < -Lim_equ)deltavc_4c = -Lim_equ;
}
else
{
deltavc_1a = Rpindiv_a1/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[0];
if(deltavc_1a > Lim_equ)deltavc_1a = Lim_equ;
if(deltavc_1a < -Lim_equ)deltavc_1a = -Lim_equ;
deltavc_2a = Rpindiv_a2/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[1];
if(deltavc_2a > Lim_equ)deltavc_2a = Lim_equ;
if(deltavc_2a < -Lim_equ)deltavc_2a = -Lim_equ;
deltavc_3a = Rpindiv_a3/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[2];
if(deltavc_3a > Lim_equ)deltavc_3a = Lim_equ;
if(deltavc_3a < -Lim_equ)deltavc_3a = -Lim_equ;
deltavc_4a = Rpindiv_a4/pow(ib_a,2)*2*ib_a_an/vc_a[3];
if(deltavc_4a > Lim_equ)deltavc_4a = Lim_equ;
if(deltavc_4a < -Lim_equ)deltavc_4a = -Lim_equ;

deltavc_1b = Rpindiv_b1/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[0];
if(deltavc_1b > Lim_equ)deltavc_1b = Lim_equ;
if(deltavc_1b < -Lim_equ)deltavc_1b = -Lim_equ;
deltavc_2b = Rpindiv_b2/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[1];
if(deltavc_2b > Lim_equ)deltavc_2b = Lim_equ;
if(deltavc_2b < -Lim_equ)deltavc_2b = -Lim_equ;
deltavc_3b = Rpindiv_b3/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[2];
if(deltavc_3b > Lim_equ)deltavc_3b = Lim_equ;
if(deltavc_3b < -Lim_equ)deltavc_3b = -Lim_equ;
deltavc_4b = Rpindiv_b4/pow(ib_b,2)*2*ib_b_an/vc_b[3];
if(deltavc_4b > Lim_equ)deltavc_4b = Lim_equ;
if(deltavc_4b < -Lim_equ)deltavc_4b = -Lim_equ;

deltavc_1c = Rpindiv_c1/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[0];
if(deltavc_1c > Lim_equ)deltavc_1c = Lim_equ;
if(deltavc_1c < -Lim_equ)deltavc_1c = -Lim_equ;
deltavc_2c = Rpindiv_c2/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[1];
if(deltavc_2c > Lim_equ)deltavc_2c = Lim_equ;
if(deltavc_2c < -Lim_equ)deltavc_2c = -Lim_equ;
deltavc_3c = Rpindiv_c3/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[2];
if(deltavc_3c > Lim_equ)deltavc_3c = Lim_equ;
if(deltavc_3c < -Lim_equ)deltavc_3c = -Lim_equ;
deltavc_4c = Rpindiv_c4/pow(ib_c,2)*2*ib_c_an/vc_c[3];
if(deltavc_4c > Lim_equ)deltavc_4c = Lim_equ;
if(deltavc_4c < -Lim_equ)deltavc_4c = -Lim_equ;
}

// Fim das malhas de controle de tensões individuais

modpwm_a[0] = Vref_a + deltapwm_a;
if(modpwm_a[0]>1)modpwm_a[0] = 1;
if(modpwm_a[0]<-1)modpwm_a[0] = -1;

```

```

modpwm_a[1] = Vref_a + deltavc_2a;
if(modpwm_a[1]>1)modpwm_a[1] = 1;
if(modpwm_a[1]<-1)modpwm_a[1] = -1;

modpwm_a[2] = Vref_a + deltavc_3a;
if(modpwm_a[2]>1)modpwm_a[2] = 1;
if(modpwm_a[2]<-1)modpwm_a[2] = -1;

modpwm_a[3] = Vref_a + deltavc_4a;
if(modpwm_a[3]>1)modpwm_a[3] = 1;
if(modpwm_a[3]<-1)modpwm_a[3] = -1;

modpwm_b[0] = Vref_b + deltavc_1b;
if(modpwm_b[0]>1)modpwm_b[0] = 1;
if(modpwm_b[0]<-1)modpwm_b[0] = -1;

modpwm_b[1] = Vref_b + deltavc_2b;
if(modpwm_b[1]>1)modpwm_b[1] = 1;
if(modpwm_b[1]<-1)modpwm_b[1] = -1;

modpwm_b[2] = Vref_b + deltavc_3b;
if(modpwm_b[2]>1)modpwm_b[2] = 1;
if(modpwm_b[2]<-1)modpwm_b[2] = -1;

modpwm_b[3] = Vref_b + deltavc_4b;
if(modpwm_b[3]>1)modpwm_b[3] = 1;
if(modpwm_b[3]<-1)modpwm_b[3] = -1;

modpwm_c[0] = Vref_c + deltavc_1c;
if(modpwm_c[0]>1)modpwm_c[0] = 1;
if(modpwm_c[0]<-1)modpwm_c[0] = -1;

modpwm_c[1] = Vref_c + deltavc_2c;
if(modpwm_c[1]>1)modpwm_c[1] = 1;
if(modpwm_c[1]<-1)modpwm_c[1] = -1;

modpwm_c[2] = Vref_c + deltavc_3c;
if(modpwm_c[2]>1)modpwm_c[2] = 1;
if(modpwm_c[2]<-1)modpwm_c[2] = -1;

modpwm_c[3] = Vref_c + deltavc_4c;
if(modpwm_c[3]>1)modpwm_c[3] = 1;
if(modpwm_c[3]<-1)modpwm_c[3] = -1;

```

// Funções de Saída:

```

Output(0) = modpwm_a[0];
Output(1) = modpwm_a[1];
Output(2) = modpwm_a[2];
Output(3) = modpwm_a[3];

```

```

Output(4) = modpwm_b[0];
Output(5) = modpwm_b[1];
Output(6) = modpwm_b[2];
Output(7) = modpwm_b[3];

```

```

Output(8) = modpwm_c[0];
Output(9) = modpwm_c[1];
Output(10) = modpwm_c[2];
Output(11) = modpwm_c[3];

```

// Fim do programa