

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO SILVA AMORIM

**ESTUDOS E CONTRIBUIÇÕES PARA UM GERADOR SÍNCRONO
VIRTUAL COM FILTRAGEM HARMÔNICA**

VITÓRIA

2022

THIAGO SILVA AMORIM

**ESTUDOS E CONTRIBUIÇÕES PARA UM GERADOR SÍNCRONO
VIRTUAL COM FILTRAGEM HARMÔNICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

VITÓRIA

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A524e Amorim, Thiago Silva, 1984-
Estudos e contribuições para um gerador síncrono virtual com
filtragem harmônica / Thiago Silva Amorim. - 2022.
134 f. : il.

Orientador: Lucas Frizera Encarnação.
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Eletrônica de potência.
3. Geração distribuída de energia elétrica. 4. Harmônicos (Ondas
elétricas). 5. Máquinas elétricas síncronas. 6. Inversores
elétricos. I. Encarnação, Lucas Frizera. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

THIAGO SILVA AMORIM

**ESTUDOS E CONTRIBUIÇÕES PARA UM GERADOR SÍNCRONO
VIRTUAL COM FILTRAGEM HARMÔNICA**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23 de setembro de 2022

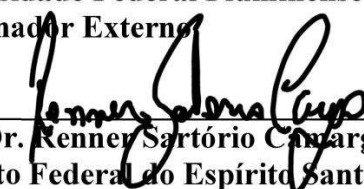
COMISSÃO EXAMINADORA



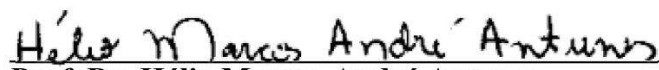
Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Bruno Wanderley França
Universidade Federal Fluminense
Examinador Externo



Prof. Dr. Renner Sartório
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Lucas Frizera Encarnação, pela confiança depositada e por todo suporte oferecido para a realização deste trabalho. Agradeço à minha família pelo apoio incondicional durante o período de realização do meu doutorado. Também agradeço aos colegas do LEPAC pelos conhecimentos compartilhados e pelos momentos de descontração durante os períodos mais exaustivos do desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos professores do PPGEE, em especial do LEPAC, pelo acolhimento durante o doutorado, e aos professores membros da banca avaliadora pelo tempo disponibilizado e pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Por fim, agradeço à FAPES e à CAPES pela concessão da minha bolsa de estudos, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

RESUMO

Com o aumento da penetração das unidades de geração distribuída no sistema elétrico, a redução da inércia rotacional total do sistema elétrico pode levar a deterioração da estabilidade do sistema elétrico. Além deste problema, a proliferação crescente de dispositivos baseados em eletrônica de potência pode introduzir correntes e tensões harmônicas no sistema e deteriorar a qualidade de energia elétrica do mesmo. Este trabalho propõe o estudo de controles de inversor que simultaneamente possuem inércia sintética e compensam correntes e tensões harmônicas de um sistema elétrico. O controle do gerador síncrono virtual (VSG) é responsável pelo cálculo da corrente na frequência fundamental de referência que contribui para a estabilidade de frequência do sistema, enquanto o controle de detecção harmônica calcula as correntes harmônicas de referência necessárias a fim de mitigar as correntes e tensões harmônicas presentes no sistema elétrico. Assim, a combinação destes dois controles permite que um único inversor contribua para a estabilidade de frequência e melhore a qualidade de energia de um sistema elétrico. O modelo do VSG e as estratégias de detecção harmônicas baseadas na Teoria $p-q$ e nos combinadores lineares de Fourier (FLC) são estudados e, a partir destes estudos, são propostos controladores de um inversor que combinam o controle VSG e a estratégia de detecção harmônica. Dentre as combinações propostas, o controlador que combina o controle VSG com a detecção harmônica baseada em FLC com ganho adaptativo aplicado em um sistema elétrico é a principal contribuição deste trabalho. A fim de verificar estratégias de controle propostas neste trabalho, foram realizadas simulações em *softwares* e ensaios experimentais em plataformas *software-in-the-loop*. A partir dos resultados obtidos nas simulações, pode-se comprovar que a combinação do controle do gerador síncrono virtual com a detecção harmônica pode simultaneamente contribuir para a estabilidade de frequência e melhorar a qualidade de energia elétrica do sistema elétrico.

Palavras-chave: Compensação de harmônicos; filtros ativos de potência; gerador síncrono virtual; inércia sintética; qualidade de energia elétrica.

ABSTRACT

The high penetration of distributed generation units can decrease significantly the electrical system's total rotational inertia and, consequently, deteriorate the system stability. In addition to this problem, the growing application of power electronics-based devices can introduce harmonic currents and voltages into the system and deteriorate the system's power quality. This work proposes the study of inverter controls with synthetic inertia and harmonic compensation features. The virtual synchronous generator (VSG) controller determines the current reference at the fundamental component, which provides synthetic inertia to the inverter that contributes to the system stability, and the active filter controller calculates the reference harmonic currents to mitigate the harmonic currents and voltages in a power system. Thus, the combination of these two controls allows a single inverter to contribute to frequency stability and improve the power quality of an electrical system. The VSG model and harmonic detection strategies based on p - q Theory and linear Fourier combiners (FLC) are studied and, from these studies, controllers of an inverter that combine the VSG control and the harmonic detection strategy are proposed. Among the proposed combinations, the controller that combines VSG control with harmonic detection based on FLC with adaptive gain applied to an electrical system is the main contribution of this work. To verify the control strategies proposed in this work, simulations were carried out in software and experimental tests in software-in-the-loop platforms. From the results obtained in the simulations, it can be proved that the combination of the control of the virtual synchronous generator with the harmonic detection can simultaneously contribute to the stability of frequency and improve the power quality of the electrical system.

Keywords: Harmonic compensation; active power filters; virtual synchronous generator; synthetic inertia; power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a detecção harmônica baseada na Transformada de Park.....	20
Figura 2 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com o AFORC	21
Figura 3 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a estratégia híbrida de supressão harmônica.....	22
Figura 4 - Visão geral do Synchronfilter aplicado a um sistema elétrico.....	23
Figura 5 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia que combina o controle VSG com o compensador de tensão harmônica baseado no VSG	23
Figura 6 - Circuito de potência de um inversor com o controle PQ.....	29
Figura 7 - Diagrama de blocos da estratégia de controle PQ	30
Figura 8 - Circuito de potência de um VSG	31
Figura 9 - Diagrama de blocos da estratégia de controle de um VSG.....	33
Figura 10 - Circuito de estator monofásico do modelo simplificado de máquina síncrona	37
Figura 11 - Diagrama de blocos da estratégia de controle do VSG baseado no modelo simplificado do gerador síncrono	38
Figura 12 - Visão geral do sistema simulado	39
Figura 13 - Influência de J (a) na potência ativa e (b) na frequência e (c) no ROCOF	42
Figura 14 - Influência de J no ROCOF médio	43
Figura 15 - Influência de D (a) na potência ativa e (b) na frequência e (c) no ROCOF	44
Figura 16 - Influência de D no ROCOF médio	45
Figura 17 - Configuração básica de um filtro ativo paralelo.....	51
Figura 18 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC1	52
Figura 19 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC2	52
Figura 20 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC3	53
Figura 21 - Visão geral do sistema simulado	55
Figura 22 - Bancada baseada no módulo HIL402	55
Figura 23 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C1	57
Figura 24 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C1.....	58

Figura 25 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C2	60
Figura 26 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C2.....	61
Figura 27 - (a) Potência ativa do VSG, (b) frequência e (c) ROCOF para os controles C1PQ e C1VSG; (d) Potência ativa do VSG, (e) frequência e (f) ROCOF para os controles C2PQ e C2VSG; (g) Potência ativa do VSG, (h) frequência e (i) ROCOF para os controles C3PQ e C3VSG.....	65
Figura 28 - ROCOF médio para os controles (a) C1PQ e C1VSG, (b) C2PQ e C2VSG, e (c) C3PQ e C3VSG	66
Figura 29 - Diagrama de blocos do FLC	69
Figura 30 - Diagrama de blocos do WFLC dos algoritmos (a) FLC original e (b) FLC com frequência adaptativa.....	70
Figura 31 - Diagrama de blocos do 3WFLC/SDFLC.....	71
Figura 32 - Visão geral da aplicação das estratégias FLC1 ou FLC2 em um sistema elétrico	72
Figura 33 - Visão geral da aplicação da estratégia FLC3 em um sistema elétrico com três barramentos	73
Figura 34 - Fluxograma do ajuste do ganho do detector harmônico baseado em FLC com ganho com passo adaptativo	74
Figura 35 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C1	76
Figura 36 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C1	77
Figura 37 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C2	80
Figura 38 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C2.....	81
Figura 39 - Visão geral do sistema com quatro barramentos	85
Figura 40 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo k_{v5} em C3.....	86
Figura 41 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 2$ s	87

Figura 42 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 3$ s	88
Figura 43 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 4$ s	88
Figura 44 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 2$ s	91
Figura 45 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 3$ s	91
Figura 46 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 4$ s	92
Figura 47 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5° harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo $k_{v,5}$ em C4.....	95
Figura 48 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 2$ s	96
Figura 49 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 3$ s	96
Figura 50 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 4$ s	97
Figura 51 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 2$ s	100
Figura 52 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 3$ s	100

Figura 53 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 4$ s	101
Figura 54 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo $k_{v,5}$ em C5.....	104
Figura 55 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 2$ s	105
Figura 56 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 3$ s	105
Figura 57 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 4$ s	106
Figura 58 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 2$ s	109
Figura 59 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 3$ s	110
Figura 60 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 4$ s	110
Figura 61 - Circuito experimental da compensação harmônica usando uma máquina síncrona com circuitos de campo ressonante	126
Figura 62 - Circuito do filtro harmônico eletromecânico proposto usando AACWSM	127
Figura 63 - Circuito do filtro harmônico eletromecânico proposto usando uma MS convencional.....	128
Figura 64 - Circuito experimental da compensação de correntes harmônicas de neutro em um sistema trifásico a quatro fios por uma MS	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de inversor que combinam o VSG com detecção harmônica	24
Tabela 2 - Visão geral das estratégias de controle inercial.....	36
Tabela 3 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG.....	40
Tabela 4 - Especificação e parâmetros do filtro LCL.....	41
Tabela 5 - Ganhos do controlador PI-RES	41
Tabela 6 - Influência de J no nadir de frequência	42
Tabela 7 - Influência de J nos ROCOFs médio mínimo e máximo	43
Tabela 8 - Influência de D no nadir de frequência	44
Tabela 9 - Influência de D nos ROCOFs médio mínimo e máximo	45
Tabela 10 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG.....	56
Tabela 11 - Potências ativa e reativa e DHT da carga.....	56
Tabela 12 - Ganhos dos controladores	56
Tabela 13 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica.....	57
Tabela 14 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C1 antes e após a compensação harmônica	58
Tabela 15 - Redução percentual da DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C1	59
Tabela 16 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica	59
Tabela 17 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C1 antes e após a compensação harmônica	60
Tabela 18 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica.....	61
Tabela 19 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C2 antes e após a compensação harmônica	62
Tabela 20 - Redução percentual do DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C2	62
Tabela 21 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica	62
Tabela 22 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C2 antes e após a compensação harmônica	63
Tabela 23 - Potência da carga.....	64
Tabela 24 - Nadir de frequência dos controladores PQ e VSG após alteração de carga.....	65

Tabela 25 - ROCOFs médio mínimo e máximo dos controladores PQ e VSG após a alteração de carga.....	66
Tabela 26 - Ganhos do controlador PI-RES	75
Tabela 27 - Ganhos dos controladores de detecção harmônica baseados em FLC	75
Tabela 28 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica.....	76
Tabela 29 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C1 antes e após a compensação harmônica	77
Tabela 30 - Redução percentual dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e do DHT da corrente do alimentador após a compensação harmônica em C1	78
Tabela 31 - Redução percentual dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e do DHT da tensão do PAC após a compensação harmônica em C1	78
Tabela 32 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica	78
Tabela 33 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C1 antes e após a compensação harmônica	79
Tabela 34 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica.....	80
Tabela 35 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C2 antes e após a compensação harmônica	81
Tabela 36 - Redução percentual dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e do DHT da corrente do alimentador após a compensação harmônica em C2	82
Tabela 37 - Redução percentual dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e do DHT da tensão do PAC após a compensação harmônica em C2	82
Tabela 38 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica	83
Tabela 39 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C2 antes e após a compensação harmônica	83
Tabela 40 - Conexão dos inversores e cargas nos cenários C3, C4 e C5	84
Tabela 41 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG.....	85
Tabela 42 - Potências ativa e reativa e DHT das cargas nos cenários C3, C4 e C5	85
Tabela 43 - Ganhos do controlador PI-RES	86
Tabela 44 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C3.....	89
Tabela 45 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C3.....	90

Tabela 46 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C3	93
Tabela 47 - DHIs e DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C3	94
Tabela 48 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C4.....	98
Tabela 49 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C4.....	99
Tabela 50 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C4.....	102
Tabela 51 - DHIs e DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C4	103
Tabela 52 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C5.....	107
Tabela 53 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C5.....	108
Tabela 54 - Amplitude dos harmônicos de 5 ^a e 7 ^a ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C5	111
Tabela 55 - DHTs e DHIs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C5	112
Tabela 56 - Explicação da FMM interna	125
Tabela 57 - Combinação dos harmônicos injetados no enrolamento de campo e as FMMs produzidas.....	127
Tabela 58 - Harmônicos e sequências da carga modelada como fonte de corrente nos em C1 e C2.....	133
Tabela 59 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C3.....	133
Tabela 60 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C4.....	134
Tabela 61 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C5.....	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	26
1.2 Organização do Trabalho.....	27
2 GERADOR SÍNCRONO VIRTUAL.....	29
2.1 Controle de potência constante instantânea – Controle PQ.....	29
2.2 Estratégias de controle de potência inercial.....	30
2.2.1 Modelo completo do gerador síncrono virtual.....	32
2.2.2 Modelo simplificado do gerador síncrono virtual.....	34
2.3 Influência da variação do momento virtual de inércia e do fator de amortecimento no comportamento do VSG.....	39
2.4 Conclusões.....	45
3 DETECÇÃO HARMÔNICA BASEADA NA TEORIA P-Q.....	47
3.1 Teoria da potência instantânea – Teoria $p-q$	47
3.1.1 Transformada de Clarke.....	47
3.1.2 As potências instantâneas na Teoria $p-q$	49
3.2 Detecção harmônica baseada na Teoria $p-q$	50
3.3 Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ e comparação das combinações de estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ com controles VSG e PQ.....	54
3.3.1 Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$	54
3.3.2 Comparação das combinações de estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ com controles VSG e PQ.....	63
3.4 Conclusões.....	67
4 DETECÇÃO HARMÔNICA BASEADA EM COMBINADORES LINEARES DE FOURIER.....	68
4.1 Combinadores lineares de Fourier (FLC).....	68
4.2 Detecção harmônica de sinais trifásicos baseada em FLC.....	72

4.3	Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas em FLC	75
4.4	Aplicação do 3WFLC/SDFLC com passo adaptativo em dois inversores conectados a uma rede de distribuição com quatro barramentos.....	83
4.4.1	Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C3.....	86
4.4.2	Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C4.....	95
4.4.3	Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C5.....	104
4.5	Conclusões	113
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	115
5.1	Trabalhos futuros	117
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA	132
	APÊNDICE B – MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA COMPENSAÇÃO DE HARMÔNICOS	125
	APÊNDICE C – CARGAS HARMÔNICAS	132

1 INTRODUÇÃO

Apesar de ser um conceito relativamente novo na literatura de economia sobre os mercados de eletricidade, a geração distribuída (GD), definida como geração de eletricidade em escala, está presente no sistema elétrico desde seus primórdios. No início da década de 1880, Thomas Edison introduziu um sistema elétrico baseado em transmissão de corrente contínua (CC) em tensões não superiores a 240 V. Apesar destes sistemas serem seguros, a baixa tensão de transmissão impedia que eles alcançassem consumidores localizados a mais de uma milha dos geradores. No meio da década de 1880, George Westinghouse introduziu um sistema de distribuição baseado em corrente alternada (CA). Neste sistema, é possível usar transformadores para elevar e abaixar a tensão no sistema. Assim, é possível transmitir potência em tensões muito mais elevadas que o sistema CC sem transformador e abaixá-las para um nível seguro para alimentar residências e escritórios, por exemplo (REYNOLDS; BERNSTEIN, 1989). As redes CA possibilitaram a transmissão de energia elétrica em longas distâncias e economia de escala na geração de energia elétrica, levando ao aumento da potência das unidades de geração. Assim, grandes sistemas de geração de energia elétrica centralizados foram construídos, consistindo de grandes redes de transmissão e distribuição e maiores usinas de geração de eletricidade (PEPERMANS et al., 2005).

Nos anos recentes, inovações tecnológicas e mudanças econômicas e no ambiente regulatório têm resultado num renovado interesse pela geração distribuída. Algumas tecnologias de GD, como painéis fotovoltaicos, produzem tensão contínua. Assim, estas unidades devem ser conectadas ao sistema via interfaces CC-CA, como os conversores estáticos, que, além de contribuir para a proliferação de harmônicos de alta frequência, tem a desvantagem de não apresentar um comportamento inercial, que pode se tornar um problema em relação à estabilidade do sistema (PEPERMANS et al., 2005). Esses conversores CC-CA usualmente usam controles de potência constante instantânea (Controle PQ) ou estratégias de controles similares (ENCARNAÇÃO et al., 2018).

No sistema elétrico, a frequência da tensão gerada é estabilizada pela combinação da inércia rotacional dos geradores síncronos (GS) no sistema e de controladores que atuam na velocidade rotacional dos GSs. No futuro, a substituição de parte significativa da geração síncrona por unidades de geração não rotacional pode diminuir consideravelmente a inércia total do sistema, prejudicando a estabilidade angular e de frequência dos sistemas elétricos.

Um modo de aumentar a estabilidade nos sistemas é fazer com que a GD combinada com um inversor de interface se comporte como uma máquina síncrona (MS). Isto pode ser obtido através do controle adequado do inversor de potência. Dessa forma, foram propostos na literatura os controles do gerador síncrono virtual (VSG, do inglês *Virtual Synchronous Generator*), que emulam a característica inercial e o amortecimento das oscilações eletromecânicas comuns às MS físicas (BECK; HESSE, 2007; DRIESEN; VISSCHER, 2008; VISSCHER; HAAN, 2008).

Assim como o aumento das unidades de geração não rotacional pode causar problemas ao sistema elétrico, os harmônicos também afetam a qualidade de energia do sistema elétrico. O surgimento da eletrônica de potência fez com que a proporção de cargas não lineares, aquelas que também consomem harmônicos de correntes além da componente fundamental em 60 Hz, aumentasse consideravelmente (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). O crescimento destas cargas, independentemente do nível de potência, tem causado grande impacto na qualidade de energia do sistema elétrico (MORÁN; DIXON, 2007). Em motores e em geradores, por exemplo, a distorção harmônica pode aumentar as perdas no ferro e no cobre, as oscilações mecânicas e a emissão de ruídos audíveis. Outros equipamentos, como transformadores, capacitores e equipamentos eletrônicos também são suscetíveis aos efeitos dos harmônicos (IEEE RECOMMENDED PRACTICES AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS, 1993).

Alguns trabalhos propuseram o uso de MS para compensar os harmônicos presentes em um sistema (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001a, 2001b; FUKAMI et al., 2001; TAKASE et al., 1997). Em (CHEN; LI; YANG, 2009) é proposto o modelo matemático dos trabalhos apresentados em (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001a, 2001b; TAKASE et al., 1997). A compensação de harmônicos usando máquinas síncronas baseada nestes trabalhos é mostrada detalhadamente no Apêndice A.

Após o surgimento do VSG, alguns autores propuseram trabalhos que combinam as funcionalidades dos VSGs com a compensação harmônica, que buscam melhorar a estabilidade de frequência do sistema e mitigar as distorções de tensão e correntes harmônicas presentes em um sistema elétrico. Em (QU et al., 2017), os autores propõem a aplicação do controle VSG combinado com um detector harmônico em um inversor trifásico com quatro pernas, de modo que o inversor pode contribuir para a estabilidade de frequência, regular a tensão e melhorar a qualidade de energia do sistema. Uma fonte de tensão CC conectada ao

inversor representa a unidade de GD. O VSG deste trabalho usa o modelo de uma MS de segunda ordem e a estrutura de detecção das correntes harmônicas é baseada na Transformada de Park. O trabalho também propõe a seleção dos parâmetros baseada na característica de resposta dinâmica do controle VSG. A Figura 1 ilustra uma visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a detecção harmônica baseada na Transformada de Park.

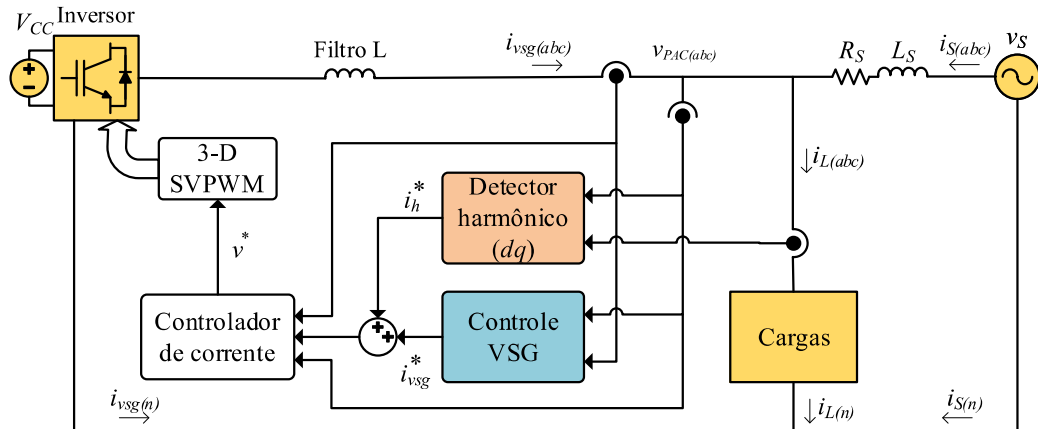


Figura 1 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a detecção harmônica baseada na Transformada de Park

Fonte: elaborada pelo autor.

Em (KAZEMI; AFJEI; RAHMATI, 2019), os autores propõem um controle de inversor que combina o controle VSG e o controle repetitivo de ordem fracionária alterado (AFORC, tradução livre do inglês *amended fractional order repetitive control*). Este controle é aplicado a um inversor trifásico com três pernas e a unidade de GD do sistema é representada por uma fonte de tensão CC. Com esta proposta, a implementação da inércia virtual pode melhorar a estabilidade de frequência do sistema e o AFORC força a corrente da rede a ser senoidal e balanceada, mesmo com a presença de tensões distorcidas da rede e de cargas não lineares desbalanceadas. A Figura 2 mostra a visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com o AFORC.

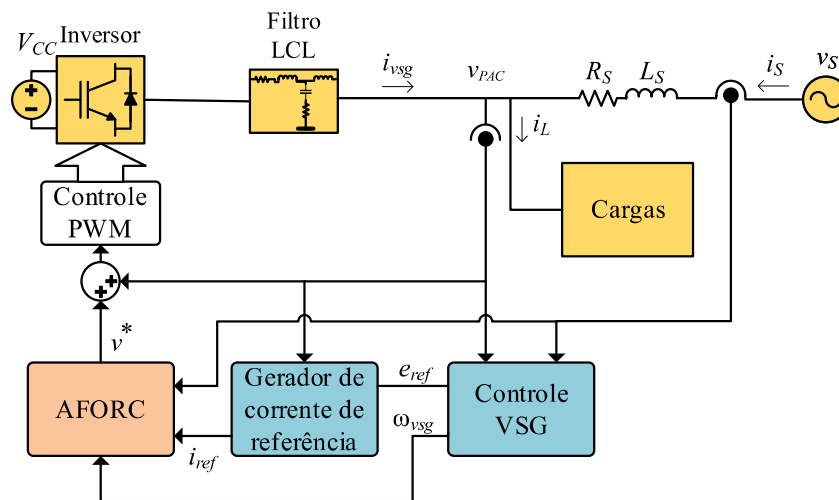


Figura 2 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com o AFORC

Fonte: elaborada pelo autor.

Em (LOU et al., 2021), os autores propõem a combinação do controle VSG com uma estratégia híbrida de supressão harmônica para eliminar simultaneamente as distorções da tensão local do inversor e da corrente da rede elétrica. O controle da tensão harmônica local busca reduzir a impedância de saída do inversor por meio de uma malha de realimentação negativa, enquanto o compensador controlado por corrente da rede destina-se a neutralizar os efeitos adversos de uma rede fraca por meio de uma tensão adicional. A estratégia híbrida proposta diminui significativa e simultaneamente a distorção harmônica total da tensão local do inversor e da corrente da rede. A detecção harmônica é feita através do observador de componentes de sequência harmônica múltipla (MHSCO, tradução livre do inglês *multiple harmonic sequence components observer*). A Figura 3 mostra a visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a estratégia híbrida de supressão harmônica.

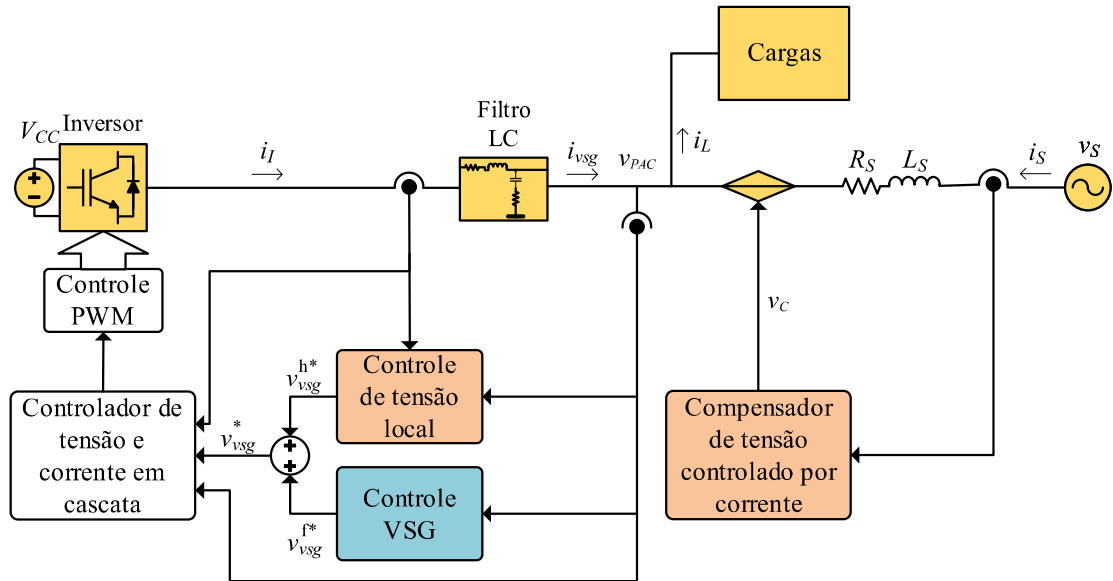


Figura 3 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia de controle que combina o controle VSG com a estratégia híbrida de supressão harmônica
 Fonte: elaborada pelo autor.

Em (FRANÇA et al., 2022), os autores propõem a combinação de um filtro ativo operando com a funcionalidade de inércia virtual baseada no controle de um *Synchronverter* (ZHONG; WEISS, 2011). A filtragem harmônica seletiva é realizada através de controladores proporcionais ressonantes (PR) C_h sintonizados em $h = 3, 5, 7, 11$. *Synchronfilter* é o nome adotado para o controle apresentado. Este controle é aplicado a um inversor trifásico com três pernas e o dispositivo de armazenamento de energia é representado por um banco de capacitores conectados ao inversor. Os autores também propõem um método de projeto da sintonia de parâmetros que garante estabilidade e condicionamento adequado dos problemas relacionados a qualidade de energia. Além disso, a quantidade reduzida de parâmetros a serem sintonizados é outra vantagem deste controle. A Figura 4 mostra a visão geral do *Synchronfilter* aplicado a um sistema elétrico.

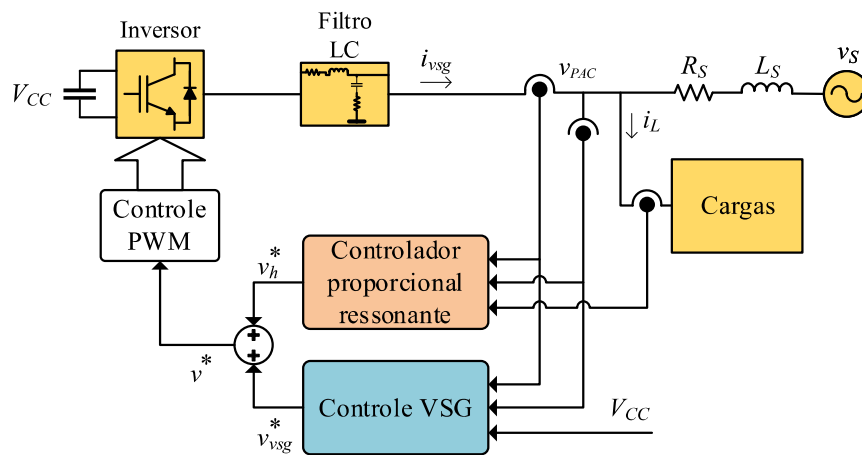


Figura 4 - Visão geral do Synchronfilter aplicado a um sistema elétrico.
Fonte: elaborada pelo autor.

Em (HOSSEINI et al., 2022), os autores propõem a combinação do controle VSG com uma estratégia de redução da tensão harmônica baseada no VSG que mitiga seletivamente os harmônicos de tensão. Neste controle, além do momento virtual de inércia J_1 e do coeficiente de amortecimento mecânico D_1 existentes no controle VSG na frequência fundamental, existem o momento virtual de inércia J_h e o coeficiente de amortecimento mecânico D_h no controle VSG harmônico na frequência de h -ésima ordem. Dentre as estratégias de compensação estudadas, esta é a única que adiciona comportamento inercial à compensação harmônica. A Figura 5 mostra a visão geral do sistema elétrico e da estratégia que combina o controle VSG com o compensador de tensão harmônica baseado no VSG.

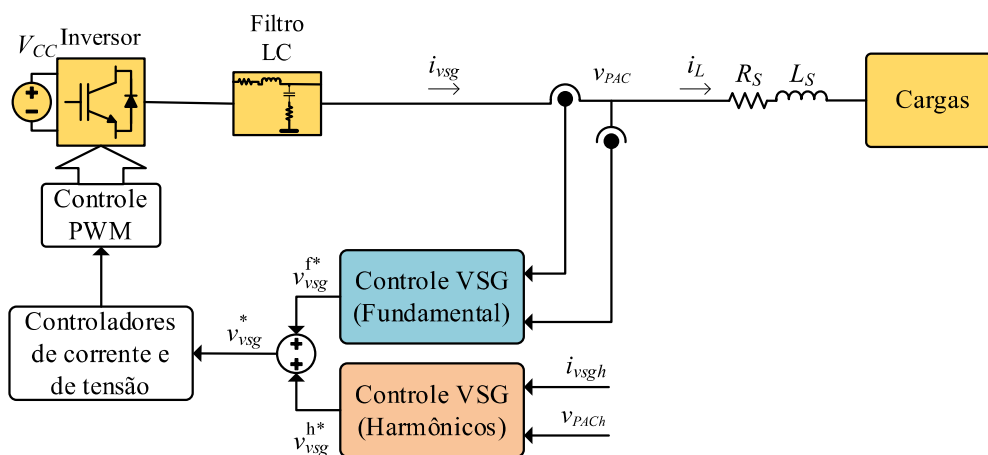


Figura 5 - Visão geral do sistema elétrico e da estratégia que combina o controle VSG com o compensador de tensão harmônica baseado no VSG
Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 1 resume as principais características das propostas de controle VSG combinado com estratégias de detecção harmônica.

Tabela 1 - Características de inversor que combinam o VSG com detecção harmônica

Referência	Tipo de inversor	Filtro do inversor	Elo CC do inversor	Detecção harmônica			
				Algoritmo	Medições	Seletividade	
						Harmônica	Sequência
(QU et al., 2017)	4 pernas	L	Fonte de tensão	Baseado em eixos dq	v_{PAC}, i_L	não	não
(KAZEMI; AFJEI; RAHMATI, 2019)	3 pernas	LCL	Fonte de tensão	AFORC	v_{PAC}, i_S	não	não
(LOU et al., 2021)	3 pernas	LC	Fonte de tensão	MHSCO	v_{PAC}, i_{VSG}	sim	não
(FRANÇA et al., 2022)	3 pernas	LC	Banco de capacitores	Controlador PR	$v_{PAC}, \dot{i}_L, \dot{i}_{SCF}$	sim	não
(HOSSEINI et al., 2022)	3 pernas	LC	Fonte de tensão	VSG harmônico	v_{PAC}, i_{VSG}	sim	não

Fonte: elaborada pelo autor.

Os circuitos dos trabalhos apresentados na Tabela 1 possuem somente dois barramentos, um da fonte de tensão do sistema e outro no qual as cargas e o inversor são conectados. Esta tese propõe como principal contribuição, uma estratégia que combina o controle VSG com uma estratégia de detecção harmônica seletiva, tanto em ordem harmônica quanto em sequência, com ganho adaptativo que mede somente v_{PAC} a fim de detectar as harmônicas de tensão. Este controle é usado em dois inversores que são conectados a um sistema com quatro barramentos.

Inicialmente, esta tese propõe e compara três combinações do controle VSG (CHEN et al., 2011) com controladores de filtro ativo baseados na Teoria $p-q$ (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Os três controles de filtro ativo medem grandezas distintas para determinar as correntes harmônicas de referência de compensação. Na primeira estratégia de compensação (AMORIM; CARLETTI; ENCARNAÇÃO, 2018), o controlador mede a tensão no ponto de acoplamento comum (v_{PAC}) e a corrente da carga (i_L) para detectar as correntes harmônicas de uma carga específica e compensá-las, de modo que a corrente harmônica da rede é mitigada. Na segunda estratégia de controle (AMORIM; CARLETTI; ENCARNAÇÃO, 2019b), o controlador mede v_{PAC} e a corrente do alimentador do sistema elétrico (i_L) e determina, dinamicamente, uma corrente de compensação de referência que mitiga a corrente harmônica presente no alimentador do sistema. Na terceira estratégia de compensação (AMORIM; CARLETTI; ENCARNAÇÃO, 2019a), o controlador mede somente v_{PAC} e, a partir da detecção das tensões harmônicas desta tensão, determina uma corrente de compensação de referência necessária para amortecer as tensões harmônicas presentes nos barramentos do sistema elétrico. Dentre as estratégias propostas na literatura e

neste trabalho, esta é a única estratégia que mede somente a tensão para detectar os harmônicos.

Um estudo comparativo das três combinações do controle VSG com controladores de filtro ativo baseados na Teoria $p-q$ a fim de destacar as características de compensação dos detectores harmônicos em um sistema com cargas não lineares e em cenários com e sem harmônicos de tensão na fonte que alimenta o sistema elétrico (AMORIM; CARLETTI; ENCARNAÇÃO, 2021). Neste estudo comparativo, é observado que os controles de filtro ativo que medem a tensão no PAC e corrente de carga ou do alimentador são mais adequados para os consumidores individuais, enquanto a estratégia que mede somente a tensão no PAC é mais adequada para as concessionárias elétricas. Como o trabalho desenvolvido nesta tese busca melhorar de maneira global a qualidade de energia de um sistema, a estratégia que mede somente tensão no PAC para determinar as correntes harmônicas de referência é mais adequada para este propósito. Além disso, as combinações do controle VSG com detecção harmônica são comparadas com combinações de controle PQ com detecção harmônica a fim de verificar se o controle VSG pode melhorar a estabilidade de frequência do sistema elétrico.

Após a definição da estratégia adequada para a mitigação dos harmônicos presentes em um sistema elétrico, é proposta a combinação do controle VSG com uma estratégia de detecção harmônica baseada em combinadores lineares de Fourier (FLC, do inglês *Fourier Linear Combiner*) (BARROS JUNIOR et al., 2020). Com este detector harmônico, é possível selecionar as ordens harmônicas a serem compensadas e aplicar ganhos diferentes para cada ordem harmônica. Duas simulações com abordagens distintas nos controladores de detecção harmônica são comparadas. Em uma simulação, ganhos proporcionais distintos são aplicados nas tensões harmônica de 5ª e 7ª ordens e um ganho único é aplicado para as demais ordens harmônicas. Na outra simulação, controladores proporcional-integral são aplicados nas tensões de 5ª e 7ª ordens harmônica e um ganho único é aplicado para as demais ordens harmônicas.

Por fim, é proposta uma combinação do controle VSG com uma estratégia de detecção harmônica seletiva baseada em FLC com ganho com passo adaptativo para o harmônico de 5ª ordem e esta estratégia é aplicada em um sistema com quatro barramentos. Esta é a principal contribuição desta tese. A detecção harmônica baseada em FLC, além de permitir a seleção dos harmônicos, também permite a seleção das sequências a serem compensadas. O passo adaptativo do ganho é calculado a partir de uma função custo que tenta minimizar as tensões e

as correntes harmônicas presentes no barramento mais próximo da fonte de tensão no sistema. Três cenários distintos são simulados a fim de mostrar que o ganho com passo adaptativo reduz significativamente as distorções harmônicas presentes no sistema. Enquanto as demais estratégias de controle são aplicadas em sistemas com dois barramentos, esta estratégia é aplicada em um sistema com quatro barramentos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta tese é estudar um VSG que, além de despachar a energia proveniente de uma fonte de geração distribuída, também seja capaz de compensar seletivamente os harmônicos de um sistema elétrico.

Os objetivos específicos são:

- Modelar uma máquina síncrona que, além de possuir as características inerentes de uma máquina síncrona convencional, também seja capaz de compensar harmônicos;
- Simular o modelo do VSG adotado e analisar a influência das variações da inércia virtual e do coeficiente de amortecimento no comportamento do controle VSG *software* Typhoon HIL Control Center em tempo real;
- Propor a combinação de detectores harmônicos baseados na Teoria $p-q$ com o controle VSG.
- Simular as combinações de detectores harmônicos baseados na Teoria $p-q$ com o controle VSG no *software* Typhoon HIL Control Center. Comparar a eficácia e limitações dos detectores harmônicos em cenários sem e com harmônicos de tensão na fonte de tensão do sistema; e comparar o impacto das combinações dos controles PQ e VSG na estabilidade de frequência de um sistema;
- Determinar qual a combinação de detectores harmônicos baseados na Teoria $p-q$ com o controle VSG mais adequada, do ponto de vista de uma concessionária de energia elétrica, para mitigar os harmônicos de tensão e corrente em um sistema elétrico.

- Propor a combinação de um detector harmônico seletivo baseado em FLC com a estratégia de controle VSG.
- Simular a combinação de um detector harmônico seletivo baseado em FLC com a estratégia de controle VSG no *software* Typhoon HIL Control Center e verificar a seletividade dos controladores propostos.
- Propor a combinação de um detector harmônico baseado em FLC com ganho adaptativo com a estratégia de controle VSG.
- Simular a combinação de um detector harmônico baseado em FLC com ganho adaptativo com a estratégia de controle VSG em um sistema com vários barramentos e dois inversores, a fim de verificar que o controlador proposto pode minimizar os harmônicos de tensão e de corrente em um barramento específico do sistema.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos, cujos escopos estão descritos a seguir:

- Capítulo 1: introduz os problemas causados pela alta penetração de unidades de GD e a proliferação de equipamentos baseados em eletrônica de potência no sistema elétrico e apresenta possíveis soluções para estes dois problemas. É apresentado estado da arte de controles de inversor que combinam as funcionalidades do VSG com filtro ativo e de MS físicas modificadas para compensar correntes harmônicas, definindo-as brevemente e discutindo as suas peculiaridades. Também apresenta os objetivos geral e específicos do trabalho e como ele está organizado.
- Capítulo 2: apresenta os modelos completo e simplificado do VSG e o controle PQ utilizados nas simulações. A partir do modelo completo do VSG, algumas simplificações podem ser feitas e os efeitos destas simplificações no comportamento do VSG são apresentados. Simulações foram feitas para mostrar o impacto da variação do momento de inércia virtual J e do coeficiente de amortecimento D nas potências ativa e reativa durante transitórios.

- Capítulo 3: apresenta a Teoria $p-q$ e três estratégias de detecção harmônica baseadas nesta teoria. Dois conjuntos de simulações foram realizados para comparar as estratégias de detecção harmônica e para comparar a atuação das combinações de estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ com controles VSG e PQ durante transitórios.
- Capítulo 4: apresenta o FLC e duas estratégias de detecção harmônica baseadas em FLC. Estas duas estratégias são simuladas e os resultados são comparados e discutidos. Neste capítulo é proposta a principal contribuição deste trabalho, a combinação do controle VSG com detecção harmônica baseada em FLC com ganho com passo adaptativo. Este controle é aplicado a dois inversores conectados a uma rede elétrica com quatro barramentos e três cenários distintos são simulados para verificar que o controle proposto reduz satisfatoriamente as tensões e correntes harmônicas ao longo da rede.
- Capítulo 5: apresenta as conclusões finais, destacando a contribuição da combinação dos controles VSG e de detecção harmônica para a melhoria da estabilidade de frequência do sistema e da qualidade de energia elétrica, respectivamente.

No Apêndice B estão descritos os trabalhos publicados com base nesta pesquisa.

2 GERADOR SÍNCRONO VIRTUAL

Neste capítulo, serão apresentados o modelo completo do gerador síncrono virtual e o modelo simplificado utilizado no desenvolvimento do trabalho. Quanto maior o número de equações diferenciais utilizada na modelagem, maior a complexidade e a fidelidade do modelo em relação ao comportamento de uma MS real. Entretanto, o modelo completo de uma MS pode acrescentar uma complexidade desnecessária se o propósito é emular as características de inércia e amortecimento da MS ao controlador de um inversor (ALRAJHI ALSIRAJI; EL-SHATSHAT, 2017; D'ARCO; SUUL, 2013).

Além do controle VSG, este capítulo também apresenta um controle de potência constante instantânea (Controle PQ) não inercial. Simulações são realizadas para mostrar a influência do momento de inércia J e do coeficiente de amortecimento D nas potências ativa e reativa durante transitórios.

2.1 Controle de potência constante instantânea – Controle PQ

A Figura 6 mostra o circuito de potência de um inversor com o controle PQ. A tensão de referência de um inversor pode ser obtida com o uso de diferentes estratégias de controle, como a estratégia de controle PQ. Nesta estratégia, as potências ativa e reativa de saída do inversor seguem instantaneamente as referências definidas de acordo com as demandas de potência do sistema. É importante ressaltar que esta estratégia de controle não fornece inércia adicional ao sistema (ENCARNAÇÃO et al., 2018).

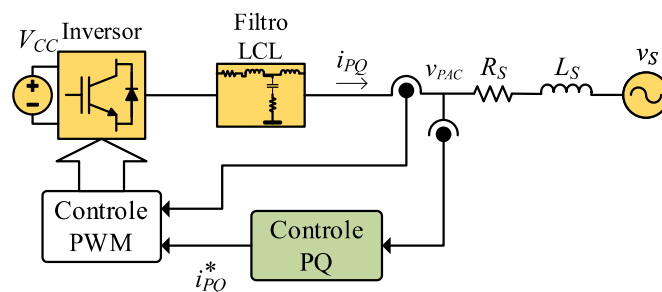


Figura 6 - Circuito de potência de um inversor com o controle PQ
Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 7 mostra o diagrama de blocos da estratégia de controle PQ. Nesta estratégia, as correntes do inversor ($i_{PQ(abc)}$) e as tensões no ponto de acoplamento comum ($v_{PAC(abc)}$) são

medidas e as potências ativa e reativa de referência P^* e Q^* , respectivamente, são as referências de potência ativa e reativa de saída do inversor. A transformada de Clarke é utilizada para mapear as correntes e tensões nos eixos abc em correntes e tensões nos eixos $\alpha\beta 0$. Um Integrador Generalizado de Segunda Ordem Duplo – Laço Sincronizado em Frequência (DSOGI-FLL, do inglês *Dual Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked Loop*) (RODRÍGUEZ et al., 2006) é usado para extrair a sequência positiva da componente fundamental das tensões no PAC ($v'_{PAC(\alpha\beta 0)}$). Como as potências de referência P^* e Q^* são constantes e as tensões $v'_{PAC(\alpha\beta 0)}$ possuem somente a componente de 60 Hz, é garantido que a referência de corrente a ser sintetizada pelo inversor ($i^*_{PQ(\alpha\beta 0)}$) só possui a componente de 60 Hz.

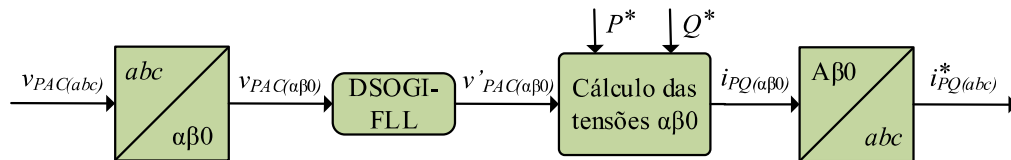


Figura 7 - Diagrama de blocos da estratégia de controle PQ
Fonte: elaborada pelo autor.

O conversor CC-CA é representado por um inversor trifásico e a fonte de tensão equivalente conectada ao inversor é representada por uma fonte de tensão contínua (V_{CC}).

2.2 Estratégias de controle de potência inercial

Alguns autores tem proposto estratégias de controle com características inerciais para inversores de unidades de geração que não possuem inércia rotacional e não contribuem naturalmente para a estabilidade do sistema (BECK; HESSE, 2007; DRIESEN; VISSCHER, 2008; VISSCHER; HAAN, 2008; ZHONG; WEISS, 2011). A ideia dessas estratégias de controle é imitar o comportamento de uma MS, especialmente em relação a emulação de características mecânicas destas máquinas, de modo que o inversor de interface que conecta a fonte não inercial ao sistema elétrico tenha um comportamento similar ao de uma MS na ocorrência de distúrbios no sistema elétrico. Portanto, o princípio básico de qualquer estratégia de controle inercial é baseado na implementação da equação de *swing* de uma MS (D'ARCO; SUUL, 2013). Equações (1) e (2) apresentam a modelagem mecânica completa para uma MS (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

$$T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D \cdot \Delta\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

onde T_m é torque mecânico, T_e é o torque elétrico, P_m é a potência mecânica, P_e é a potência elétrica, ω é a velocidade angular, $\Delta\omega$ é o desvio da velocidade angular, θ é a referência angular da máquina, D é o coeficiente de amortecimento mecânico, e J é o momento virtual de inércia.

A inclusão das equações mecânicas no controle de potência ativa do inversor faz com que o inversor seja capaz de imitar o comportamento de uma MS diante de distúrbios da frequência do sistema. Com a variação da frequência do sistema, uma variação da velocidade angular seria observada na Equação (2), fazendo com que o inversor injete um fluxo de potência ativa no sistema de forma a compensar o desequilíbrio momentâneo (ENCARNAÇÃO et al., 2018). O momento virtual de inércia e o coeficiente de amortecimento mecânico podem ser ajustados de acordo com a resposta desejada pelo projetista (D'ARCO; SUUL, 2013). O circuito de potência de um VSG é mostrado na Figura 8.

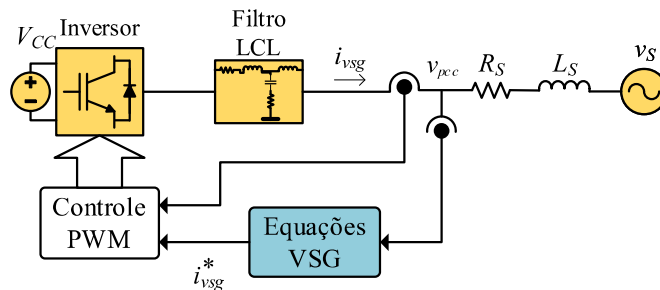


Figura 8 - Circuito de potência de um VSG
Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, como no circuito de potência de um inversor com controle PQ, o conversor CC-CA é representado por um inversor trifásico e a fonte de tensão equivalente conectada ao inversor é representada por uma fonte de tensão contínua (V_{CC}).

Diversos modelos de controle inercial podem ser utilizados para emular a inércia virtual. Esses modelos podem ser baseados na combinação das equações mecânicas e elétricas de uma MS ou baseados somente nas equações mecânicas. As primeiras propostas incluíam todas as equações mecânicas e elétricas referentes a modelagem dinâmica de uma MS e eram normalmente chamadas de máquinas síncronas virtuais (VISMA, do inglês *virtual synchronous machine*) (BECK; HESSE, 2007). Outras estratégias de controle, com diferentes

abordagens em relação ao modelo de máquina utilizado, podem ser encontradas na literatura com o nome de gerador síncrono virtual (VSG). Uma revisão extensa da literatura existente das diversas implementações do controle VSG pode ser encontrada em (ALRAJHI ALSIRAJI; EL-SHATSHAT, 2017; BEVRANI; ISE; MIURA, 2014; D'ARCO; SUUL, 2013; ENCARNAÇÃO et al., 2018).

2.2.1 Modelo completo do gerador síncrono virtual

O primeiro modelo de VSG foi proposto em (BECK; HESSE, 2007). Esta proposta consiste na analogia completa entre o comportamento de um inversor, utilizado como interface entre uma fonte de energia não inercial e a rede elétrica, e o comportamento de uma MS conectada à mesma rede elétrica.

O fluxo das potências ativa e reativa entre a máquina virtual e o PAC é feito com controle direto e indireto. O controle direto é feito com o ajuste da tensão de excitação virtual e das entradas de torque virtual e o controle indireto é baseado na resposta natural do modelo aos distúrbios de frequência e de tensão no sistema.

O desenvolvimento deste controle é baseado na modelagem completa de uma MS, que consiste na combinação do modelo elétrico de quinta ordem dos enrolamentos do estator, de amortecimento e de campo, e do modelo mecânico de segunda ordem da equação de *swing*.

As equações diferenciais que descrevem o modelo elétrico de quinta ordem de uma máquina síncrona são mostradas nas Equações (3)-(7) (MACHOWSKI et al., 2020).

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d(x_d - x'_d) \quad (3)$$

$$T'_{q0}\dot{E}'_d = -E'_d + I_q(x_q - x'_q) \quad (4)$$

$$T''_{d0}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q + I_d(x'_d - x''_d) \quad (5)$$

$$T''_{q0}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + I_q(x'_q - x''_q) \quad (6)$$

$$\dot{\Psi}_f = R_f I_f - E_f \quad (7)$$

onde T'_{d0} e T'_{q0} são as constantes de tempo transientes de circuito aberto nos eixos dq , T''_{d0} e T''_{q0} são as constantes de tempo subtransientes de circuito aberto, x_d e x_q são as reatâncias

síncronas, x'_d e x'_q são as reatâncias de transiente, x''_d e x''_q são as reatâncias de subtransiente, I_d e I_q são as correntes, E'_d e E'_q são as componentes da tensão de transiente, E''_d e E''_q são as componentes da tensão de subtransiente, E_f é a tensão de excitação da máquina, Ψ_f é o fluxo de campo, R_f é a resistência de campo da máquina, e I_f é a corrente de campo.

A tensão terminal de referência da máquina virtual é calculada a partir das Equações (8) e (9). A potência elétrica da máquina virtual, utilizada na equação de *swing*, é calculada a partir da Equação (10) (MACHOWSKI et al., 2020).

$$V_{td} = E''_d - x''_q I_q - I_d R_S \quad (8)$$

$$V_{tq} = E''_q + x''_d I_d - I_q R_S \quad (9)$$

$$P_e = E''_q I_q + E''_d I_d + (x''_d - x''_q) I_d I_q \quad (10)$$

onde V_{td} e V_{tq} são as componentes de tensão e R_S é a resistência de armadura da máquina.

A Figura 9 apresenta o diagrama de blocos do controle VSG baseado no modelo completo do gerador síncrono.

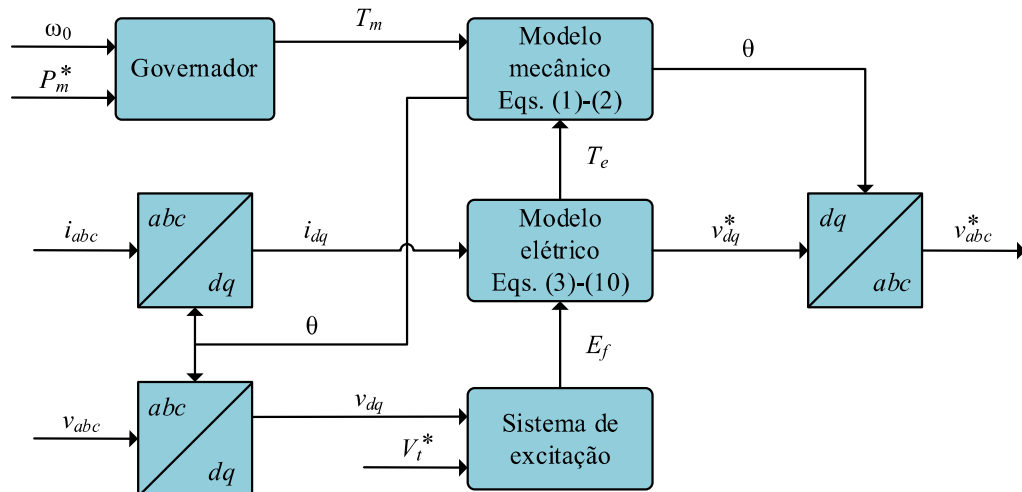


Figura 9 - Diagrama de blocos da estratégia de controle de um VSG

Fonte: elaborada pelo autor.

A função básica de um sistema de excitação é fornecer corrente CC para os enrolamentos de campo de uma MS.

2.2.2 Modelo simplificado do gerador síncrono virtual

Como o modelo completo de uma máquina síncrona pode ser desnecessariamente complexo de acordo com a aplicação do controle VSG, algumas simplificações a partir do modelo completo podem ser feitas (ENCARNAÇÃO et al., 2018; MACHOWSKI et al., 2020).

O modelo de sexta ordem desconsidera as dinâmicas do enrolamento de campo e é representado pelas equações Equação (1)-(6). Com a eliminação da equação de campo, Equação (7), o uso dos modelos de sistemas de excitação como uma realimentação variável não é mais possível. Apesar disso, o modelo de sexta ordem ainda representa o comportamento transitório da máquina com precisão (ENCARNAÇÃO et al., 2018). Alterações na potência mecânica P_m e na tensão de excitação da máquina E_f devem ser calculadas (MACHOWSKI et al., 2020).

O modelo eletromecânico de quinta ordem desconsidera o efeito de espelhamento (do inglês *screening effect*) das correntes parasitas do rotor. Neste modelo, a Equação (4) pode ser desconsiderada e o modelo é representado por um conjunto de cinco equações. Com a eliminação de uma das equações subtransientes, uma porção do torque de amortecimento produzido pelo enrolamento amortecedor é desprezada e, assim, o coeficiente de amortecimento D deve ser reajustado adequadamente (ENCARNAÇÃO et al., 2018). Assim como no modelo de sexta ordem, alterações na potência mecânica P_m e na tensão de excitação da máquina E_f devem ser calculadas (MACHOWSKI et al., 2020).

O modelo de quarta ordem omite os efeitos do enrolamento amortecedor e é representado pelas Equações (1)-(4), visto que as Equações (5) e (6) podem ser eliminadas do conjunto de equações. Assim, o gerador é representado pelas tensões transientes E'_d e E'_q e as reatâncias transientes x'_d e x'_q , como definido nas Equações (11) e (12) e a potência elétrica da máquina é definida pela Equação (13) (MACHOWSKI et al., 2020).

$$V_{td} = E'_d - x'_q I_q - I_d R_S \quad (11)$$

$$V_{tq} = E'_q + x'_d I_d - I_q R_S \quad (12)$$

$$P_e = E'_q I_q + E'_d I_d + (x'_d - x'_q) I_d I_q \quad (13)$$

Com a omissão completa da dinâmica do enrolamento amortecedor, a potência de entreferro calculada desconsidera o torque assíncrono produzido por eles. Conseqüentemente, o valor do

coeficiente de amortecimento D da Equação (1) deve ser aumentado apropriadamente para o torque assíncrono médio (MACHOWSKI et al., 2020).

O modelo de terceira ordem, assim como o modelo de quarta ordem, ignora os efeitos do enrolamento amortecedor e omite o efeito de espelhamento das correntes parasitas do rotor. Com essas duas considerações, as Equações (4)-(6) são eliminadas do conjunto de equações e o modelo de terceira ordem é representado pelas Equações (1)-(3) (ENCARNAÇÃO et al., 2018). Devido às considerações deste modelo, a potência elétrica é calculada pela Equação (14) (MACHOWSKI et al., 2020).

$$P_e = E'_q I_q + (x'_d - x_q) I_d I_q \quad (14)$$

O modelo de segunda ordem é utilizado para análise dinâmica simplificada do sistema de potência, assumindo que a corrente induzida de eixo direto e a tensão interna não sofrem grandes variações durante transitórios. Este modelo é representado por uma fonte de tensão com uma reatância transitória de eixo direto e as equações de oscilação mecânica (ENCARNAÇÃO et al., 2018). Este modelo clássico de gerador síncrono é amplamente usado para análises simplificadas das dinâmicas do sistema de potência (MACHOWSKI et al., 2020).

O modelo de primeira ordem considera somente o uso da Equação (1) para prover inércia sintética com amortecimento para o sistema, desprezando a Equação (2). Assim, é necessário o uso de um *phase locked loop* (PLL) para fornecer a referência angular para a máquina síncrona virtual para conectar o inversor à rede. Portanto, esta topologia não é capaz de operar no modo ilhado ou de executar *black start* (ENCARNAÇÃO et al., 2018).

A Tabela 2 resume o conjunto de equações e as capacidades operacionais de cada modelo de VSG apresentado nesta seção (ENCARNAÇÃO et al., 2018).

Tabela 2 - Visão geral das estratégias de controle inercial

Ordem	Equações	Capacidades operacionais	Referências
7	(1)–(7)	Ilhamento <i>Black start</i> Inércia virtual Modelo dinâmico completo	(PELCZAR, 2012)
6	(1)–(6)	Ilhamento <i>Black start</i> Inércia virtual Torque de amortecimento Modelo dinâmico completo quase completo	–
5	(1)–(3), (5)–(6)	Ilhamento <i>Black start</i> Inércia virtual Torque de amortecimento limitado	–
4	(1)–(4)	Ilhamento <i>Black start</i> Inércia virtual	(SOUZA et al., 2016; ZHANG et al., 2013)
3	(1)–(3)		–
2	(1)–(2)		(AOUINI et al., 2017; D'ARCO; SUUL; FOSSO, 2013; MA; ZHONG, 2012; SAKIMOTO; MIURA; ISE, 2011; ZHONG et al., 2015; ZHONG; WEISS, 2011)
1	(1)	Inércia virtual	(KARAPANOS; KOTSAMPOPOULOS; HATZIARGYRIOU, 2015; VAN WESENBEECK et al., 2009)

Fonte: elaborada pelo autor

O modelo simplificado do gerador síncrono virtual utilizado neste trabalho é baseado no modelo apresentado em (CHEN et al., 2011). Neste artigo, um modelo trifásico de MS é usado para calcular as correntes de referência. O modelo trifásico reproduz o circuito do estator de uma MS e o subsistema mecânico. No lugar de um circuito de campo, uma tensão induzida no estator é considerada.

O circuito do estator é descrito pelas Equações (14)-(17).

$$e_a - v_{PACa} = R_{VSG} \cdot i_a + L_{VSG} \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (14)$$

$$e_b - v_{PACb} = R_{VSG} \cdot i_b + L_{VSG} \cdot \frac{di_b}{dt} \quad (15)$$

$$e_c - v_{PACc} = R_{VSG} \cdot i_c + L_{VSG} \cdot \frac{di_c}{dt} \quad (16)$$

$$\vec{e} - \vec{v}_{PAC} = R_{VSG} \cdot \vec{i}_{VSG} + L_{VSG} \cdot \frac{d\vec{i}_{VSG}}{dt} \quad (17)$$

onde $\vec{e} = [e_a \ e_b \ e_c]^T$ é a força eletromotriz (FEM) induzida nos enrolamentos do estator, $\vec{v}_{PAC} = [v_{PACa} \ v_{PACb} \ v_{PACc}]^T$ é a tensão no PAC, $\vec{i}_{VSG} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ é a corrente de referência do VSG, e R_{VSG} e L_{VSG} são a resistência e a indutância virtuais do estator, respectivamente.

A corrente de referência pode ser calculada no domínio de Laplace, como mostrado na Equação (18).

$$\vec{i}_{VSG}^*(s) = \frac{\vec{e}(s) - \vec{v}_{PAC}(s)}{R_{VSG} + L_{VSG} \cdot s} \quad (18)$$

A Figura 10 mostra o circuito de estator monofásico do modelo simplificado de máquina síncrona.

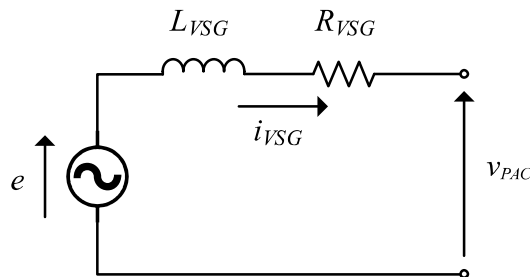


Figura 10 - Circuito de estator monofásico do modelo simplificado de máquina síncrona
Fonte: elaborada pelo autor

Se o controlador do VSG regula a tensão no ponto de acoplamento (v_{PAC}), a FEM induzida ajustável é dada pela Equação (19).

$$E_p = E^* + (V^* - V) \left(K_{pVVSG} + \frac{K_{iVVSG}}{s} \right) \quad (19)$$

onde E^* é a FEM induzida de referência, V^* é a tensão de regulação do PAC de referência, V é a tensão de saída do VSG e K_{pVVSG} e K_{iVVSG} são os ganhos proporcional e integral do controlador, respectivamente.

Caso o controlador do VSG controle o fluxo de potência reativa (Q) que o inversor injeta na rede, a FEM induzida ajustável é dada pela Equação (20).

$$E_p = E^* + (Q^* - Q) \left(K_{pQVSG} + \frac{K_{iQVSG}}{s} \right) \quad (20)$$

onde Q^* é a potência reativa de referência, K_{pQVSG} e K_{iQVSG} são os ganhos proporcional e integral do controlador, respectivamente.

As Equações (1) e (2), apresentadas anteriormente, também são usadas para representar as equações mecânicas no modelo simplificado do VSG.

A FEM induzida, nos eixos abc, é mostrada na Equação (21).

$$\vec{e} = E_p \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta - 2\pi/3) \\ \text{sen}(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (21)$$

A Figura 11 mostra o diagrama de blocos do controle VSG baseado no modelo simplificado do gerador síncrono.

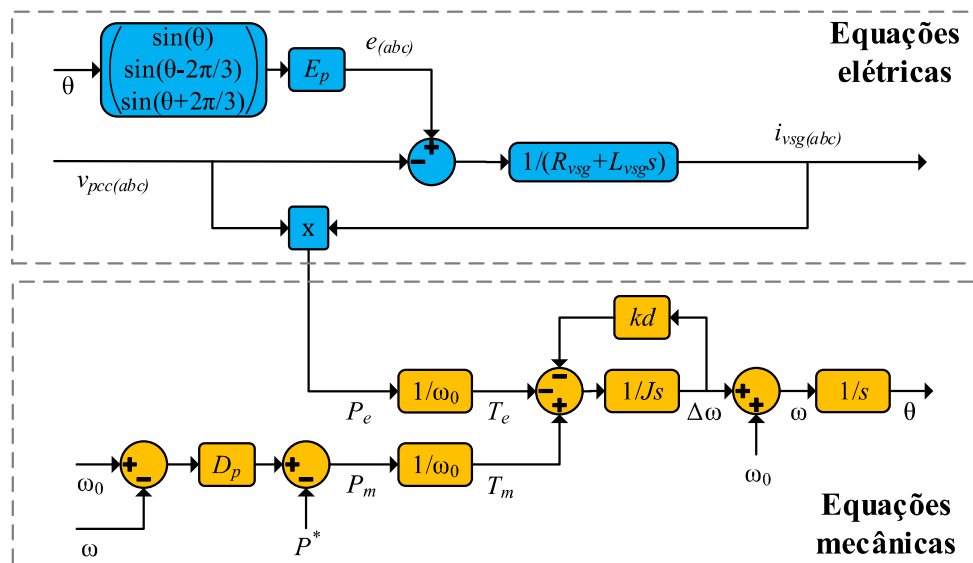


Figura 11 - Diagrama de blocos da estratégia de controle do VSG baseado no modelo simplificado do gerador síncrono

Fonte: elaborada pelo autor.

As simplificações do modelo trifásico da máquina resultam na falta das componentes transitórias e subtransitórias da corrente do estator (CHEN et al., 2011).

O desempenho do VISMA pode ser ajustado a partir da modificação dos parâmetros da máquina e este ajuste pode ser feito enquanto o processo está em execução. A variação dos parâmetros afeta diretamente a operação do inversor. Além do ruído de alta frequência devido

ao chaveamento do inversor, não há diferença entre uma máquina síncrona eletromecânica ou virtual do ponto de vista da rede elétrica (CHEN et al., 2011).

2.3 Influência da variação do momento virtual de inércia e do fator de amortecimento no comportamento do VSG

A fim de analisar o comportamento das variações dos parâmetros do VSG, nove simulações com diferentes valores de J e D foram realizadas. A Figura 12 mostra uma visão geral do sistema simulado. O sistema de distribuição consiste de gerador síncrono de 100 kVA, um alimentador de distribuição e uma carga resistiva trifásica equilibrada de 50 kW, que é conectada ao sistema através de um contator. A carga consiste de um conjunto de cargas lineares e não lineares. A fonte renovável de energia é emulada por uma fonte de tensão CC (V_{CC}) e é conectada à rede através de um inversor trifásico, que, por sua vez, é conectado ao sistema através de um filtro LCL (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2005). As chaves do inversor são IGBTs com diodos conectados em antiparalelo e a frequência de chaveamento é 10 kHz. Os resultados mostrados nesta seção foram simulados no *software* Typhoon HIL Control Center.

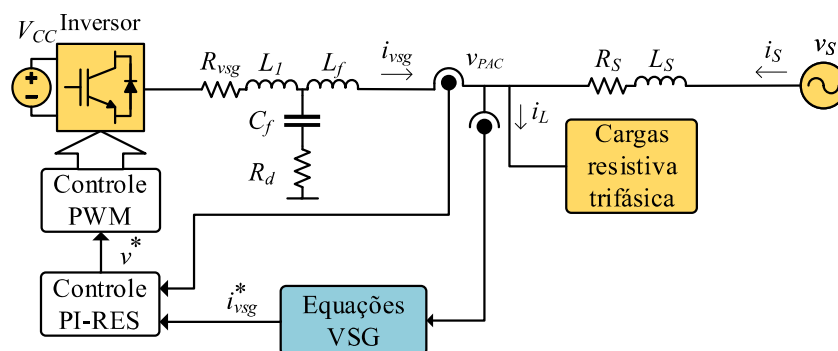


Figura 12 - Visão geral do sistema simulado
Fonte: elaborada pelo autor.

O controle da malha de corrente é feita com o uso de um controlador proporcional integral ressonante (PI-RES) (LISERRE; TEODORESCU; BLAABJERG, 2006). No controle PI-RES, o controlador PI é usado para obter erro nulo na frequência fundamental e o controle ressonante h -ésimo aprimora a resposta nas frequências harmônicas. A Equação (22) dá a função transferência do controlador PI-RES.

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) + \sum_h \frac{K_{rh} \cdot s}{s^2 + (h \cdot \omega)^2} \quad (22)$$

O controlador ressonante h -ésimo é um duplo integrador ativo em $h\omega$ e $-h\omega$. Usando uma referência de rotação em $n\omega$, este controlador é capaz de compensar $(n-h)$ -ésimo e $(n+h)$ -ésimo harmônicos.

Em cenários onde os 5°, 7°, 11° e 13° harmônicos precisam ser mitigados, um controlador ressonante sintonizado no 6° harmônico pode compensar a sequência-negativa do 5° harmônico e a sequência-positiva do 7° harmônico e outro controlador ressonante sintonizado no 12° harmônico pode compensar a sequência-negativa do 11° harmônico e a sequência-positiva do 13° harmônico.

Nesta seção, diferentes valores de momento virtual de inércia J e de fator de amortecimento mecânico D foram testados a fim de verificar suas influências nas potências ativa e reativa de saída do inversor, da tensão e da frequência no PAC. Os parâmetros do sistema são mostrados nas Tabela 3. A potência ativa de referência do controle VSG (P^*) é 20 kW e a tensão de regulação do PAC de referência (V_0) é 179.61 V.

Tabela 3 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG

Parâmetro	Valores
Tensão de linha do alimentador - RMS	220 V
Potência do gerador síncrono	100 kVA
Resistência do alimentador (R_S)	0,1 Ω
Indutância do alimentador (L_S)	0,6 mH
Resistência do VSG (R_{vsg})	0,05 Ω
Indutância do VSG ($L_{vsg} = L_1 + L_f$)	0,1613 mH
Tensão do elo CC (V_{DC})	500 V
Momento virtual de inércia (J)	0,05 / 0,3 / 0,6 / 1,2 kg.m ²
Fator de amortecimento (k_d)	5 / 7,5 / 10 / 20 / 40
Coefficiente <i>Droop</i> (D_p)	200

Fonte: elaborada pelo autor.

Os parâmetros utilizados para o projeto do filtro LCL, projetado de acordo com (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2005), e os ganhos do controlador PI-RES, determinados empiricamente, são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 4 - Especificação e parâmetros do filtro LCL

Parâmetro	Valor
Frequência de chaveamento (f_s)	10 kHz
Frequência nominal (f_n)	60 Hz
Potência nominal do inversor (P_n)	50 kW
Tensão de linha nominal (E)	220 V
<i>Ripple</i> de corrente (ΔI)	15 %
Potência reativa absorvida em condições nominais (x)	5 %
Indutância (L_l)	0,1397 mH
Indutância (L_f)	0,0216 mH
Capacitância (C_f)	137,01 μ F
Resistência (R_d)	0,75 Ω

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Ganhos do controlador PI-RES

Parâmetro	Valor
Constante de tempo integral (T_i)	0,0003
Ganho proporcional (K_p)	1
Ganho ressonante, $h=6$ (K_{r6})	100
Ganho ressonante, $h=12$ (K_{r12})	100

Fonte: elaborada pelo autor.

Na primeira simulação, o D é nulo e diferentes valores de J são testados. Em $t = 0$, a carga trifásica resistiva de 50 kW é conectada ao sistema. A Figura 13 mostra a potência ativa do inversor, a frequência da rede e da taxa de variação de frequência (ROCOF, do inglês *rate of change of frequency*) no PAC para diferentes valores de J . O ROCOF é dado pela Equação (23) (ALTAF et al., 2022).

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} = \frac{f(t) - f(t - T_s)}{T_s} \quad (23)$$

onde T_s é o tempo de amostragem. Nas simulações, o tempo de amostragem para o cálculo do ROCOF é 0,1 ms.

A Tabela 6 mostra o nadir de frequência para cada um dos valores de J .

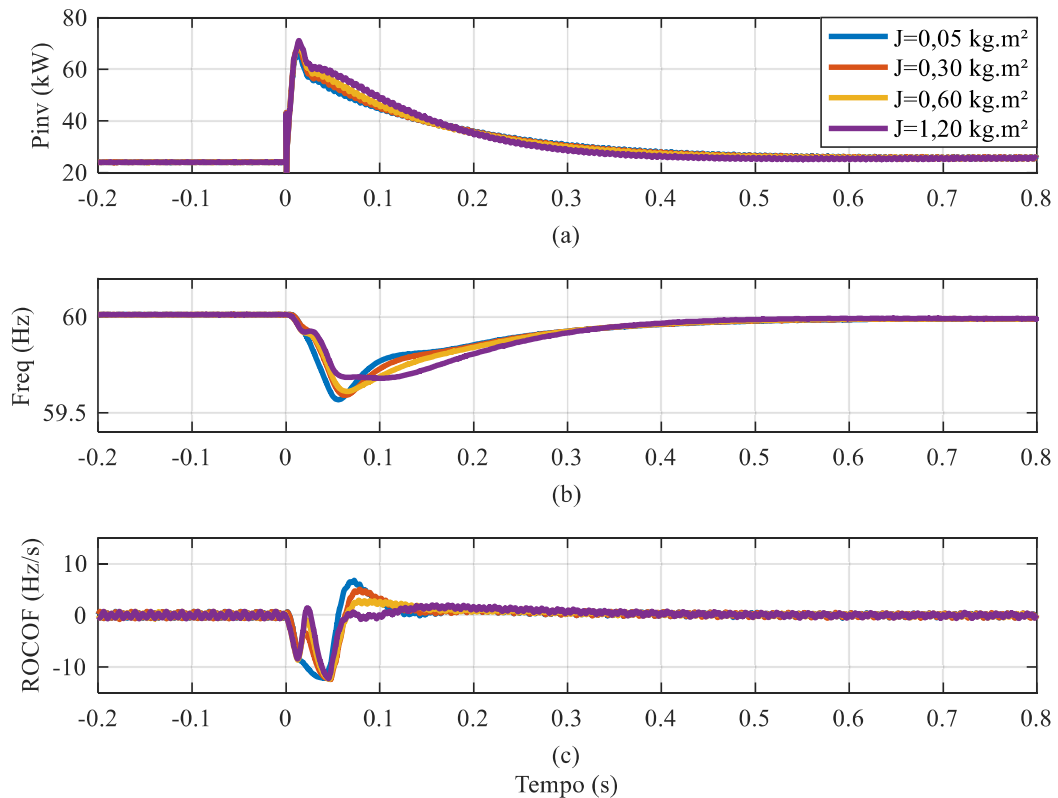


Figura 13 - Influência de J (a) na potência ativa e (b) na frequência e (c) no ROCOF
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Influência de J no nadir de frequência

J (kg.m ²)	Nadir de frequência (Hz)
0,05	59,57
0,30	59,59
0,60	59,61
1,20	59,68

Fonte: elaborada pelo autor

Um VSG com um momento virtual de inércia J maior fornece mais potência ativa para a rede, aumenta o tempo de acomodação da frequência, como visto na Figura 13, e aumenta o nadir de frequência, como mostrado na Tabela 6. A Figura 14 mostra o ROCOF médio calculado em uma janela de 0,1 s (IEEE STANDARD FOR INTERCONNECTION AND INTEROPERABILITY OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES WITH ASSOCIATED ELECTRIC POWER SYSTEMS INTERFACES, 2018) e a Tabela 7 mostra os valores mínimos e máximos do ROCOF médio.

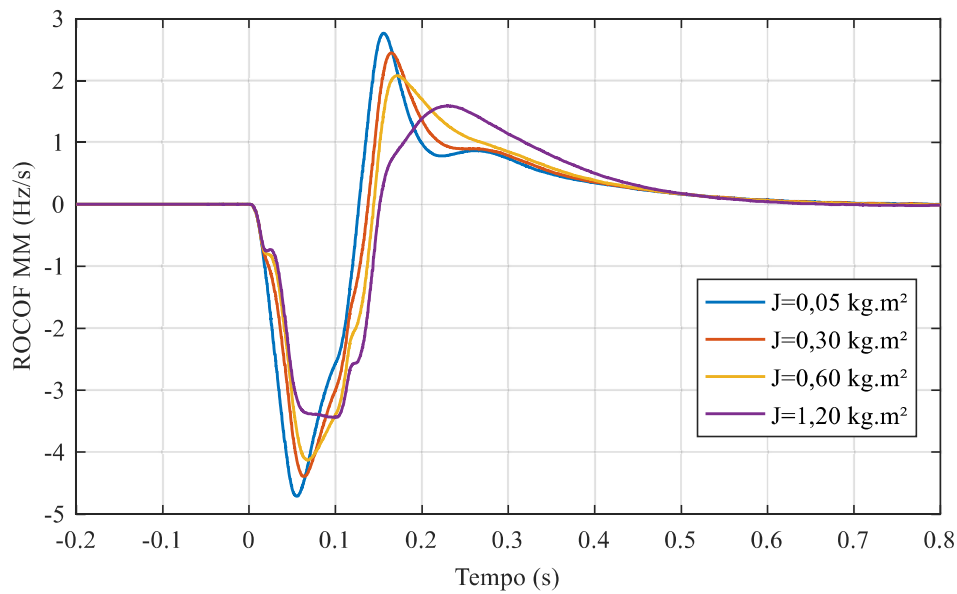


Figura 14 - Influência de J no ROCOF médio
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Influência de J nos ROCOFs médio mínimo e máximo

J (kg.m ²)	ROCOF médio (Hz/s)	
	Mín.	Máx.
0,05	-4,71	2,76
0,30	-4,39	2,45
0,60	-4,13	2,08
1,20	-3,44	1,59

Fonte: elaborada pelo autor.

Um VSG com um J maior pode diminuir os valores mínimo e máximo do ROCOF médio.

A influência da variação de D no comportamento do VSG também foi analisada. Neste cenário, o valor de J é constante e igual a 0,3 kg.m² e diferentes valores de D são testados. Assim, como na simulação anterior, em $t = 0$, a carga trifásica resistiva de 50 kW é conectada ao sistema. A Figura 15 mostra a potência ativa do inversor, a frequência da rede e o ROCOF no PAC para diferentes valores de D . A Tabela 8 mostra o nadir de frequência para cada um dos valores de D .

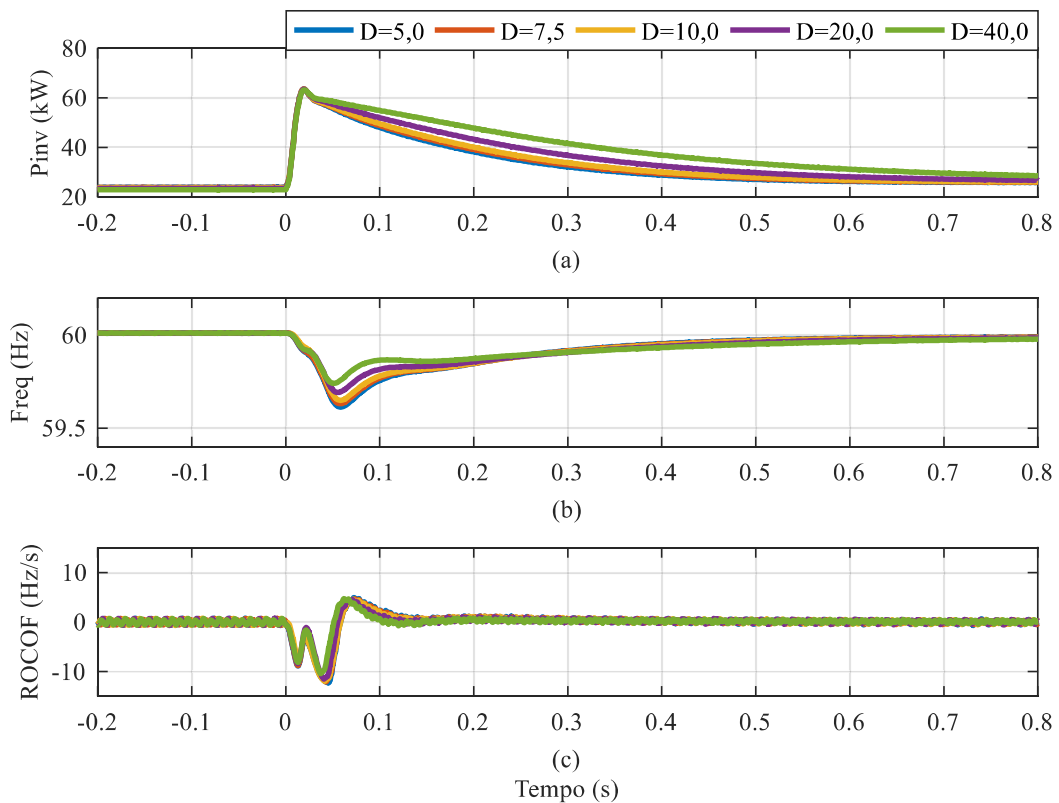


Figura 15 - Influência de D (a) na potência ativa e (b) na frequência e (c) no ROCOF
 Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8 - Influência de D no nadir de frequência

D	Nadir de frequência (Hz)
5,0	59,61
7,5	59,63
10,0	59,65
20,0	59,69
40,0	59,74

Fonte: elaborada pelo autor.

Como visualizado na Figura 15, um valor mais elevado de D amortece as oscilações pós-transitório da potência ativa do inversor, aumenta o tempo de acomodação da frequência da tensão no PAC. A Tabela 8 mostra o aumento do nadir de frequência para valores maiores de D .

A Figura 16 mostra o ROCOF médio calculado em uma janela de 0,1 s e a Tabela 9 mostra os valores mínimos e máximos do ROCOF médio.

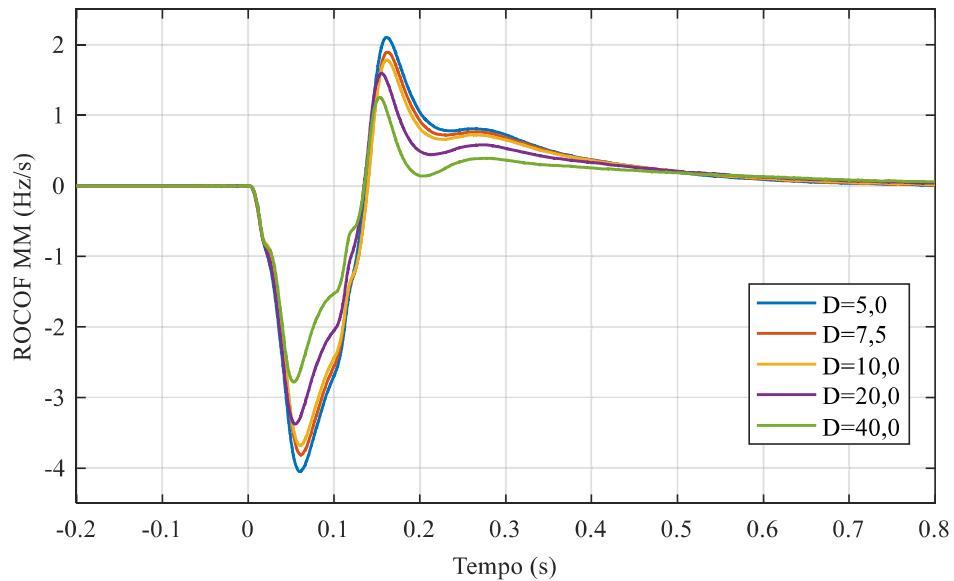


Figura 16 - Influência de D no ROCOF médio
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 9 - Influência de D nos ROCOFs médio mínimo e máximo

D	ROCOF médio (Hz/s)	
	Mín.	Máx.
5,0	-4,05	2,10
7,5	-3,81	1,89
10,0	-3,68	1,78
20,0	-3,38	1,59
40,0	-2,78	1,25

Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostrado na Tabela 9, o ROCOF médio apresenta uma redução mais acentuada à medida que o J do VSG aumenta.

2.4 Conclusões

Neste capítulo são apresentados o modelo completo de sétima ordem e um modelo simplificado de terceira ordem do VSG. Como um modelo completo de MS pode adicionar complexidade desnecessário ao controle se o intuito é emular as características mecânicas de uma máquina síncrona, algumas simplificações no modelo elétrico da MS podem ser feitas.

Para verificar a influência do momento de inércia virtual e do coeficiente de amortecimento no comportamento do VSG e na sua contribuição para o a frequência no PAC após o

transitório, emulado pela entrada de uma carga trifásica resistiva de 50 kW, foram feitos dois conjuntos de simulações, em que os valores distintos dos dois parâmetros são testados

Como mostrado nas simulações desta seção, a escolha de valores adequados de J e D podem melhorar o nadir de frequência e o ROCOF da frequência da tensão no PAC e diminuir o tempo de acomodação da frequência da tensão no PAC o transitório.

3 DETECÇÃO HARMÔNICA BASEADA NA TEORIA P-Q

A fim de compensar as tensões ou correntes harmônicas indesejadas presentes em um sistema elétrico, é necessário o uso de circuitos de detecção de harmônicos para que seja possível a identificação dos sinais harmônicos indesejados a serem compensados por um filtro ativo. Dentre as estratégias usadas para a detecção de sinais harmônicos, pode-se destacar as estratégias baseadas na Teoria da potência instantânea (Teoria $p-q$) (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

As três estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ são simuladas e comparadas em cenários sem e com harmônicos de tensão na fonte de tensão do sistema e os prós e contras de cada estratégia de detecção harmônica são destacados. A combinação das estratégias de detecção harmônica com o controle VSG são comparadas com a combinação das estratégias de detecção harmônica com controle PQ e, assim, a contribuição do controle VSG para a melhoria do nadir de frequência e do ROCOF é evidenciada nos resultados das simulações.

3.1 Teoria da potência instantânea – Teoria $p-q$

A Teoria $p-q$ é baseada em um conjunto de potências instantâneas definidas no domínio do tempo e pode ser usada em sistemas trifásicos com ou sem condutor neutro para tensões e correntes trifásicas genéricas. Deste modo, além de ser válida para o estado estacionário, ela também é válida para o estado transitório. Esta teoria é bastante eficiente e flexível no projeto de controladores para condicionadores de potência baseados em eletrônica de potência.

A Teoria $p-q$ geralmente usa a transformada $\alpha\beta 0$, também conhecida como transformada de Clarke, que consiste de uma matriz que transforma tensões e correntes trifásicas nos referenciais estacionários $\alpha\beta 0$ (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

3.1.1 Transformada de Clarke

A transformada de Clarke mapeia as tensões trifásicas instantâneas nas fases abc (v_a , v_b e v_c) em tensões instantâneas nos eixos $\alpha\beta 0$ (v_α , v_β e v_0). A transformada de Clarke e sua inversa de

tensões trifásicas genéricas são dadas pelas Equações (24) e (25) (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (25)$$

De maneira similar, a transformada de Clarke e sua inversa de correntes trifásicas genéricas instantâneas (i_a , i_b e i_c) são dadas pelas Equações (26) e (27).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

onde i_α , i_β e i_0 são as correntes instantâneas nos eixos $\alpha\beta 0$.

Uma vantagem do uso da transformada de Clarke é a separação da componente de sequência-zero das componentes das fases abc . Os eixos α e β não contribuem para as componentes de sequência-zero. Em um sistema trifásico a quatro fios, caso as tensões trifásicas sejam equilibradas, a tensão de sequência-zero v_0 pode ser eliminada da Equações (21) e (22), visto que nesse sistema não há tensão de sequência-zero. Em sistemas trifásicos a três fios, a corrente de sequência-zero i_0 pode ser eliminada da Equações (23) e (24), já que nestes

sistemas não há corrente de sequência-zero. Entretanto, quando as componentes de corrente e de tensão de sequência-zero estão presentes no sistema, a transformada completa deve ser utilizada (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

Se v_0 é eliminada das Equações (24) e (25), a transformada de Clarke é dada pelas Equações (25) e (26).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (29)$$

Simplificações similares podem ser feitas nas matrizes de transformação das correntes, como é mostrado nas Equações (30) e (31) (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (31)$$

Os valores instantâneos das tensões e correntes referenciadas nos eixos abc são transformadas em valores nos eixos $\alpha\beta$, ou vice-versa. Os eixos a , b e c são defasados em 120° entre si, enquanto os eixos α e β são ortogonais, e o eixo α é paralelo ao eixo a .

3.1.2 As potências instantâneas na Teoria p - q

Três potências instantâneas são calculadas a partir das tensões de fase e das correntes de linha nos eixos $\alpha\beta 0$: a potência de sequência-zero instantânea p_0 , a potência real instantânea p e a potência imaginária instantânea q . O termo potência reativa instantânea em sistemas trifásicos

é usado como um sinônimo de potência imaginária. Estas potências são definidas na Equação (32) (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (32)$$

Em sistemas trifásicos a três fios, somente as potências instantâneas definidas nos eixos $\alpha\beta$ existem, visto que nestes sistemas $i_0 = 0$.

A potência real instantânea p representa o fluxo de energia total instantâneo por unidade de tempo e a potência imaginária instantânea q representa a energia trocada entre as fases do sistema, que não contribui para a transferência de energia entre dois subsistemas (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

As potências p , q e p_0 definidas na Teoria p - q podem ser separadas em parcelas de valor constante \bar{p} , \bar{q} e \bar{p}_0 e em parcelas oscilantes \tilde{p} , \tilde{q} e \tilde{p}_0 . As Equações (33), (34) e (35) mostram as composições das potências p , q e p_0 a partir das respectivas potências constantes e oscilantes (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (33)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (34)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (35)$$

Todas as componentes harmônicas em tensão e corrente podem contribuir para as potências constantes \bar{p} e \bar{q} desde que elas tenham a mesma frequência e a mesma sequência (positiva ou negativa). A presença de dois ou mais harmônicos de frequência e/ou componentes de sequência produzem potências oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

3.2 Detecção harmônica baseada na Teoria p - q

A detecção de correntes harmônicas é uma aplicação importante da Teoria p - q . Neste trabalho, três controladores baseados na Teoria p - q foram utilizados a fim de mitigar as correntes e as tensões em um alimentador. A Figura 17 mostra um filtro ativo conectado a um sistema e as medições necessárias para implementar os controladores de detecção harmônicos.

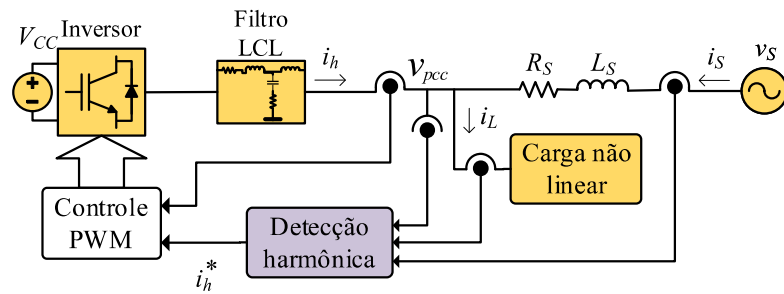


Figura 17 - Configuração básica de um filtro ativo paralelo
Fonte: elaborada pelo autor.

A estratégia de controle 1 (EC1) mede as correntes de carga ($i_{L(abc)}$) e $v_{PAC(abc)}$ para compensar as correntes harmônicas de uma carga específica. A estratégia de controle 2 (EC2) mede as correntes do alimentador ($i_{S(abc)}$) e $v_{PAC(abc)}$ para mitigar as correntes harmônicas de um alimentador específico. A estratégia de controle 3 (EC3) é baseada na detecção de tensões harmônicas e mede somente $v_{PAC(abc)}$ a fim de mitigar as tensões harmônicas neste ponto. Nos três controles apresentados a seguir, as tensões e correntes instantâneas medidas nos eixos abc são transformadas em tensões e correntes instantâneas nos eixos $\alpha\beta 0$.

Em EC1 (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007), um DSOGI-FLL extrai as componentes fundamentais de sequência-positiva $v'_{(\alpha\beta 0)}$ de $v_{PAC(\alpha\beta 0)}$. A corrente de carga $i_{L(\alpha\beta 0)}$ e $v'_{(\alpha\beta 0)}$ são usadas no bloco cálculo de potências instantâneas para calcular as potências ativas e imaginárias instantâneas, p e q , respectivamente. Filtros passa-baixa (FPB) são usados para extrair as parcelas constantes \bar{p} e \bar{q} das potências p e q , respectivamente. Como o controlador projetado deve compensar somente as correntes harmônicas presentes em $i_{L(\alpha\beta 0)}$, as parcelas oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} das potências p e q , respectivamente, são usadas no bloco cálculo das correntes $\alpha\beta 0$, junto com $v'_{(\alpha\beta 0)}$, para calcular as correntes de compensação de referência ($i_{h(\alpha\beta 0)}^*$). A transformada inversa de Clarke é usada para transformar as correntes de referência em $\alpha\beta 0$ em correntes de referência em abc ($i_{h(abc)}^*$). A Figura 18 mostra o diagrama de blocos de EC1.

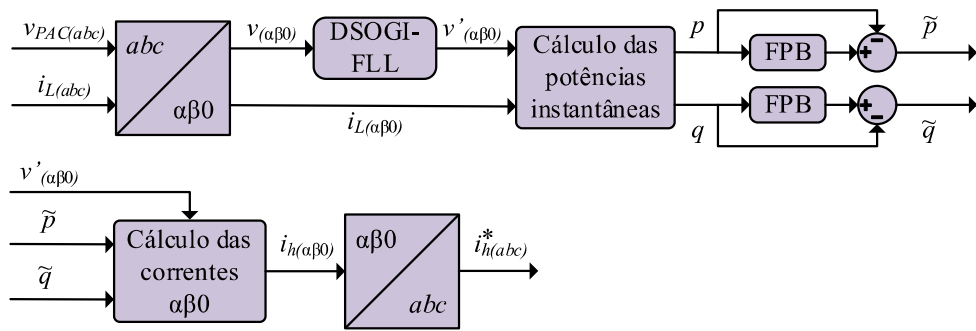


Figura 18 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC1
Fonte: elaborada pelo autor.

Em EC2, baseado em (MONTEIRO; ENCARNAÇÃO; AREDES, 2010), um DSOGI-FLL também é utilizado para extrair as componentes fundamentais de sequência-positiva $v'_{(\alpha\beta)}$ de $v_{PAC(\alpha\beta)}$. A corrente do alimentador $i_{S(\alpha\beta)}$ e $v'_{(\alpha\beta)}$ são as entradas usadas para calcular as potências p e q no bloco cálculo das potências instantâneas. Como a proposta desse filtro é mitigar a presença dos harmônicos presentes em um determinado alimentador, a estratégia de controle deve compensar as parcelas oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} das potências instantâneas p e q , que são extraídas com o auxílio de FPB. Controladores PI são utilizados para determinar dinamicamente as potências ativa e reativa de referência, p_h^* e q_h^* , respectivamente. Os ganhos proporcional e integral destes controladores PI são K_{pPQ} e K_{iPQ} , respectivamente. As potências ativa e reativa de referência, p_h^* e q_h^* e $v'_{(\alpha\beta)}$ são usadas no bloco cálculo das correntes $\alpha\beta$ para calcular as correntes de compensação de referência ($i_{h(\alpha\beta)}^*$). A transformada inversa de Clarke é usada para transformar as correntes de referência em $\alpha\beta$ em correntes de referência em abc ($i_{h(abc)}^*$). A Figura 19 mostra o diagrama de blocos de EC2.

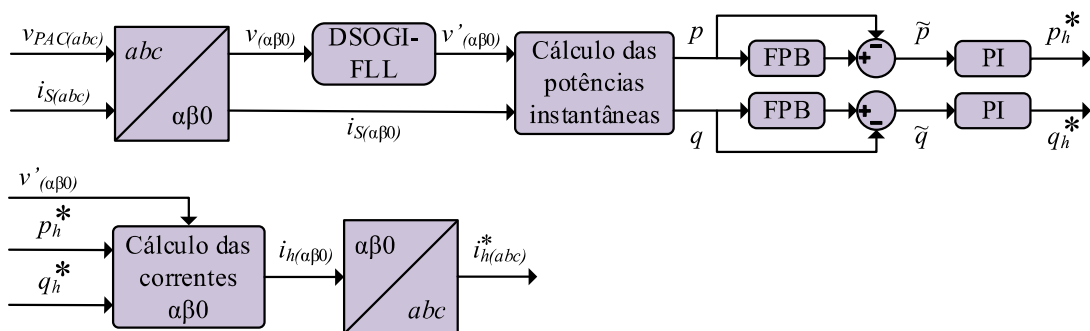


Figura 19 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC2
Fonte: elaborada pelo autor.

Em EC3 (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007), o controlador precisa de medir somente $v_{PAC(\alpha\beta)}$ para determinar a corrente de compensação de referência. Como somente tensões

são entradas desse controlador, as componentes fundamentais de sequência-positiva de $v_{PAC(\alpha\beta 0)}$ são usadas como correntes auxiliares $i'_{(\alpha\beta 0)}$, de modo que seja possível calcular as potências instantâneas p e q . As potências oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} são extraídas com o auxílio de FPB. As potências oscilantes, juntamente com $i'_{(\alpha\beta 0)}$, são usadas para determinar as tensões harmônicas $v_{h(\alpha\beta 0)}$. Essas tensões harmônicas não possuem uma componente fundamental de sequência-positiva. A transformada inversa de Clarke é usada para calcular as tensões harmônicas nos eixos abc ($v_{h(abc)}$) e a corrente harmônica de compensação de referência é dada pela Equação (36).

$$i_{h(abc)}^* = K_v \cdot v_{h(abc)} \quad (36)$$

onde K_v é o ganho do controlador do filtro ativo. A Figura 20 mostra o diagrama de blocos de EC3.

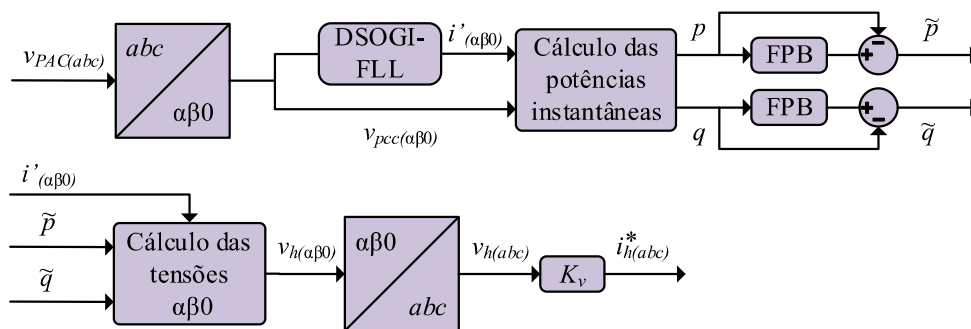


Figura 20 - Diagrama de blocos da estratégia de controle EC3

Fonte: elaborada pelo autor.

Em EC1, o controlador é projetado para mitigar correntes harmônicas de um barramento alimentador a partir de medições das tensões no PAC e das correntes de uma carga específica. Em um cenário com fluxo de potência reverso, este controlador passaria a medir as correntes de um barramento alimentador ao invés das correntes de uma carga. Assim, este controlador equivocadamente detectaria as correntes harmônicas do barramento alimentador e tentaria mitigar as correntes harmônicas da carga. Em EC2, o controlador tenta mitigar as correntes harmônicas de um barramento alimentador a partir de medições das tensões no PAC e das correntes de um alimentador específico. Em um cenário de fluxo reverso, este controlador tentaria compensar as correntes harmônicas do barramento de carga e tentaria reduzir os harmônicos da carga. Portanto, em EC1 e EC2, é necessário conhecer o fluxo de potência no barramento para que essas estratégias de controle funcionem adequadamente. Como EC3 não

mede correntes a fim de determinar as correntes harmônicas de referência, esta estratégia de controle é imune a variações no fluxo de potência.

Em cenários em que a fonte de tensão do sistema não possui harmônicos, as estratégias EC1, EC2 e EC3 são capazes de mitigar simultaneamente os harmônicos de corrente e de tensão presentes no sistema. Em cenários em que a fonte de tensão do sistema possui harmônicos de tensão além da componente fundamental, as três estratégias de compensação apresentam limitações. EC1 e EC2, que são projetadas para compensar harmônicos de corrente, são capazes de mitigar os harmônicos de corrente satisfatoriamente, mas não conseguem amortecer de maneira tão eficaz os harmônicos de tensão no PAC. EC3, que é projetada para amortecer os harmônicos de tensão no sistema, consegue mitigar os harmônicos de tensão no PAC satisfatoriamente, mas não compensa os harmônicos de corrente de modo tão eficaz.

3.3 Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ e comparação das combinações de estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$ com controles VSG e PQ

Simulações foram realizadas a fim de analisar o desempenho e limitações das estratégias de detecção harmônica e de comparar os controles de potência ativa e reativa VSG e PQ. Nesta seção, o sistema de distribuição consiste de uma fonte de tensão ideal e um alimentador de distribuição. As cargas são modeladas como fontes de correntes controladas e seu conteúdo harmônico é mostrado no Apêndice C. A fonte renovável de energia é emulada por uma fonte de tensão CC (V_{CC}) e é conectada à rede através de um inversor trifásico, que, por sua vez, é conectado ao sistema através de um filtro LCL. As chaves do inversor são IGBTs com diodos conectados em antiparalelo e a frequência de chaveamento é 10 kHz. O controle da malha de corrente é feito com o uso de um controlador proporcional integral ressonante (PI-RES).

3.3.1 Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$

A Figura 21 mostra uma visão geral do sistema simulado nesta seção.

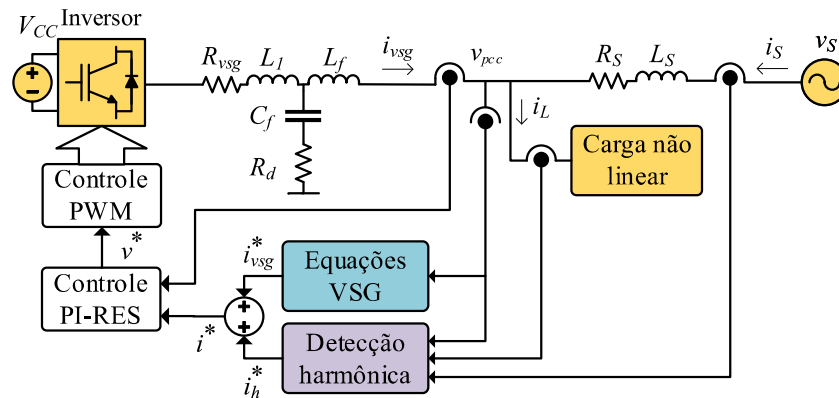


Figura 21 - Visão geral do sistema simulado
Fonte: elaborada pelo autor.

Nos resultados apresentados nesta seção, os algoritmos apresentados foram embarcados em uma bancada de simulação em tempo real usando um ambiente *software-in-the-loop* (SIL). Um módulo HIL402, desenvolvido pela Typhoon HIL, é responsável pela simulação em tempo real do estágio de potência e do controle do sistema. O estágio de potência foi criado usando o Schematic Editor disponível no *software* Typhoon HIL Control Center e os controles de potência VSG e de detecção harmônica foram implementados em linguagem C. A supervisão e o controle do sistema são feitos através da plataforma Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), também disponível no Typhoon HIL Control Center. Algumas figuras mostradas nessa seção foram capturadas com o uso de um osciloscópio, que é conectado ao HIL402 através de uma *breakout board*. A Figura 22 mostra o diagrama de blocos da bancada usada neste trabalho.



Figura 22 - Bancada baseada no módulo HIL402
Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta seção, o desempenho das combinações do controlador VSG com os circuitos de detecção harmônica são analisados. Os controladores propostos foram simulados em dois cenários. No cenário 1 (C1), o barramento infinito de tensão não possui harmônicos. No cenário 2 (C2), a fonte de tensão tem um harmônico de 0,04 pu. Esta tensão harmônica é inserida na fonte ideal de tensão para representar a distorção harmônica presente no sistema devido a circulação de correntes harmônicas nos alimentadores. C2 é necessário para avaliar o

desempenho dos controladores propostos em redes com o perfil de tensão com distorção harmônica.

Os parâmetros do sistema de distribuição e do VSG são mostrados na Tabela 10 e as potências ativa e reativa e a DHT da carga são mostradas na Tabela 11.

Tabela 10 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG

Parâmetros	Valores
Tensão de linha do alimentador	220 V
Resistência do alimentador (R_s)	0,1 Ω
Indutância do alimentador (L_s)	0,6 mH
Tensão do elo CC (V_{CC})	500 V
Resistência do VSG (R_{vsg})	0,05 Ω
Indutância do VSG ($L_{vsg} = L_1 + L_f$)	0,1613 mH
Momento de inércia virtual (J)	0,3 kg.m ²
Coefficiente de amortecimento (D)	20

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 11 - Potências ativa e reativa e DHT da carga

Parâmetros	Cenários	
	C1	C2
Potência ativa (kW)	18,60	18,68
Potência reativa (kVAR)	5,26	5,28
I_{La} - DHT (%)	12,68	11,63
I_{Lb} - DHT (%)	11,45	9,28
I_{Lc} - DHT (%)	11,52	8,07

Fonte: elaborada pelo autor.

Os parâmetros utilizados para o projeto do filtro LCL são mostrados na Tabela 4 e os ganhos do controlador PI-RES, determinados empiricamente, são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Ganhos dos controladores

Parâmetros	Estratégia de controle		
	EC1	EC2	EC3
Ganho proporcional (K_p)	2,0	0,5	0,25
Ganho integral (K_i)	250	250	50
Ganho ressonante (K_r)	250	250	250
Ganho proporcional de EC2 (K_{pPO})	-	4,0	-
Ganho integral de EC2 (K_{iPO})	-	50	-
Ganho de tensão de EC3 (K_v)	-	-	3,5

Fonte: elaborada pelo autor.

O controlador VSG determina a componente de sequência-positiva da corrente na frequência fundamental, enquanto o controlador de detecção harmônica determina as correntes harmônicas de compensação. Nos controladores EC1 e EC2, o controlador de detecção harmônica também é responsável pela detecção e compensação das sequências negativa e zero da componente fundamental.

As Figuras 23 e 24 mostram a corrente do alimentador e a tensão do PAC, respectivamente, antes e após a compensação, usando as estratégias de controle EC1, EC2 e EC3, no cenário C1. O conteúdo harmônico das correntes do alimentador é mostrado na Tabela 13 e o conteúdo harmônico das tensões no PAC é mostrado na Tabela 14. Nas simulações desta seção, a distorção harmônica total (DHT) é calculada por um bloco do Typhoon HIL Control Center e são usados harmônicos até a 83ª ordem para o cálculo do DHT.

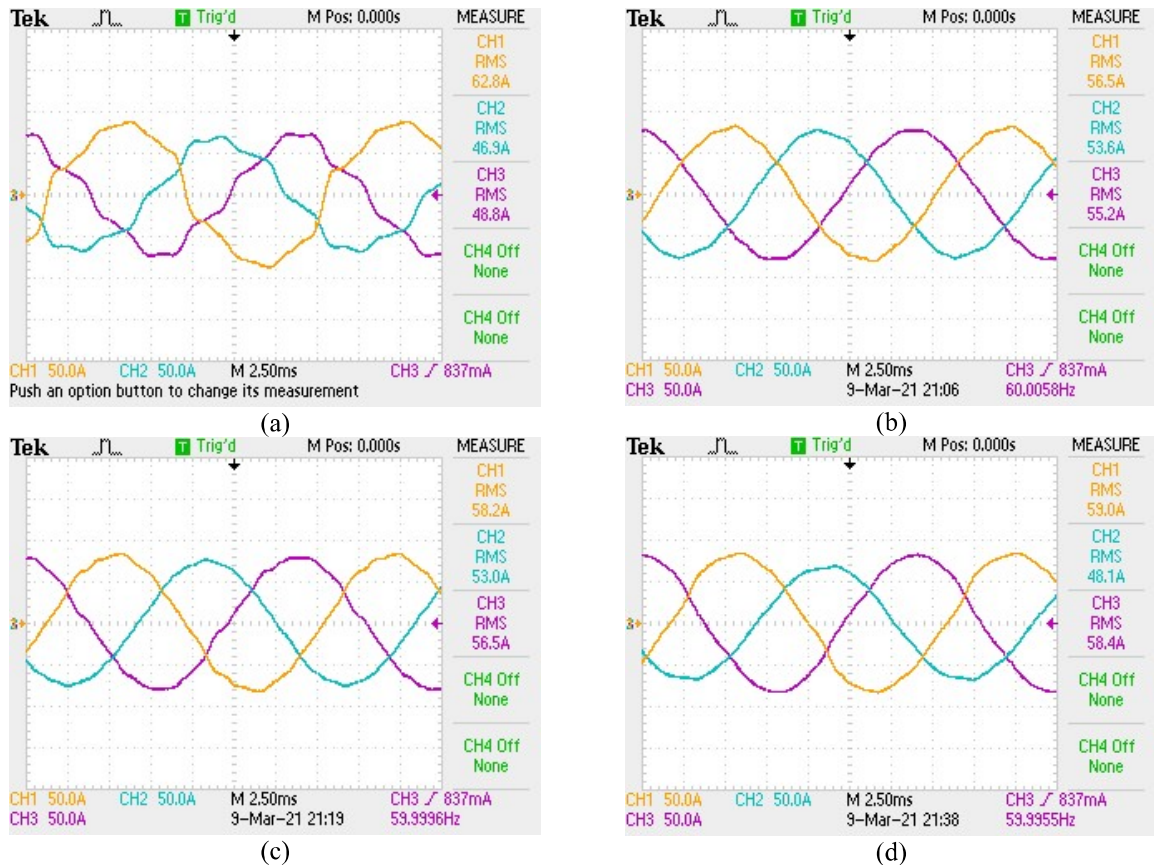


Figura 23 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C1

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 13 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (A)	87,3	66,74	66,87	79,13	76,20	78,20	81,09	75,03	78,06	82,78	68,52	82,54
3 (A)	5,99	3,02	2,98	0,64	1,03	0,74	0,63	0,23	0,83	2,41	0,63	2,05
5 (A)	5,98	4,49	4,38	0,69	0,93	0,50	1,16	0,31	0,99	1,68	0,40	1,51
7 (A)	5,98	4,72	4,72	0,73	0,52	0,49	1,11	0,78	1,09	2,03	1,08	1,09
9 (A)	1,94	1,06	0,95	0,23	0,96	0,62	0,15	0,64	0,75	0,42	0,07	0,32
11 (A)	2,96	2,23	2,07	1,27	0,68	0,84	1,32	0,46	1,29	0,69	0,13	0,39
13 (A)	1,76	1,52	1,47	0,34	0,61	0,56	0,34	0,72	0,86	0,48	0,26	0,49
DHT (%)	12,68	11,45	11,52	2,68	2,58	2,11	2,67	1,76	3,24	4,20	2,74	3,32

Fonte: elaborada pelo autor.

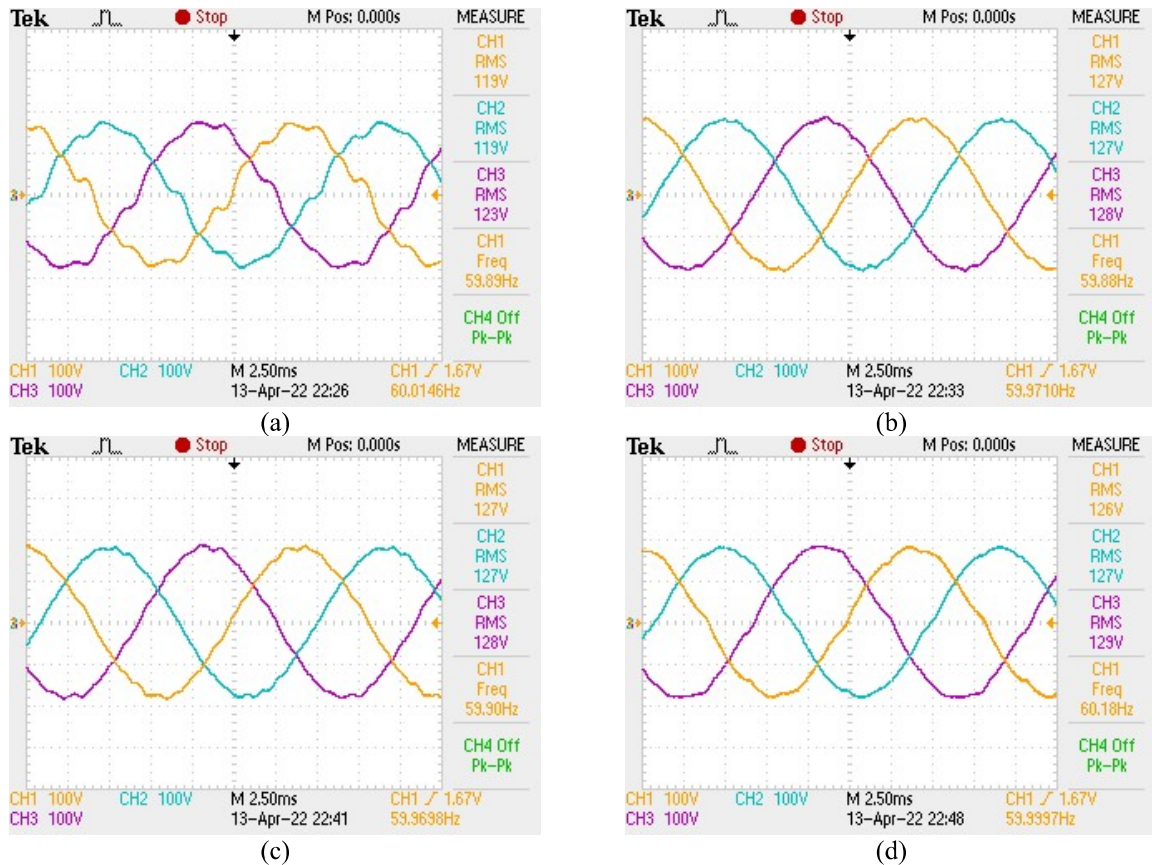


Figura 24 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C1

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 14 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (V)	164,1	166,1	170,6	179,5	180,0	180,5	179,2	179,8	180,8	177,9	180,0	182,1
3 (V)	4,44	1,16	3,28	0,92	1,61	0,96	0,10	0,93	1,05	1,10	0,81	1,66
5 (V)	7,05	4,74	5,90	0,96	1,78	1,35	1,10	0,84	2,02	1,89	1,39	2,52
7 (V)	9,28	6,57	6,64	0,81	1,92	1,17	1,20	0,82	1,93	2,58	1,37	1,37
9 (V)	4,02	1,69	2,39	0,67	1,53	0,87	0,63	1,13	1,81	0,43	0,97	1,20
11 (V)	6,40	4,66	5,30	3,03	0,50	2,75	2,92	1,29	4,38	1,24	1,00	1,48
13 (V)	4,46	2,74	2,68	0,63	0,91	0,90	1,20	1,26	2,72	1,04	0,81	1,16
DHT (%)	9,31	6,37	6,30	2,25	2,15	1,97	2,56	2,17	3,51	2,66	1,71	1,74

Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 14, o controlador VSG consegue regular tensão no PAC em um valor próximo da referência definida no projeto, $V^* = 179.61$ V.

A Tabela 15 mostra a redução percentual da DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C1.

Tabela 15 - Redução percentual da DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C1

Grandeza	EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
I_S	78,9%	77,5%	81,7%	78,9%	84,6%	71,9%	66,9%	76,1%	71,6%
V_{PAC}	75,8%	66,2%	68,7%	72,5%	65,9%	44,3%	71,4%	73,2%	72,4%

Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 15, todos os controladores propostos conseguem mitigar de maneira satisfatória os harmônicos presentes na corrente do alimentador e na tensão no PAC.

No cenário C1, as distorções harmônicas individuais (DHI) e total da corrente do alimentador antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias EC1, EC2 e EC3, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 (IEEE STANDARD FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS, 2022) são mostradas na Tabela 16.

Tabela 16 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3			IEEE 519
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
3 (%)	6,9	4,5	4,5	0,8	1,4	0,9	0,8	0,3	1,1	2,9	0,9	2,5	4,0
5 (%)	6,8	6,7	6,6	0,9	1,2	0,6	1,4	0,4	1,3	2,0	0,6	1,8	4,0
7 (%)	6,8	7,1	7,1	0,9	0,7	0,6	1,4	1,0	1,4	2,5	1,6	1,3	4,0
9 (%)	2,2	1,6	1,4	0,3	1,3	0,8	0,2	0,9	1,0	0,5	0,1	0,4	4,0
11 (%)	3,4	3,3	3,1	1,6	0,9	1,1	1,6	0,6	1,7	0,8	0,2	0,5	2,0
13 (%)	2,0	2,3	2,2	0,4	0,8	0,7	0,4	1,0	1,1	0,6	0,4	0,6	2,0
DHT (%)	12,7	11,5	11,5	2,7	2,6	2,1	2,7	1,8	3,2	4,2	2,7	3,3	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, com exceção do 9º harmônico de corrente, as demais distorções harmônicas individuais e totais estavam acima do limite proposto pela norma IEEE 519-2022. Com o uso das estratégias de detecção e compensação de harmônicos propostas na Teoria $p-q$, as DHIs e a DHT ficam dentro dos limites propostos em todas as ordens harmônicas mostradas na Tabela 16.

As DHIs e a DHT da tensão do PAC antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias EC1, EC2 e EC3, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 17.

Tabela 17 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C1 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3			IEEE 519
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
3 (%)	2,7	0,7	1,9	0,5	0,9	0,5	0,1	0,5	0,6	0,6	0,5	0,9	5,0
5 (%)	4,3	2,9	3,5	0,5	1,0	0,7	0,6	0,5	1,1	1,1	0,8	1,4	5,0
7 (%)	5,7	4,0	3,9	0,5	1,1	0,6	0,7	0,5	1,1	1,5	0,8	0,8	5,0
9 (%)	2,4	1,0	1,4	0,4	0,9	0,5	0,4	0,6	1,0	0,2	0,5	0,7	5,0
11 (%)	3,9	2,8	3,1	1,7	0,3	1,5	1,6	0,7	2,4	0,7	0,6	0,8	5,0
13 (%)	2,7	1,6	1,6	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	1,5	0,6	0,5	0,6	5,0
DHT (%)	9,3	6,4	6,3	2,3	2,2	2,0	2,6	2,2	3,5	2,7	1,7	1,7	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C1, em que a fonte de tensão do sistema não possui harmônicos, somente a DHI de 7ª ordem da fase *a* e a DHT da fase *a* estavam acima do limite antes da compensação. Após a compensação, todos os valores de tensão ficaram dentro dos limites da norma.

As Figuras 25 e 26 mostram a corrente do alimentador e a tensão do PAC, respectivamente, antes e após a compensação, usando as estratégias de controle EC1, EC2 e EC3, no cenário C2. O conteúdo harmônico das correntes do alimentador é mostrado na Tabela 18 e o conteúdo harmônico das tensões no PAC é mostrado na Tabela 19.

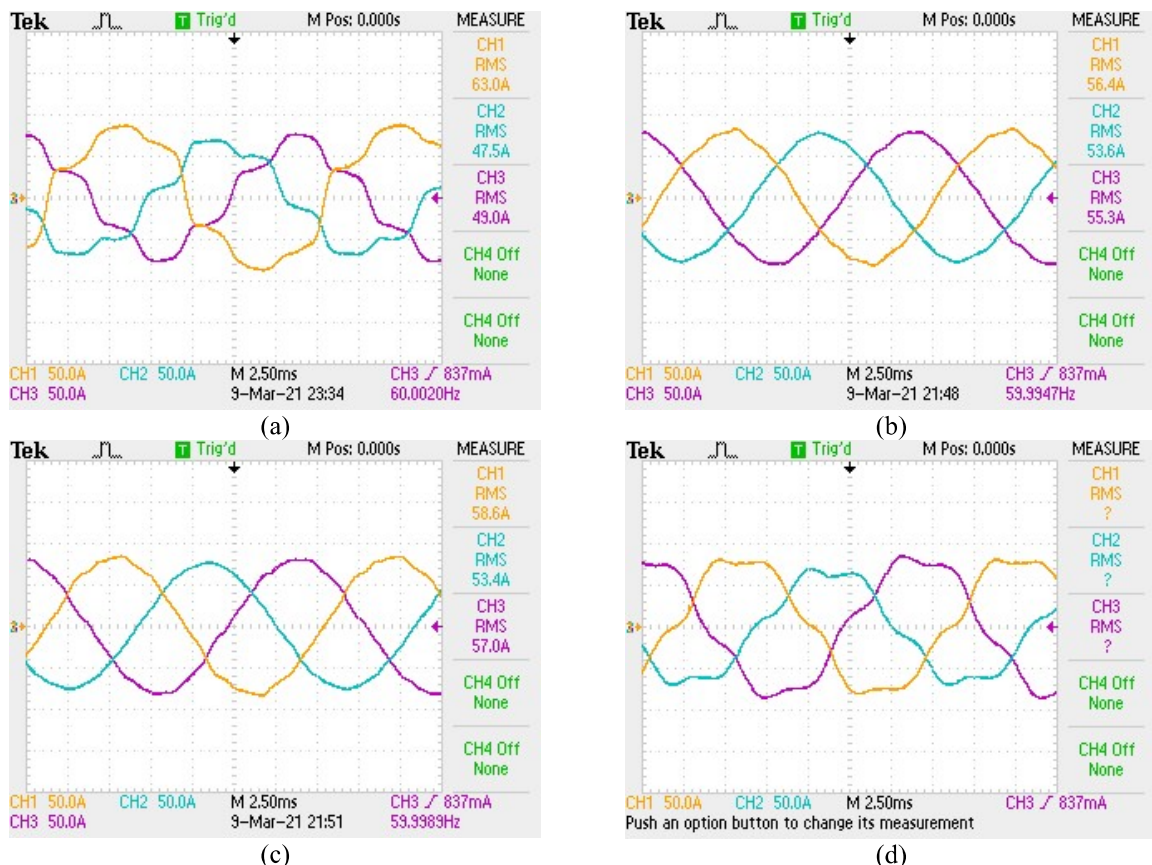


Figura 25 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 18 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (A)	87,22	66,49	67,69	79,18	76,28	78,4	82,44	75,62	79,98	82,29	68,94	84,03
3 (A)	6,63	2,60	4,04	0,83	1,00	0,68	0,93	0,24	1,05	2,46	0,71	1,65
5 (A)	10,50	8,81	9,54	1,51	1,25	0,73	1,08	0,41	0,88	8,42	7,97	9,03
7 (A)	6,43	5,22	3,99	0,82	0,51	0,46	1,64	0,86	1,18	1,83	0,97	1,12
9 (A)	1,83	1,27	0,69	0,27	0,93	0,53	0,31	0,84	0,65	0,38	0,12	0,36
11 (A)	2,25	1,86	1,83	1,21	0,57	0,79	1,59	0,41	1,24	0,42	0,18	0,43
13 (A)	1,50	1,42	0,61	0,46	0,63	0,63	0,26	0,43	0,60	0,45	0,23	0,41
DHT (%)	16,58	16,05	16,55	3,39	2,60	2,30	3,21	1,74	3,12	10,91	12,11	10,93

Fonte: elaborada pelo autor.

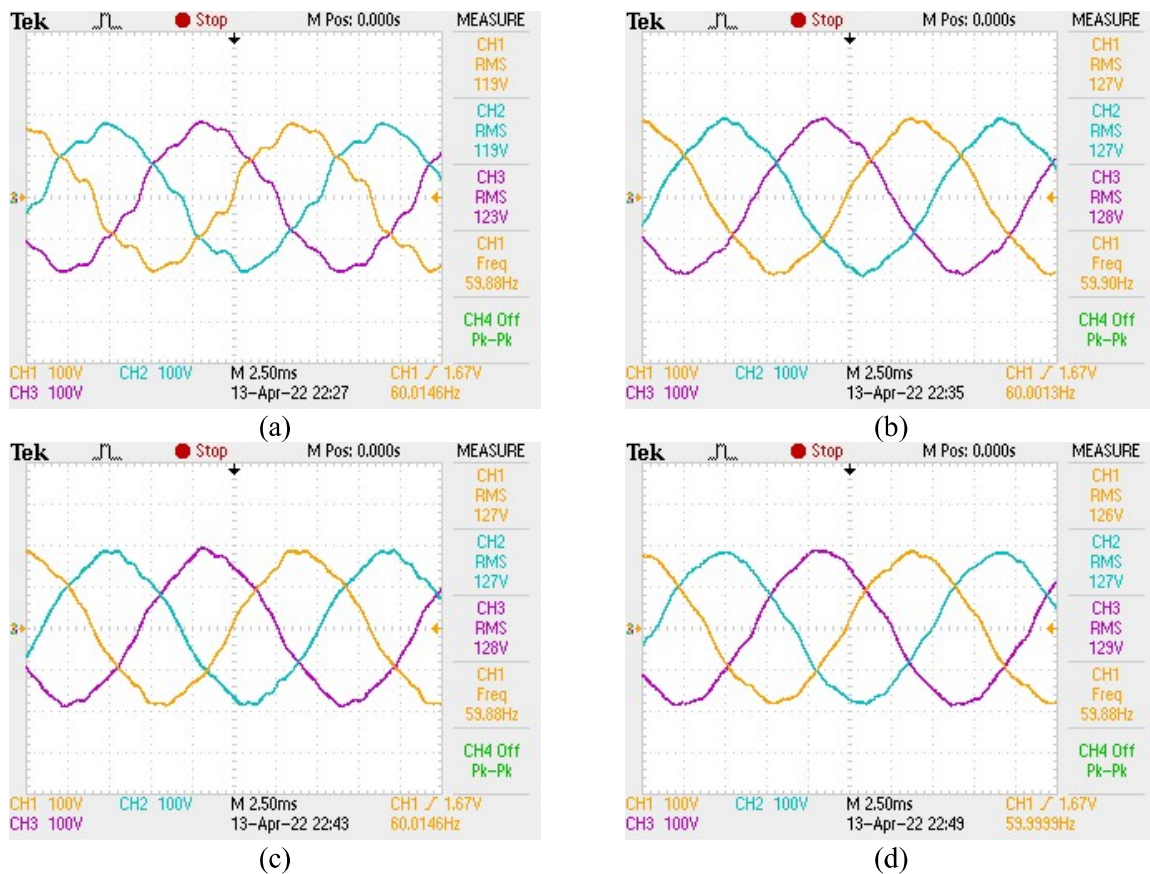


Figura 26 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle EC1, (c) EC2 e (d) EC3 em C2

Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 19, o controlador VSG consegue regular tensão no PAC em um valor próximo da referência definida no projeto, $V^* = 179.61$ V.

A Tabela 20 mostra a redução percentual do DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C2.

Tabela 19 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C2 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (V)	164,2	164,8	168,5	179,5	180,0	180,4	179,1	179,7	179,1	177,7	180,3	180,1
3 (V)	4,06	2,71	1,29	1,03	1,54	0,83	0,20	0,88	0,97	1,21	0,53	0,64
5 (V)	11,84	12,08	9,87	10,47	8,76	9,03	9,40	8,46	9,82	3,23	2,34	2,24
7 (V)	9,86	9,05	7,08	0,98	1,88	1,05	2,13	0,42	0,28	2,60	1,35	1,76
9 (V)	3,99	2,96	1,55	0,76	1,47	0,75	0,09	1,71	0,53	0,46	0,66	0,97
11 (V)	6,01	3,92	3,37	3,10	0,38	2,69	3,83	0,26	2,12	0,74	0,77	0,46
13 (V)	5,27	4,66	3,92	1,06	1,23	1,19	1,23	0,35	1,92	1,08	0,61	0,89
DHT (%)	11,63	9,28	8,07	6,25	5,48	5,72	5,87	5,15	5,64	3,09	2,35	2,13

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 20 - Redução percentual do DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC após a compensação harmônica em C2

Grandeza	EC1			EC2			EC3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	C
I_S	79,6%	83,8%	86,1%	80,6%	89,2%	81,1%	34,2%	24,5%	33,6%
V_{PAC}	46,3%	40,9%	29,1%	49,5%	44,5%	30,1%	73,4%	74,7%	73,6%

Fonte: elaborada pelo autor.

Apesar da presença de harmônicos na tensão da fonte, EC1 e EC2 conseguem reduzir significativamente o DHT das correntes do alimentador, como mostrado na Tabela 20. Como EC3 é uma estratégia que visa amortecer os harmônicos de tensão do PAC, ela não consegue mitigar o 5º harmônico de corrente gerado pelo harmônico adicionado à fonte do sistema. Entretanto, EC3 pode reduzir consideravelmente o DHT da tensão do PAC, como mostrado na Tabela 20. Como as EC1 e EC2 não são projetadas para mitigar harmônicos de tensão, elas não conseguem reduzir estes harmônicos de modo significativo.

No cenário C2, as DHIs e a DHT da corrente do alimentador antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias EC1, EC2 e EC3, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 21.

Tabela 21 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3			IEEE 519
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
3 (%)	7,6	3,9	6,0	1,0	1,3	0,9	1,1	0,3	1,3	3,0	1,0	2,0	4,0
5 (%)	12,0	13,3	14,1	1,9	1,6	0,9	1,3	0,5	1,1	10,2	11,6	10,7	4,0
7 (%)	7,4	7,9	5,9	1,0	0,7	0,6	2,0	1,1	1,5	2,2	1,4	1,3	4,0
9 (%)	2,1	1,9	1,0	0,3	1,2	0,7	0,4	1,1	0,8	0,5	0,2	0,4	4,0
11 (%)	2,6	2,8	2,7	1,5	0,7	1,0	1,9	0,5	1,6	0,5	0,3	0,5	2,0
13 (%)	1,7	2,1	0,9	0,6	0,8	0,8	0,3	0,6	0,8	0,5	0,3	0,5	2,0
DHT (%)	16,6	16,1	16,6	3,4	2,6	2,3	3,2	1,7	3,1	10,9	12,1	10,9	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, com exceção do 9º harmônico de corrente, as demais DHIs e a DHT estavam acima do limite proposto pela norma IEEE 519-2022. Com o uso das estratégias EC1 e EC2, as DHIs e a DHT ficam dentro dos limites propostos em todas as ordens harmônicas mostradas na Tabela 21. Com o uso da estratégia EC3, com exceção do DHI da 5ª ordem e da DHT, as demais DHIs ficaram dentro dos limites propostos.

As DHIs e a DHT da tensão do PAC antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias EC1, EC2 e EC3, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 22.

Tabela 22 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C2 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			EC1			EC2			EC3			IEEE 519
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
3 (%)	2,5	1,6	0,8	0,6	0,9	0,5	0,1	0,5	0,5	0,7	0,3	0,4	5,0
5 (%)	7,2	7,3	5,9	5,8	4,9	5,0	5,2	4,7	5,5	1,8	1,3	1,2	5,0
7 (%)	6,0	5,5	4,2	0,5	1,0	0,6	1,2	0,2	0,2	1,5	0,7	1,0	5,0
9 (%)	2,4	1,8	0,9	0,4	0,8	0,4	0,1	1,0	0,3	0,3	0,4	0,5	5,0
11 (%)	3,7	2,4	2,0	1,7	0,2	1,5	2,1	0,1	1,2	0,4	0,4	0,3	5,0
13 (%)	3,2	2,8	2,3	0,6	0,7	0,7	0,7	0,2	1,1	0,6	0,3	0,5	5,0
DHT (%)	11,6	9,3	8,1	6,3	5,5	5,7	5,9	5,2	5,6	3,1	2,4	2,1	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, as DHIs de 5ª e 7ª e a DHT estavam fora dos limites propostos pela norma IEEE 519-2022. Com o uso da estratégia EC3, as DHIs e a DHT ficam dentro dos limites propostos em todas as ordens harmônicas mostradas na Tabela 22. Com o uso das estratégias EC1 e EC2, algumas DHIs da 5ª ordem ficam fora dos limites estabelecidos na norma, mas os demais valores de DHI e a DHT ficam dentro dos limites.

3.3.2 Comparação das combinações de estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria p - q com controles VSG e PQ

Nos resultados apresentados nesta seção, os circuitos foram simulados no *software* Typhoon HIL Control Center. O estágio de potência foi criado usando o Schematic Editor disponível no *software* Typhoon HIL Control Center e os controles de potência PQ e VSG e de detecção harmônica foram implementados em linguagem C. A supervisão e o controle do sistema são feitos através da plataforma Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), também disponível no Typhoon HIL Control Center.

A fim de validar que a combinação dos controladores VSG, apresentado no Capítulo 2, e de detecção harmônica, apresentados no Capítulo 3, podem reduzir as variações de frequência e de tensão no PAC durante mudanças das potências das cargas do sistema (P_L e Q_L) e da variação da potência de referência P^* , os controladores propostos são comparados com as combinações dos controladores PQ, apresentado no Capítulo 2, e de detecção harmônica.

Na simulação, em $t = 0,2$ s, a potência da carga é alterada e os valores da carga são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Potência da carga

Potência	$t < 0,2$ s	$t \geq 0,2$ s
P_L (kW)	18,95	23,78
Q_L (kVAR)	6,22	10,29

Fonte: elaborada pelo autor.

A referência de potência reativa é nula ($Q^* = 0$) durante as simulações, visto que o propósito é comparar os controles de potência ativa PQ e VSG em resposta a variações do ângulo. Assim, a contribuição para a estabilidade angular é fornecida única e exclusivamente pelo controle de potência ativa dos controladores e é possível destacar a contribuição da inércia sintética fornecida pelo controle de potência ativa do VSG quando comparado ao controle PQ em resposta a variações do ângulo.

A Figura 27 mostra as potências ativa do inversor (P_{inv}), a frequência (Freq) e a taxa de variação de frequência (ROCOF) para as combinações dos controladores PQ e VSG com a estratégia de detecção harmônica EC1 (EC1PQ e EC1VSG, respectivamente), as combinações dos controladores PQ e VSG com a estratégia de detecção harmônica EC2 (EC2PQ e EC2VSG, respectivamente) e as combinações dos controladores PQ e VSG com a estratégia de detecção harmônica EC3 (EC3PQ e EC3VSG, respectivamente). A Tabela 24 mostra o nadir de frequência para cada uma das combinações de controladores PQ e VSG com a estratégia de detecção harmônica baseada na Teoria $p-q$.

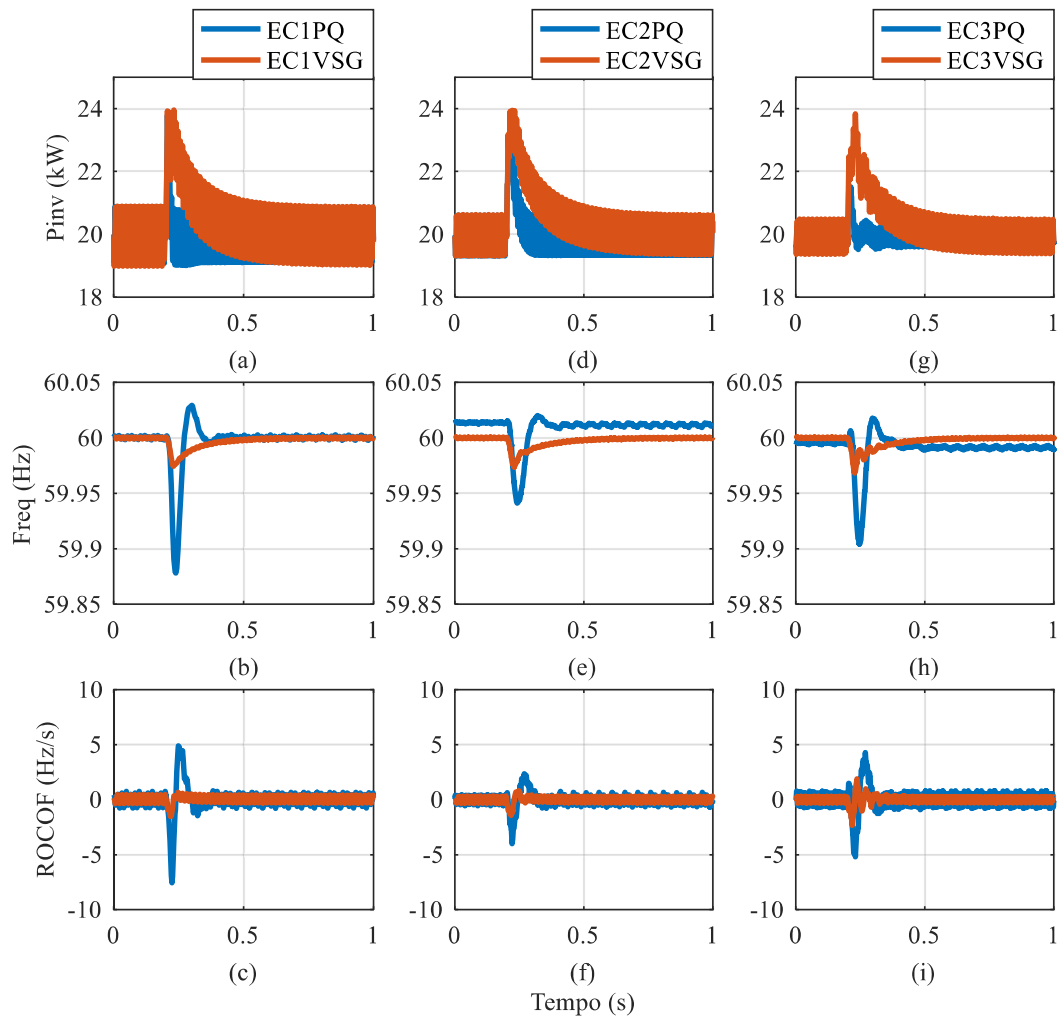


Figura 27 - (a) Potência ativa do VSG, (b) frequência e (c) ROCOF para os controles C1PQ e C1VSG; (d) Potência ativa do VSG, (e) frequência e (f) ROCOF para os controles C2PQ e C2VSG; (g) Potência ativa do VSG, (h) frequência e (i) ROCOF para os controles C3PQ e C3VSG
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 24 - Nadir de frequência dos controladores PQ e VSG após alteração de carga

Controle do FA	Nadir de frequência (Hz)	
	Controle PQ	Controle VSG
EC1	59,88	59,98
EC2	59,94	59,97
EC3	59,90	59,97

Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostrado na Figura 27, o controle VSG pode reduzir as variações de frequência durante a alteração de carga. O controle VSG fornece inércia sintética a tensão sintetizada pelo inversor e pode aumentar o nadir de frequência quando comparado a um controle PQ constante, como mostrado na Tabela 24.

A Figura 28 mostra o ROCOF médio calculado em uma janela de 0,1 s e a Tabela 25 mostra os valores mínimos e máximos do ROCOF médio dos controladores PQ e VSG.

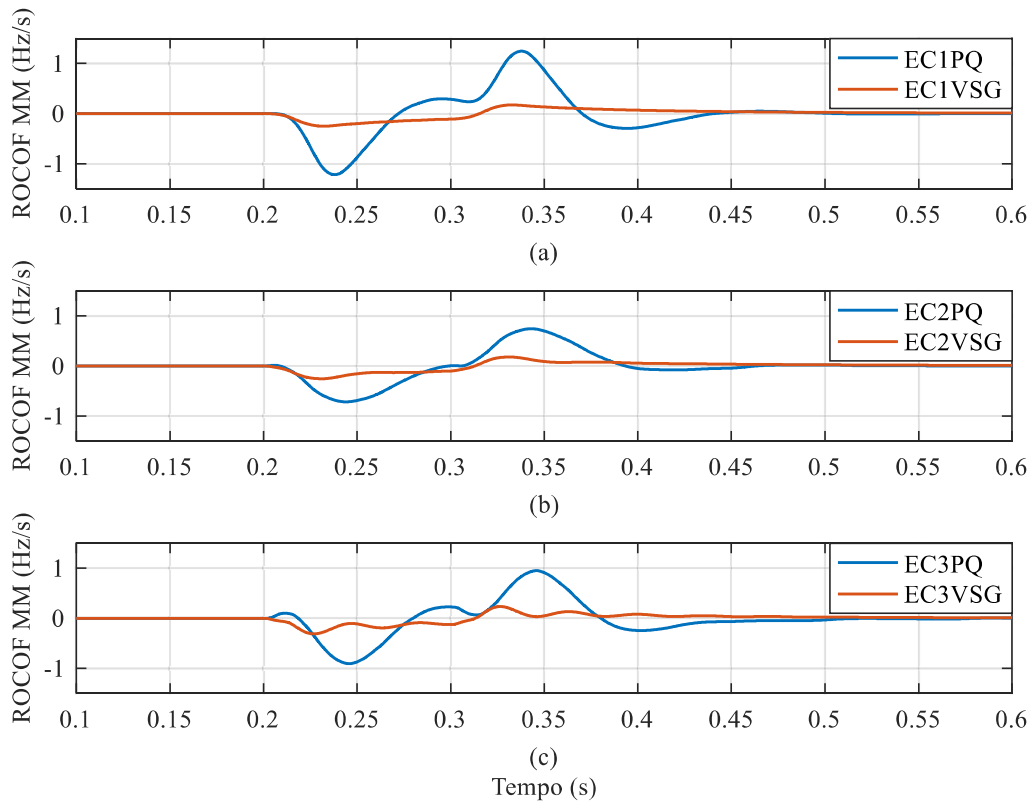


Figura 28 - ROCOF médio para os controles (a) C1PQ e C1VSG, (b) C2PQ e C2VSG, e (c) C3PQ e C3VSG
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 25 - ROCOFs médio mínimo e máximo dos controladores PQ e VSG após a alteração de carga

Controle do FA	ROCOF médio (Hz/s)			
	Controle PQ		Controle VSG	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
EC1	-1,22	1,25	-0,25	0,17
EC2	-0,72	0,74	-0,26	0,18
EC3	-0,91	0,95	-0,31	0,24

Fonte: elaborada pelo autor.

Como os limites pré-definidos de ROCOF usualmente estão entre 0,1 e 1,2 Hz/s (BARRIOS-GOMEZ et al., 2020), o controle VSG não ultrapassa o limite de 1,2 Hz/s e é capaz de reduzir a ROCOF médio quando comparado com o controle PQ constante.

3.4 Conclusões

Neste capítulo, são propostas as combinações do controle VSG com três estratégias de detecção harmônica baseadas na Teoria $p-q$. As estratégias propostas permitem que um único inversor possa, simultaneamente, contribuir para a melhoria da estabilidade do sistema e da qualidade de energia elétrica.

As três combinações de controle VSG com detecção harmônica são comparadas na Seção 3.3.1. Enquanto as estratégias EC1 e EC2 medem correntes e tensões para detectar correntes harmônicas, a estratégia EC3 mede somente tensões para detectar as tensões harmônica do sistema. No cenário C1, em que a fonte de tensão do sistema não apresenta harmônicos, as estratégias EC1, EC2 e EC3 compensam simultaneamente os harmônicos de tensão e de corrente do sistema simulado. No cenário C2, em que a fonte de tensão do sistema possui um harmônico de tensão de 5ª ordem, as estratégias EC1 e EC2 tem limitações para amortecer as tensões harmônicas no PAC e a estratégia EC3 tem limitações para mitigar as correntes harmônica no alimentador do sistema. Como o propósito deste trabalho é propor uma combinação do controle VSG com detecção harmônica em que voltada para o amortecimento da propagação harmônica no sistema elétrico, a estratégia EC3 é a mais adequada para o controlador com ganho adaptativo proposto nesta tese.

As combinações dos controles VSG e PQ constante com detecção harmônica são comparadas na Seção 3.3.2. Comparando a respostas dos controles VSG e PQ constante, é verificado que o controle VSG pode melhorar o nadir de frequência e o ROCOF da frequência da tensão no PAC após transitórios.

4 DETECÇÃO HARMÔNICA BASEADA EM COMBINADORES LINEARES DE FOURIER

O combinador linear de Fourier (FLC, do inglês *Fourier Linear Combiner*) pode ser utilizado para detectar seletivamente as componentes harmônicas presentes em um sinal elétrico. Assim, é possível usar ganhos diferentes em cada frequência harmônica detectada a fim de otimizar a mitigação harmônica realizada pelo filtro ativo de potência. Controladores proporcional (P), proporcional-integral (PI) e proporcional com ganho adaptativo podem ser utilizados para definir as correntes de referência do detector harmônico.

O FLC estudado neste capítulo é usado para extrair seletivamente as tensões harmônicas na tensão do PAC com a finalidade de amortecer as tensões harmônicas presentes no sistema. Como mostrado na seção 3.3.1, a estratégia de controle EC3 é a mais apropriada para concessionárias de energia elétrica.

4.1 Combinadores lineares de Fourier (FLC)

O uso do FLC é uma alternativa para detectar as componentes fundamental e harmônicas de um sinal. O FLC é uma aplicação do algoritmo de erro quadrático médio (LMS, do inglês *Least Mean Square*) para estimar os coeficientes de uma série de Fourier correspondente a um sinal periódico (VAZ; KONG; THAKOR, 1994). O algoritmo LMS, amplamente encontrado na literatura biomédica para rastrear tremores humanos, permite a decomposição em tempo real de um sinal periódico em sua série de Fourier. O combinador linear de Fourier com frequência adaptativa (WFLC, do inglês *Weighted-Frequency Fourier Linear Combiner*) (RIVIERE; THAKOR, 1996), uma modificação do FLC, permite o rastreamento da componente de maior magnitude presente no sinal periódico. A combinação do FLC com o WFLC é capaz de rastrear amplitude, fase e frequência de sinais periódicos (BARROS JUNIOR et al., 2020).

O FLC trabalha com um passo adaptativo μ limitado ao número máximo de harmônicos a ser estimado e o algoritmo é dado pelas Equações (37)-(39).

$$x_{rk} = \begin{cases} \text{sen}(r\omega_0 k), 1 \leq r \leq M \\ \cos[(r - M)\omega_0 k], M + 1 \leq r \leq 2M \end{cases} \quad (37)$$

$$\varepsilon_k = s_k - W_k X_k \quad (38)$$

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu X_k \varepsilon_k \quad (39)$$

onde W_k é o vetor de coeficiente adaptativo, X_k é o vetor de x_{rk} , M é o número de harmônicos, r é o índice do harmônico, ε_k é o desvio de rastreamento e s_k é o sinal de entrada para uma amostra k . A Figura 29 mostra o diagrama de blocos do FLC.

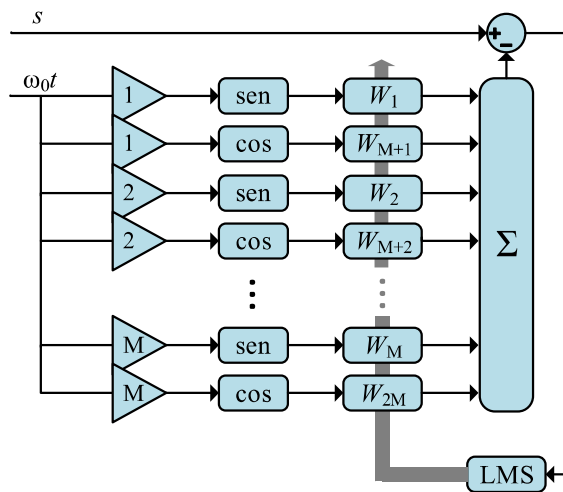


Figura 29 - Diagrama de blocos do FLC
Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando possíveis variações de frequência no sistema elétrico, o WFLC reajusta a frequência da componente de maior magnitude do sinal de entrada. Esta adaptação é obtida com o uso de um algoritmo LMS modificado, mostrado na Equação (40).

$$\omega_{0_{k+1}} = \omega_{0_k} + 2\mu_0 \varepsilon_k \sum_{r=1}^M r(\omega_{rk} x_{(M+r)_k} - \omega_{(M+r)_k} x_{rk}) \quad (40)$$

onde ω_0 é a frequência da componente de maior magnitude e μ_0 é o passo adaptativo do algoritmo LMS modificado. O diagrama de blocos do WFLC é mostrado na Figura 30. Em aplicações combinadas do FLC com o WFLC, é comum utilizar o WFLC somente para ajustar a frequência (BARROS JUNIOR et al., 2020).

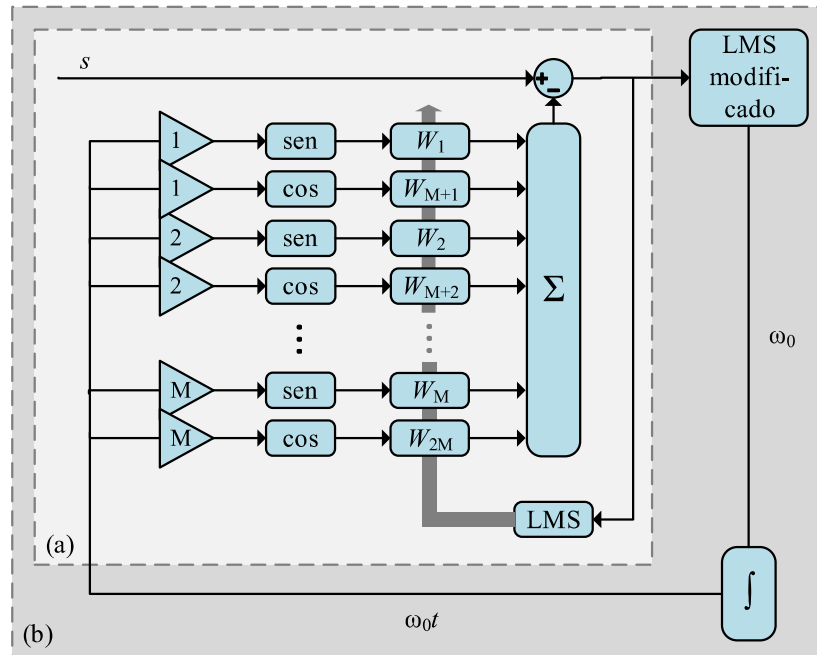


Figura 30 - Diagrama de blocos do WFLC dos algoritmos (a) FLC original e (b) FLC com frequência adaptativa
Fonte: elaborada pelo autor.

Para aplicações em sistemas trifásicos, cada fase tem uma combinação WFLC/FLC para decompor o sinal de entrada em uma série de Fourier. A partir do sinal decomposto, uma transformada de Fortescue é usada para determinar as sequências positiva, negativa e zero de cada componente harmônica rastreada pelos FLCs. Esta estrutura é denominada detector de sequência baseado em combinadores lineares de Fourier (SDFLC, do inglês *Sequence Detector Fourier Linear Combiner*) (RIVIERE; SCOTT RADER; THAKOR, 1998). A saída da transformada de Fortescue é dada pelas Equações (41)-(43).

$$y_{p+k} = W_{p_k} X_{p_k} + W_{(p-120)_k} X_{p_k} + W_{(p+120)_k} X_{p_k} \quad (41)$$

$$y_{p-k} = W_{p_k} X_{p_k} + W_{(p-120)_k} X_{(p+120)_k} + W_{(p+120)_k} X_{(p-120)_k} \quad (42)$$

$$y_{p0_k} = W_{p_k} X_{p_k} + W_{(p-120)_k} X_{(p-120)_k} + W_{(p+120)_k} X_{(p+120)_k} \quad (43)$$

onde y é o sinal de saída, p é a fase e k é o índice do harmônico.

Enquanto o FLC possui custo computacional baixo, o uso do SDFLC aumenta o custo computacional do algoritmo, visto que ele tem componentes trigonométricas. Entretanto, ele tem a vantagem de rastrear intrinsecamente componentes harmônicas e suas sequências.

Em sistemas trifásicos, o 3WFLC, uma melhoria do WFLC, pode ser utilizado. Enquanto na aplicação do WFLC em sistemas monofásicos é necessário o uso de filtros passa baixa para reduzir as oscilações devido a influência das componentes harmônicas e de ruído branco, a

aplicação do 3WFLC em sistemas trifásicos usa as informações das fases para mitigar o ruído (BARROS JUNIOR et al., 2020). A frequência adaptativa ω_0 é a média das frequências obtidas em cada fase, como mostrado nas Equações (44)-(47).

$$\omega_{a_{0k+1}} = \omega_{a_{0k}} + 2\mu_0 \varepsilon_{a_k} \sum_{r=1}^M r(\omega_{a_{r_k}} x_{a_{(M+r)_k}} - \omega_{a_{(M+r)_k}} x_{a_{r_k}}) \quad (44)$$

$$\omega_{b_{0k+1}} = \omega_{b_{0k}} + 2\mu_0 \varepsilon_{b_k} \sum_{r=1}^M r(\omega_{b_{r_k}} x_{b_{(M+r)_k}} - \omega_{b_{(M+r)_k}} x_{b_{r_k}}) \quad (45)$$

$$\omega_{c_{0k+1}} = \omega_{c_{0k}} + 2\mu_0 \varepsilon_{c_k} \sum_{r=1}^M r(\omega_{c_{r_k}} x_{c_{(M+r)_k}} - \omega_{c_{(M+r)_k}} x_{c_{r_k}}) \quad (46)$$

$$\omega_{0k+1} = \frac{\omega_{a_{0k+1}} + \omega_{b_{0k+1}} + \omega_{c_{0k+1}}}{3} \quad (47)$$

A estrutura de detecção utilizada neste trabalho consiste na combinação de três WFLC e o SDFLC (BARROS JUNIOR et al., 2020). O diagrama de blocos do 3WFLC/SDFLC é mostrado na Figura 31.

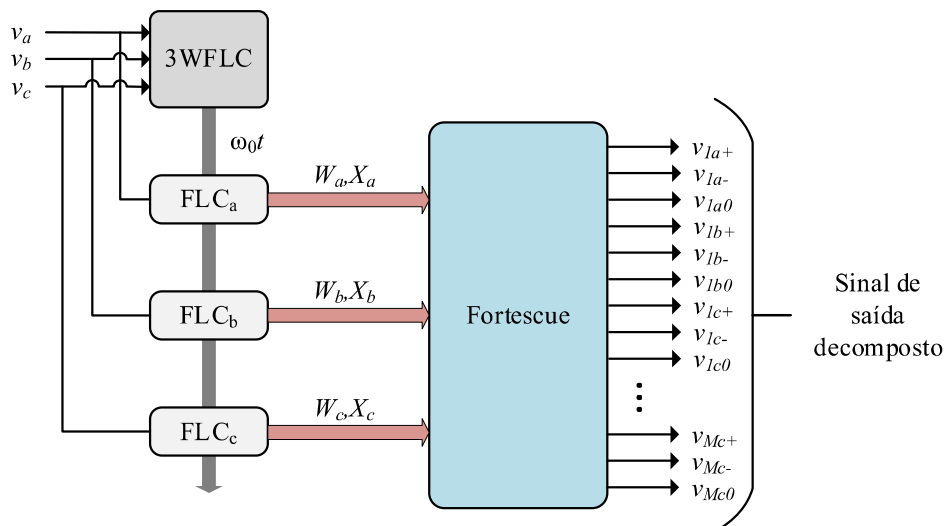


Figura 31 - Diagrama de blocos do 3WFLC/SDFLC

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir do sinal decomposto pelo 3WFLC/SDFLC, é possível escolher quais ordens harmônicas do sinal serão compensadas e a cada ordem pode ser aplicado um controlador diferente a fim de mitigar o harmônico em questão.

4.2 Detecção harmônica de sinais trifásicos baseada em FLC

Neste trabalho, foram propostas três estratégias de controle baseados em FLC. Nessas estratégias, a componente fundamental não é compensada. As estratégias FLC1, FLC2 e FLC3 são baseadas na estratégia EC3 apresentada no Capítulo 3 e medem somente as componentes harmônicas da tensão no PAC (v_{PAC}) a fim de detectar as tensões harmônicas de uma rede elétrica.

A detecção baseada em FLC possibilita o uso de abordagens diferentes, em um mesmo controlador, para a mitigação de harmônicos específicos.

A Figura 32 mostra a visão geral da aplicação das estratégias FLC1 ou FLC2 em um sistema elétrico.

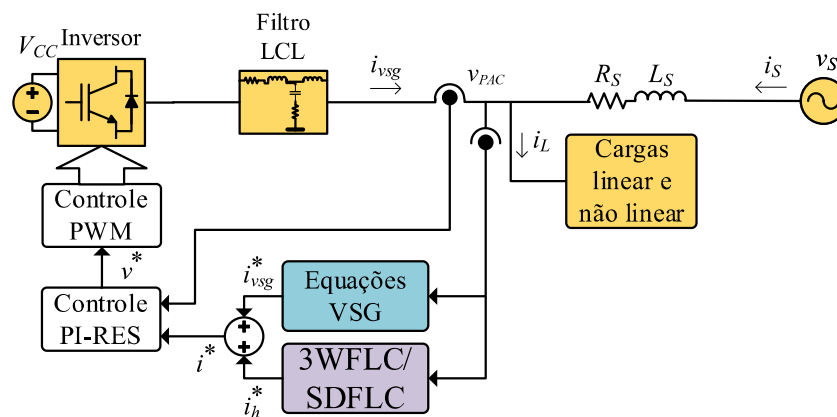


Figura 32 - Visão geral da aplicação das estratégias FLC1 ou FLC2 em um sistema elétrico
Fonte: elaborada pelo autor.

Na estratégia FLC1, foram definidos ganhos individuais para os harmônicos de tensão de 5ª e 7ª ordem com ganhos k_{v5} e k_{v7} , respectivamente, e um ganho k_v para as demais ordens harmônicas.

Na estratégia FLC2, foram usados controladores PI com ganhos k_{p5} e k_{i5} para o harmônico de tensão de 5ª ordem e ganhos k_{p7} e k_{i7} para o harmônico de 7ª ordem e um ganho k_v foi usado para as demais ordens harmônicas. Com o uso de controladores PI para os harmônicos de 5ª e 7ª ordens, é esperado que a atenuação deste harmônico de tensão na estratégia FLC2 seja maior.

Os controladores P são aplicados no sinal de saída decomposto e os controladores PI para harmônicos individuais são aplicados nos coeficientes adaptativos $w_{p(r)_k}$ e $w_{p(r+M)_k}$.

A Figura 33 mostra a visão geral da aplicação da estratégia FLC3 em um sistema elétrico com três barramentos. Neste sistema, a GD é conectada ao barramento 3 e o controle de detecção harmônica tem como objetivo reduzir as DHTs da tensão no barramento 2 e da corrente que alimenta o barramento 2.

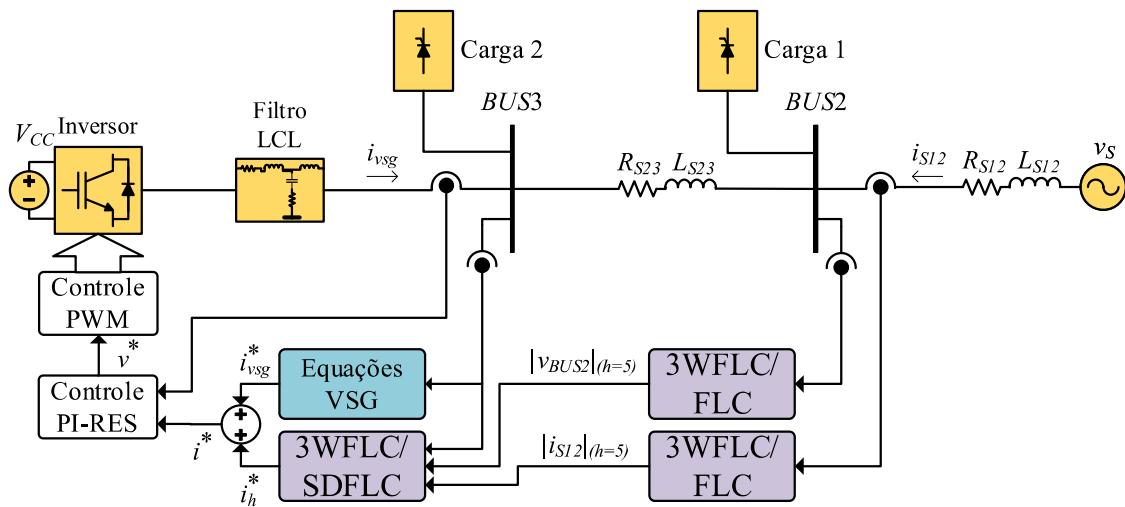


Figura 33 - Visão geral da aplicação da estratégia FLC3 em um sistema elétrico com três barramentos
Fonte: elaborada pelo autor.

Na estratégia FLC3, foi definido um ganho com passo adaptativo k_{v5_k} para o harmônico de 5ª ordem, um ganho k_{v7} para o harmônico de 7ª ordem e um ganho k_v para as demais ordens harmônicas. O intervalo para atualização (T_u) do ganho adaptativo é 200 ms, que é a janela de tempo usualmente utilizada em medições de harmônicos (IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, 2019) e este ganho é ajustado de acordo com o erro entre os valores médios nos instantes k e $k-1$ do quinto harmônico de tensão em uma barra de interesse do sistema (v_{5_k} e $v_{5_{(k-1)}}$, respectivamente) e da corrente que alimenta esta barra (i_{5_k} e $i_{5_{(k-1)}}$, respectivamente). A tensão v_5 é média das tensões harmônicas instantâneas de 5ª ordem no barramento e a corrente i_5 é a média das correntes harmônicas instantâneas que alimenta o barramento, como mostrado nas Equações (48) e (49).

$$v_5 = \frac{v_{a5} + v_{b5} + v_{c5}}{3} \quad (48)$$

$$i_5 = \frac{i_{a5} + i_{b5} + i_{c5}}{3} \quad (49)$$

onde v_{a5} , v_{b5} e v_{c5} são as tensões harmônicas instantâneas de quinta ordem.

Com o uso de filtros média móvel (FMM), são calculados os valores médios da tensão harmônica de quinta ordem em uma barra de interesse do sistema (v_{5k}) e da corrente que alimenta esta barra (i_{5k}) em um intervalo de 200 ms.

O ganho com passo adaptativo da estratégia FLC 3 é dado pela Equação (50).

$$k_{v5k} = k_{v5(k-1)} - \Delta k_{v5}(v_{5k} - v_{5(k-1)}) - \Delta k_{i5}(i_{5k} - i_{5(k-1)}) \quad (50)$$

onde Δk_{v5} é o passo de tensão do ganho, Δk_{i5} é o passo de corrente do ganho e $k_{v5(k-1)}$ é o ganho adaptativo no instante $k-1$.

O ganho adaptativo da estratégia FLC3 tenta minimizar os harmônicos de tensão e de corrente harmônica de 5ª ordem em um determinado barramento e este controlador adaptativo é aplicado nos coeficientes adaptativos $w_{p(r)_k}$ e $w_{p(r+M)_k}$. A Figura 34 mostra o fluxograma do detector harmônico baseado em FLC com ganho com passo adaptativo proposto neste trabalho.

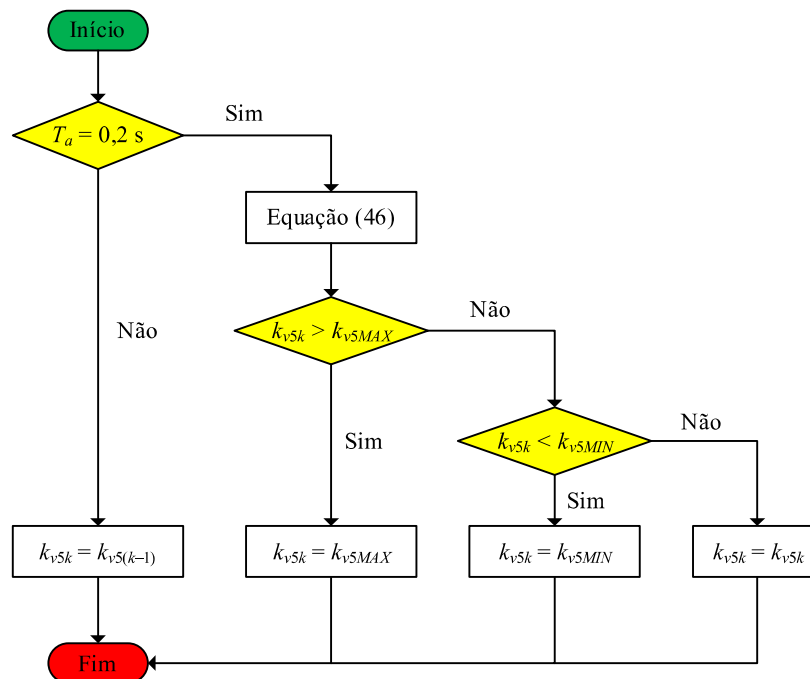


Figura 34 - Fluxograma do ajuste do ganho do detector harmônico baseado em FLC com ganho com passo adaptativo

Fonte: elaborada pelo autor.

4.3 Comparação das estratégias de detecção harmônica baseadas em FLC

Nesta seção, os controladores apresentados na seção 4.2 são aplicados em dois cenários diferentes e os resultados obtidos são analisados. No cenário 1 (C1), o barramento infinito de tensão não possui harmônicos. No cenário 2 (C2), a fonte de tensão tem um harmônico de 0,04 pu. Estes cenários são os mesmos utilizados para validar os controladores apresentados na seção 3.3.1. Os parâmetros do sistema de distribuição e do VSG são mostrados na Tabela 10, as potências ativa e reativa e o DHT da carga são mostrados na Tabela 11 e os parâmetros utilizados para o projeto do filtro LCL são mostrados na Tabela 4. Os ganhos do controlador PI-RES são mostrados na Tabela 26 e os ganhos dos controladores de detecção harmônica, determinados empiricamente, são mostrados na Tabela 27.

Tabela 26 - Ganhos do controlador PI-RES

Parâmetros	Estratégia de controle	
	FLC1	FLC2
Ganho proporcional (K_p)	0,25	0,5
Ganho integral (K_i)	10	50
Ganho ressonante (K_r)	250	250

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 27 - Ganhos dos controladores de detecção harmônica baseados em FLC

Parâmetros	Estratégia de controle	
	FLC1	FLC2
Ganho de tensão (k_v)	1,5	1,5
Ganho de tensão, $h=5$ (k_{v5})	4,0	-
Ganho de tensão, $h=7$ (k_{v7})	2,0	-
Ganho proporcional, $h=5$ (k_{p5})	-	1,0
Ganho integral, $h=5$ (k_{i5})	-	10
Ganho proporcional, $h=7$ (k_{p7})	-	1,0
Ganho integral, $h=7$ (k_{i7})	-	10

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figuras 35 e 36 mostram a corrente do alimentador e a tensão do PAC, respectivamente, antes da compensação e após a compensação, usando as estratégias de controle FLC1 e FLC2, no cenário C1. O conteúdo harmônico das correntes do alimentador e das tensões no PAC são mostrados nas Tabelas 28 e 29, respectivamente. Nas simulações desta seção, a distorção harmônica total (DHT) é calculada por um bloco do Typhoon HIL Control Center e são usados harmônicos até a 83ª ordem para o cálculo do DHT.

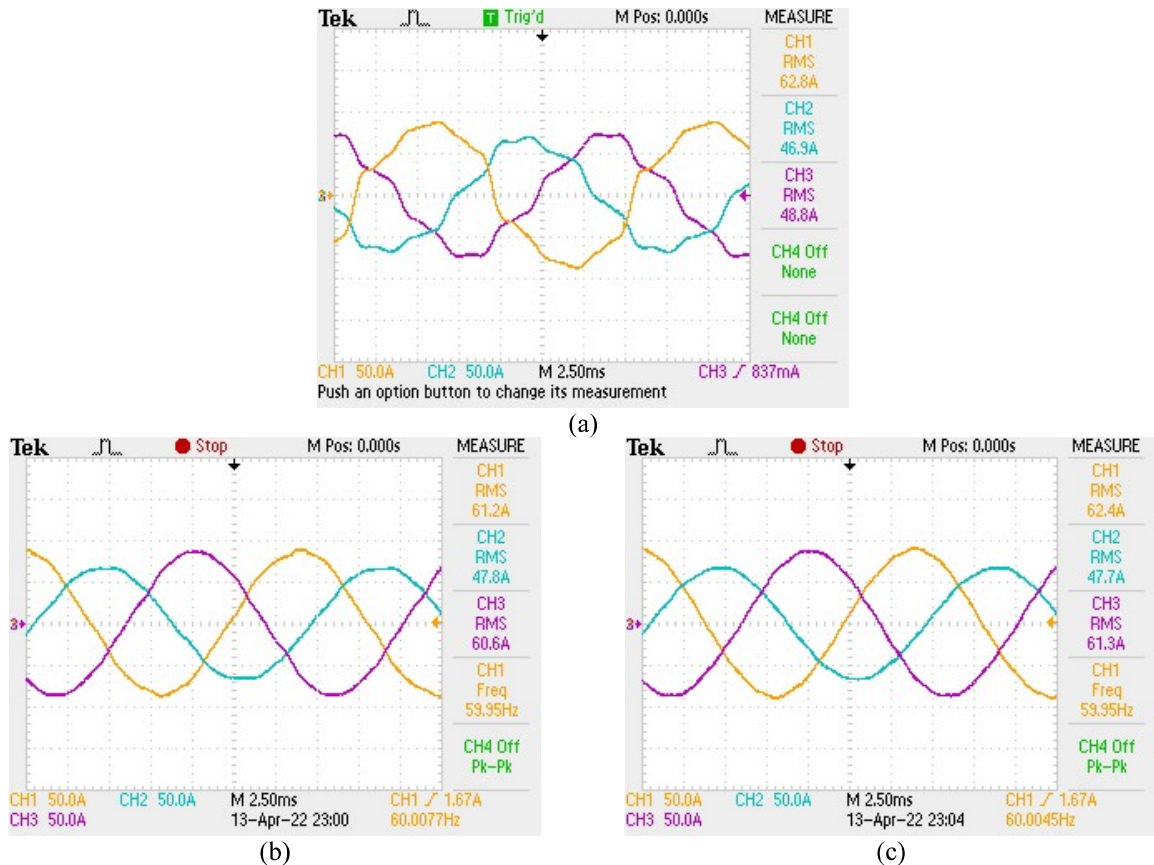


Figura 35 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C1

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 28 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (A)	87,30	66,74	66,87	85,03	66,35	84,40	86,67	66,10	85,01
3 (A)	5,99	3,02	2,98	0,95	0,68	0,80	0,63	0,60	1,02
5 (A)	5,98	4,49	4,38	1,36	1,39	1,10	0,26	0,56	0,69
7 (A)	5,98	4,72	4,72	1,21	1,19	0,89	0,40	0,49	0,16
9 (A)	1,94	1,06	0,95	0,38	0,62	0,10	0,11	0,58	0,54
11 (A)	2,96	2,23	2,07	0,91	1,18	0,89	1,11	1,19	0,81
13 (A)	1,76	1,52	1,47	0,20	0,41	0,64	0,47	0,47	0,14
DHT (%)	12,68	11,45	11,52	2,70	3,83	2,42	1,74	2,94	2,00

Fonte: elaborada pelo autor.

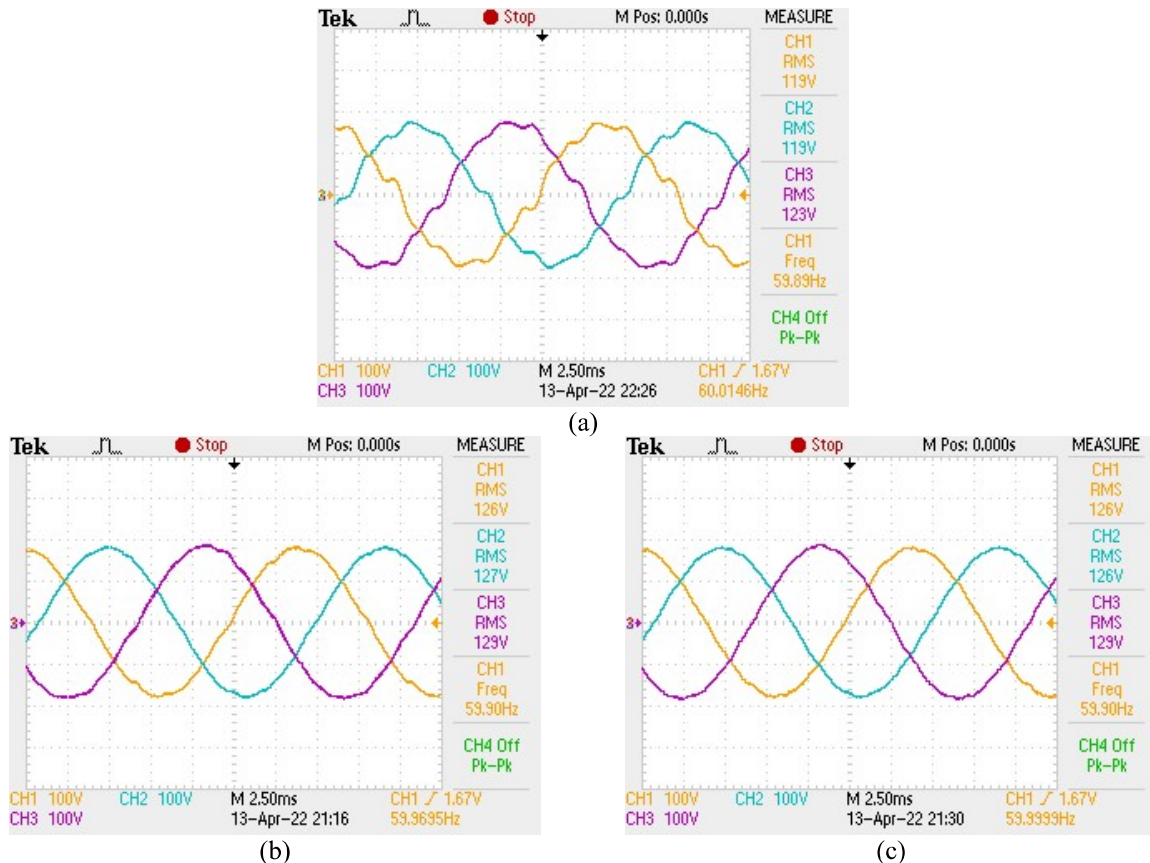


Figura 36 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C1

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 29 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (V)	164,11	166,12	170,63	177,42	178,36	180,90	177,64	178,15	182,79
3 (V)	4,44	1,16	3,28	0,69	1,10	1,94	0,77	1,23	0,45
5 (V)	7,05	4,74	5,90	1,94	1,17	0,70	0,17	1,17	0,66
7 (V)	9,28	6,57	6,64	1,82	2,11	1,91	0,17	1,17	0,67
9 (V)	4,02	1,69	2,39	0,65	0,64	1,29	0,55	0,77	1,06
11 (V)	6,40	4,66	5,30	2,43	1,44	0,91	2,20	1,45	2,52
13 (V)	4,46	2,74	2,68	1,04	1,54	2,44	1,03	1,54	0,82
DHT (%)	9,31	6,37	6,30	2,24	2,15	2,53	1,53	1,96	1,93

Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostrado nas Tabelas 28 e 29, os detectores FLC1 e FLC2 reduzem significativamente o DHT das correntes do alimentador e das tensões do PAC e o controlador do VSG regula a tensão em um valor próximo da referência definida no projeto, $V^* = 179,61$ V. As Tabelas 30 e 31 comparam o desempenho dos controladores FLC1 e FLC2 na compensação dos harmônicos de 5^a e 7^a ordens e na redução do DHT das correntes do alimentador e das tensões do PAC em C1, respectivamente.

Tabela 30 - Redução percentual dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e do DHT da corrente do alimentador após a compensação harmônica em C1

I_s	FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c
$h=5$	77,26%	76,76%	81,61%	95,65%	90,64%	88,46%
$h=7$	79,77%	80,10%	85,12%	93,31%	91,81%	97,32%
DHT	78,69%	69,78%	80,89%	86,32%	76,84%	84,25%

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 31 - Redução percentual dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e do DHT da tensão do PAC após a compensação harmônica em C1

V_{PAC}	FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c
$h=5$	72,48%	83,40%	90,07%	97,59%	83,40%	90,64%
$h=7$	80,39%	77,26%	79,42%	98,17%	87,39%	92,78%
DHT	75,90%	76,94%	72,85%	83,61%	78,97%	79,22%

Fonte: elaborada pelo autor.

Em FLC2, o uso de controladores PI na compensação dos harmônicos de 5ª e de 7ª ordens faz com que a mitigação destes harmônicos seja mais acentuada nesta estratégia de detecção. Consequentemente, a redução do DHT também é maior com o uso do controlador FLC2.

No cenário C1, as DHIs e a DHT da corrente do alimentador antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias FLC1 e FLC2, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 32.

Tabela 32 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C1 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			FLC1			FLC2			IEEE 519
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
3 (%)	6,9	4,5	4,5	1,1	1,0	0,9	0,7	0,9	1,2	4,0
5 (%)	6,8	6,7	6,6	1,6	2,1	1,3	0,3	0,8	0,8	4,0
7 (%)	6,8	7,1	7,1	1,4	1,8	1,1	0,5	0,7	0,2	4,0
9 (%)	2,2	1,6	1,4	0,4	0,9	0,1	0,1	0,9	0,6	4,0
11 (%)	3,4	3,3	3,1	1,1	1,8	1,1	1,3	1,8	1,0	2,0
13 (%)	2,0	2,3	2,2	0,2	0,6	0,8	0,5	0,7	0,2	2,0
DHT (%)	12,7	11,5	11,5	2,7	3,8	2,4	1,7	2,9	2,0	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, com exceção do 9º harmônico de corrente, as demais distorções harmônicas individuais e totais estavam acima do limite proposto pela norma IEEE 519-2022. Com o uso das estratégias de detecção e compensação de harmônicos propostas baseadas em FLC, as DHIs e a DHT ficam dentro dos limites propostos em todas as ordens harmônicas mostradas na Tabela 32.

As DHIs e a DHT da tensão do PAC antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias FLC1 e FLC2, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 33.

Tabela 33 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C1 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			FLC1			FLC2			IEEE 519
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
3 (%)	2,7	0,7	1,9	0,4	0,6	1,1	0,4	0,7	0,2	5,0
5 (%)	4,3	2,9	3,5	1,1	0,7	0,4	0,1	0,7	0,4	5,0
7 (%)	5,7	4,0	3,9	1,0	1,2	1,1	0,1	0,7	0,4	5,0
9 (%)	2,4	1,0	1,4	0,4	0,4	0,7	0,3	0,4	0,6	5,0
11 (%)	3,9	2,8	3,1	1,4	0,8	0,5	1,2	0,8	1,4	5,0
13 (%)	2,7	1,6	1,6	0,6	0,9	1,3	0,6	0,9	0,4	5,0
DHT (%)	9,3	6,4	6,3	2,2	2,1	2,5	1,5	2,0	1,9	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C1, em que a fonte de tensão do sistema não possui harmônicos, somente a DHI de 7^a ordem da fase *a* e a DHT da fase *a* estavam acima do limite antes da compensação. Após a compensação, todos os valores de tensão ficaram dentro dos limites propostos pela norma.

As Figuras 37 e 38 mostram a corrente do alimentador e a tensão do PAC, respectivamente, antes da compensação e após a compensação, usando as estratégias de controle FLC1 e FLC2, no cenário C2. O conteúdo harmônico das correntes do alimentador e das tensões no PAC são mostrados nas Tabelas 34 e 35, respectivamente.

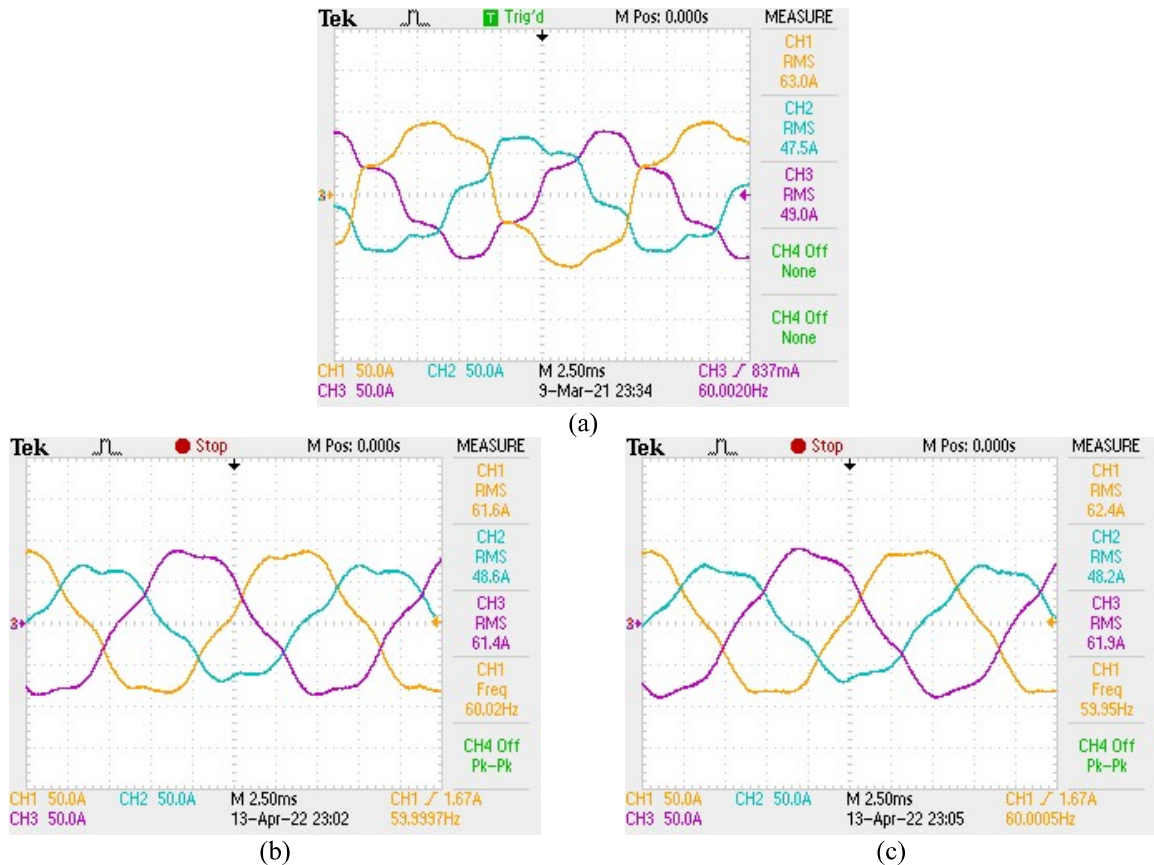


Figura 37 - (a) Corrente do alimentador antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 34 - Conteúdo harmônico da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (A)	87,22	66,49	67,69	82,22	66,98	84,85	87,26	67,40	85,81
3 (A)	6,63	2,60	4,04	0,68	0,58	1,01	0,53	0,25	0,77
5 (A)	10,50	8,81	9,54	7,16	7,31	7,27	5,83	5,84	5,85
7 (A)	6,43	5,22	3,99	1,22	1,31	0,14	0,31	0,44	0,23
9 (A)	1,83	1,27	0,69	0,31	0,65	0,68	0,23	0,15	0,59
11 (A)	2,25	1,86	1,83	0,68	1,02	0,73	0,72	0,36	0,57
13 (A)	1,50	1,42	0,61	0,59	0,82	0,08	0,51	0,43	0,07
DHT (%)	16,58	16,05	16,55	8,96	11,44	8,77	6,80	8,75	6,99

Fonte: elaborada pelo autor.

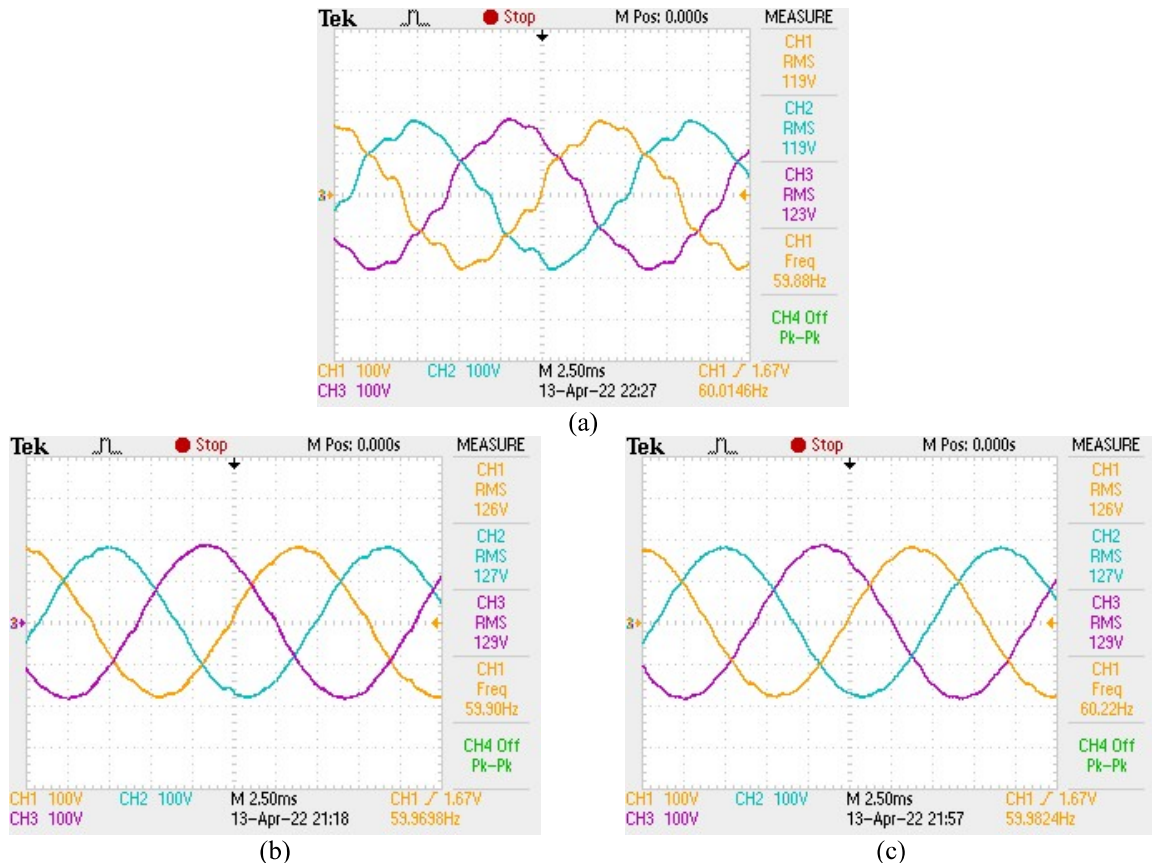


Figura 38 - (a) Tensão no PAC antes da compensação e (b) após a compensação usando as estratégias de controle FLC1, (c) FLC2 em C2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 35 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC em C2 antes e após a compensação harmônica

h	Antes da compensação			FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1 (V)	164,15	164,83	168,53	177,44	179,84	180,78	177,71	178,15	180,84
3 (V)	4,06	2,71	1,29	0,33	0,60	1,40	0,25	1,27	1,44
5 (V)	11,84	12,08	9,87	2,74	2,38	1,60	0,08	1,18	1,36
7 (V)	9,86	9,05	7,08	1,77	1,19	1,77	0,10	1,17	1,34
9 (V)	3,99	2,96	1,55	0,59	0,93	0,51	0,27	1,10	1,54
11 (V)	6,01	3,92	3,37	1,85	1,88	0,68	2,09	1,33	0,68
13 (V)	5,27	4,66	3,92	1,74	0,94	1,73	1,65	2,22	1,86
DHT (%)	11,63	9,28	8,07	2,49	2,22	2,39	1,57	2,18	2,36

Fonte: elaborada pelo autor.

Como os controladores FLC1 e FLC2 são projetados para amortecer as tensões harmônicas, eles não conseguem mitigar satisfatoriamente as correntes harmônicas em um cenário em que a tensão de alimentação possui harmônicos. Como em C2 a tensão do alimentador tem uma tensão de 5º harmônico de 0,04 pu, o filtro não consegue mitigar a corrente de 5º harmônico do alimentador de modo tão eficiente quanto ela mitiga demais ordens harmônicas, como pode ser visto na Tabela 34. Entretanto, as estratégias FLC1 e FLC2 amortecem

satisfatoriamente os harmônicos de tensão e o controlador do VSG regula a tensão em um valor próximo da referência definida no projeto, $V^* = 179,61$ V. As Tabelas 36 e 37 comparam o desempenho dos controladores FLC1 e FLC2 na compensação dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e na redução da DHT das correntes do alimentador e das tensões do PAC em C2, respectivamente.

Tabela 36 - Redução percentual dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e do DHT da corrente do alimentador após a compensação harmônica em C2

I_s	FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c
$h=5$	31,81%	30,38%	30,76%	44,48%	44,38%	44,29%
$h=7$	81,03%	79,63%	97,82%	95,18%	93,16%	96,42%
DHT	45,99%	31,03%	47,10%	58,97%	47,20%	57,86

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 37 - Redução percentual dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e do DHT da tensão do PAC após a compensação harmônica em C2

V_{PAC}	FLC1			FLC2		
	a	b	c	a	b	c
$h=5$	76,86%	79,90%	86,49%	99,32%	90,03%	88,51%
$h=7$	82,05%	87,93%	82,05%	98,99%	88,13%	86,41%
DHT	78,59%	80,94%	79,42%	86,46%	81,28%	79,71%

Fonte: elaborada pelo autor.

O controlador FLC2 consegue reduzir de maneira mais eficiente os harmônicos de 5ª ordem da corrente do alimentador das fases *a*, *b* e *c*. Também reduz significativamente os harmônicos de 7ª ordem da corrente do alimentador das fases *a* e *b* e tem um desempenho similar ao do controlador FLC1 na fase *c*. O controlador FLC2 reduz de maneira mais acentuada a DHT da corrente do alimentador. Na tensão no ponto de acoplamento, o controlador FLC2 tem um desempenho melhor que o controlador FLC1 na mitigação do harmônico de 5ª ordem da tensão do PAC nas fases *a* e *b* e tem um desempenho similar na compensação do harmônico de 5ª ordem na fase *c*. Na mitigação do harmônico de 7ª ordem da tensão do PAC, o controlador FLC2 tem um desempenho melhor que o controlador FLC1 nas fases *a* e *c* e ambos têm um desempenho similar na compensação deste harmônico na fase *b*. O controlador FLC2 reduz de maneira mais acentuada o DHT da corrente do alimentador e da tensão do PAC.

No cenário C2, as DHIs e as DHTs da corrente do alimentador antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias FLC1 e FLC2, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 38.

Tabela 38 - DHIs e DHTs da corrente do alimentador em C2 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			FLC1			FLC2			IEEE 519
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
3 (%)	7,6	3,9	6,0	0,8	0,9	1,2	0,6	0,4	0,9	4,0
5 (%)	12,0	13,3	14,1	8,7	10,9	8,6	6,7	8,7	6,8	4,0
7 (%)	7,4	7,9	5,9	1,5	2,0	0,2	0,4	0,7	0,3	4,0
9 (%)	2,1	1,9	1,0	0,4	1,0	0,8	0,3	0,2	0,7	4,0
11 (%)	2,6	2,8	2,7	0,8	1,5	0,9	0,8	0,5	0,7	2,0
13 (%)	1,7	2,1	0,9	0,7	1,2	0,1	0,6	0,6	0,1	2,0
DHT (%)	16,6	16,1	16,6	9,0	11,4	8,8	6,8	8,8	7,0	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, com exceção do 9º harmônico de corrente, as demais DHIs e as DHTs estavam acima do limite proposto pela norma IEEE 519-2022. Com o uso das estratégias FLC1 e FLC2, com exceção do DHI da 5ª ordem e da DHT, as demais DHIs ficaram dentro dos limites propostos.

As DHIs e a DHT da tensão do PAC antes e após a compensação harmônica, usando as estratégias FLC1 e FLC2, e os limites propostos na norma IEEE 519-2022 são mostradas na Tabela 39.

Tabela 39 - DHIs e DHTs da tensão do PAC em C2 antes e após a compensação harmônica

<i>h</i>	Antes da compensação			FLC1			FLC2			IEEE 519
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
3 (%)	2,5	1,6	0,8	0,2	0,3	0,8	0,1	0,7	0,8	5,0
5 (%)	7,2	7,3	5,9	1,5	1,3	0,9	0,0	0,7	0,8	5,0
7 (%)	6,0	5,5	4,2	1,0	0,7	1,0	0,1	0,7	0,7	5,0
9 (%)	2,4	1,8	0,9	0,3	0,5	0,3	0,2	0,6	0,9	5,0
11 (%)	3,7	2,4	2,0	1,0	1,0	0,4	1,2	0,7	0,4	5,0
13 (%)	3,2	2,8	2,3	1,0	0,5	1,0	0,9	1,2	1,0	5,0
DHT (%)	11,6	9,3	8,1	2,5	2,2	2,4	1,6	2,2	2,4	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Antes da compensação, as DHIs de 5ª e 7ª e a DHT estavam fora dos limites propostos pela norma IEEE 519-2022. Com o uso das estratégias FLC1 e FLC2, as DHIs e as DHTs ficam dentro dos limites propostos em todas as ordens harmônicas.

4.4 Aplicação do 3WFLC/SDFLC com passo adaptativo em dois inversores conectados a uma rede de distribuição com quatro barramentos

Nesta seção, dois inversores usando a estratégia de detecção FLC3 são aplicados em um sistema com quatro barramentos. Foram feitas três simulações em que os inversores e cargas

foram colocadas em barramentos diferentes do sistema, a fim de mostrar que estratégia de detecção FLC3 pode mitigar os harmônicos em sistemas com características distintas. A Tabela 40 mostra em quais barramentos os inversores e as cargas estão conectados em cada um dos cenários C3, C4 e C5.

Tabela 40 - Conexão dos inversores e cargas nos cenários C3, C4 e C5

Cenário	Inversor / Carga	Barramento		
		2	3	4
C3	Inversor 1		X	
	Inversor 2			X
	Carga 1	X		
	Carga 2			X
C4	Inversor 1	X		
	Inversor 2		X	
	Carga 1	X		
	Carga 2			X
C5	Inversor 1	X		
	Inversor 2			X
	Carga 1		X	
	Carga 2			X

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 39 mostra a visão geral do sistema simulador com quatro barramentos simulado no cenário C3. Neste cenário, os inversores são conectados aos barramentos 3 e 4 e duas cargas não lineares são conectadas aos barramentos 2 e 4. A partir das medições da tensão no barramento 2 (v_{BUS2}) da corrente do alimentador no trecho 12 (i_{S12}), os controladores dos inversores conectados aos barramentos 3 e 4 atuam de modo a amortecer a tensão do PAC de 5ª ordem do barramento 2. Os parâmetros do sistema e do VSG são mostrados na Tabela 41, as potências e o DHT das cargas nos cenários C3, C4 e C5 são mostrados na Tabela 42 e os ganhos dos controladores, determinados empiricamente, são mostrados na Tabela 43. A fonte de tensão do sistema é ideal e as cargas harmônicas são modeladas como fontes de correntes e seu conteúdo harmônico é mostrado no Apêndice C. A fim de verificar o comportamento do ganho adaptativo, a carga do sistema foi alterada em dois instantes.

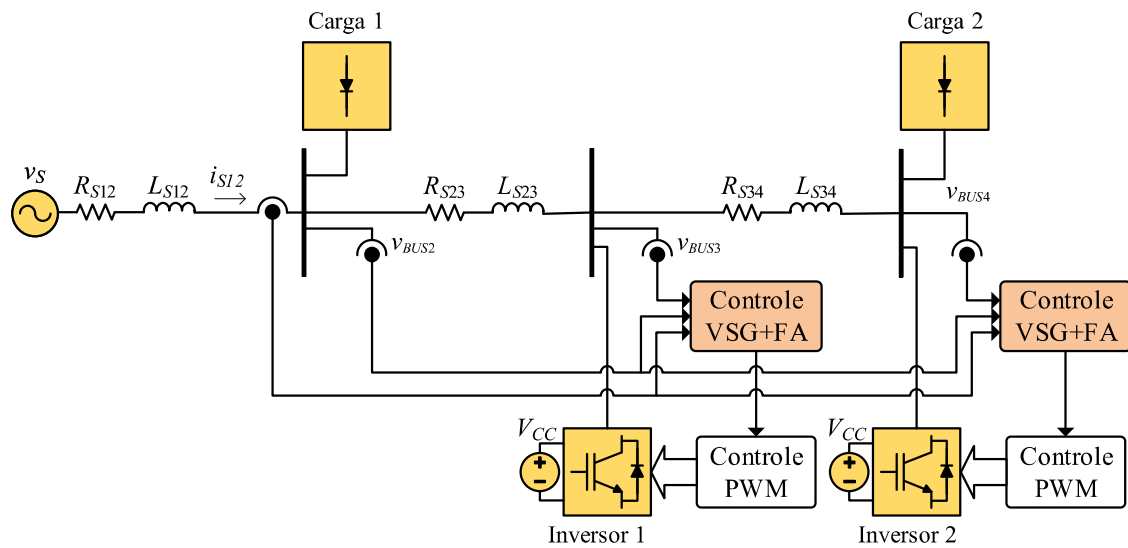


Figura 39 - Visão geral do sistema com quatro barramentos
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 41 - Parâmetros do sistema de distribuição e do VSG

Parâmetros	Valores
Tensão de linha do alimentador	220 V
Resistência do alimentador, trecho 12 (R_{S12})	0,02 Ω
Indutância do alimentador, trecho 12 (L_{S12})	0,18 mH
Resistência do alimentador, trecho 23 (R_{S23})	0,05 Ω
Indutância do alimentador, trecho 23 (L_{S23})	0,18 mH
Resistência do alimentador, trecho 34 (R_{S34})	0,05 Ω
Indutância do alimentador, trecho 34 (L_{S34})	0,18 mH
Tensão do elo CC (V_{DC})	500 V
Resistência do VSG (R_{vsg})	0,05 Ω
Indutância do VSG ($L_{vsg} = L_1 + L_f$)	0,1613 mH
Momento de inércia virtual (J)	200 kg.m ²
Coefficiente de amortecimento (D)	0,3
Coefficiente <i>Droop</i> (D_p)	20

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 42 - Potências ativa e reativa e DHT das cargas nos cenários C3, C4 e C5

Intervalo	Parâmetro	Cenário C3		Cenário C4		Cenário C5	
		Carga 1	Carga 2	Carga 1	Carga 2	Carga 1	Carga 2
$t \leq 2$ s	P_L (kW)	9,66	18,57	7,45	14,89	10,80	10,70
	Q_L (kvar)	2,76	4,19	2,66	4,53	4,73	4,14
	I_{La} - DHT (%)	10,88	10,88	6,29	6,29	6,29	6,29
	I_{Lb} - DHT (%)	11,49	11,49	6,49	6,49	6,49	6,49
	I_{Lc} - DHT (%)	13,44	13,44	10,03	10,03	10,03	10,03
2 s < $t \leq 3$ s	P_L (kW)	7,60	14,68	8,87	17,19	12,77	12,56
	Q_L (kvar)	2,46	3,71	2,73	4,32	3,26	2,95
	I_{La} - DHT (%)	7,12	7,12	10,88	10,88	8,73	8,73
	I_{Lb} - DHT (%)	7,44	7,44	11,49	11,49	9,21	9,21
	I_{Lc} - DHT (%)	10,58	10,58	13,44	13,44	11,74	11,74
$t > 3$ s	P_L (kW)	8,09	15,67	8,26	16,07	13,27	12,98
	Q_L (kvar)	2,77	4,46	3,01	5,11	2,34	1,97
	I_{La} - DHT (%)	9,11	9,11	7,94	7,94	10,88	10,88
	I_{Lb} - DHT (%)	9,62	9,62	6,62	6,62	11,49	11,49
	I_{Lc} - DHT (%)	12,03	12,03	4,05	4,05	13,44	13,44

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 43 - Ganhos do controlador PI-RES

Parâmetros	Estratégia de controle – FLC3
Ganho proporcional (K_p)	0,25
Ganho integral (K_i)	10
Ganho ressonante (K_r)	250

Fonte: elaborada pelo autor.

Os ganhos do controlador FLC3 para harmônico de 7ª ordem e para demais ordens harmônicas, excluindo os harmônicos de 5ª e 7ª ordem, são $k_{v7} = 4,0$ e $k_v = 1,5$, respectivamente. O ganho com passo adaptativo k_{v5} tem ganho inicial $k_{v5} = 0,5$ e passo de tensão do ganho $\Delta k_{v5} = 0,1$ e passo de corrente do ganho $\Delta k_{i5} = 0,075$.

4.4.1 Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C3

O perfil das tensões e das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e o ganho adaptativo k_{v5} são mostrados na Figura 40.

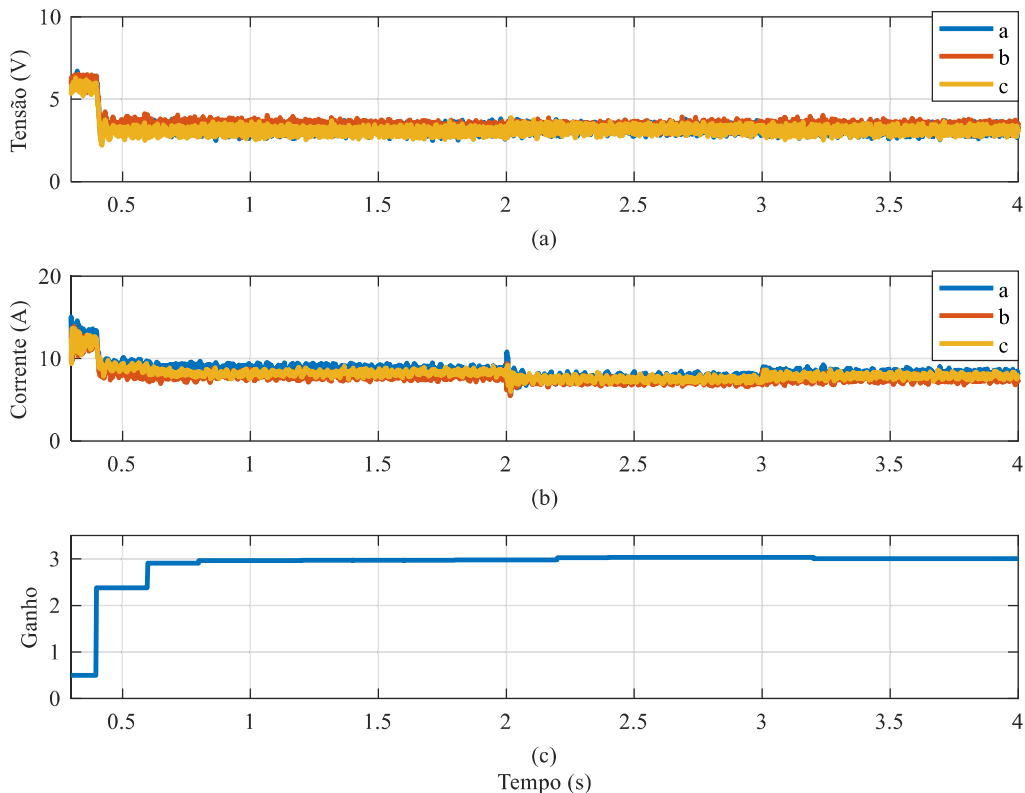


Figura 40 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo k_{v5} em C3

Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 40, a partir de $t = 0,6$ s, a alteração do valor do ganho adaptativo não consegue alterar significativamente o harmônico de 5ª ordem da tensão no barramento 2. A partir de $t = 0,8$ s, a diferença entre as tensões medidas nos instantes k e $k-1$ (v_{5_k} e $v_{5_{(k-1)}}$, respectivamente) diminui, fazendo com que o ganho adaptativo k_{v5} tenda a estabilizar. Apesar da tensão se estabilizar, a alteração da carga faz com que o ganho se altere nos instantes $t = 2,0$ s e $t = 3,0$ s. Em $t = 2,0$ s, o erro entre as correntes medidas nos instantes k e $k-1$ (i_{5_k} e $i_{5_{(k-1)}}$, respectivamente) diminui, fazendo com que o ganho adaptativo aumente. Em $t = 3,0$ s, o erro entre i_{5_k} e $i_{5_{(k-1)}}$ aumenta, fazendo com que o ganho adaptativo diminua.

As Figuras 41, 42 e 43 mostram as tensões nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C3.

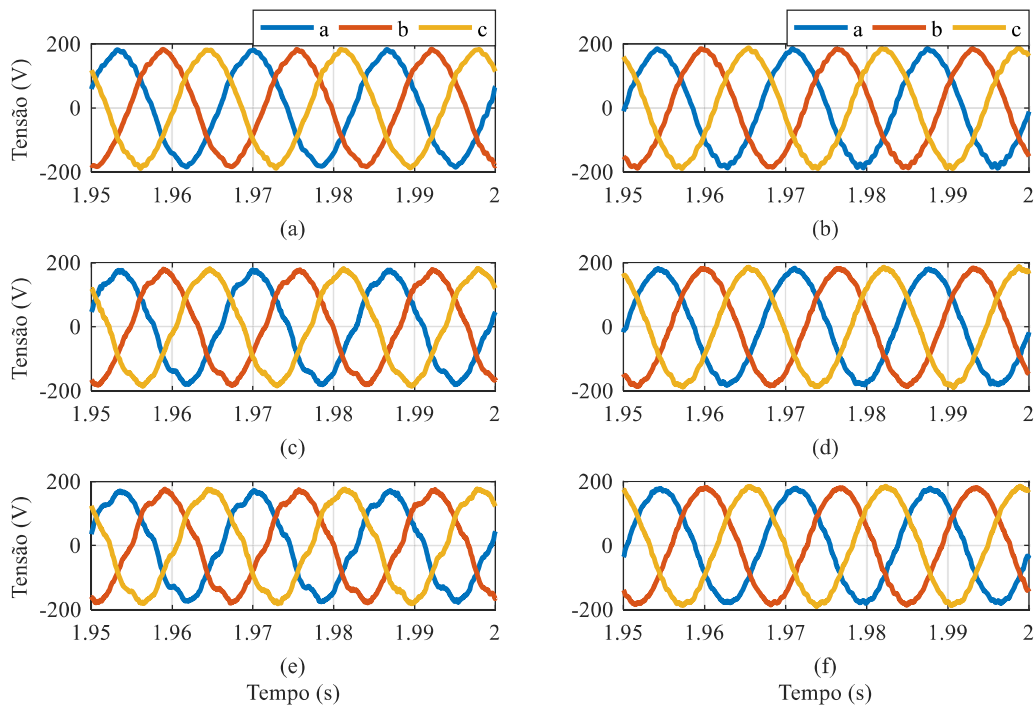


Figura 41 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 2$ s

Fonte: elaborada pelo autor.

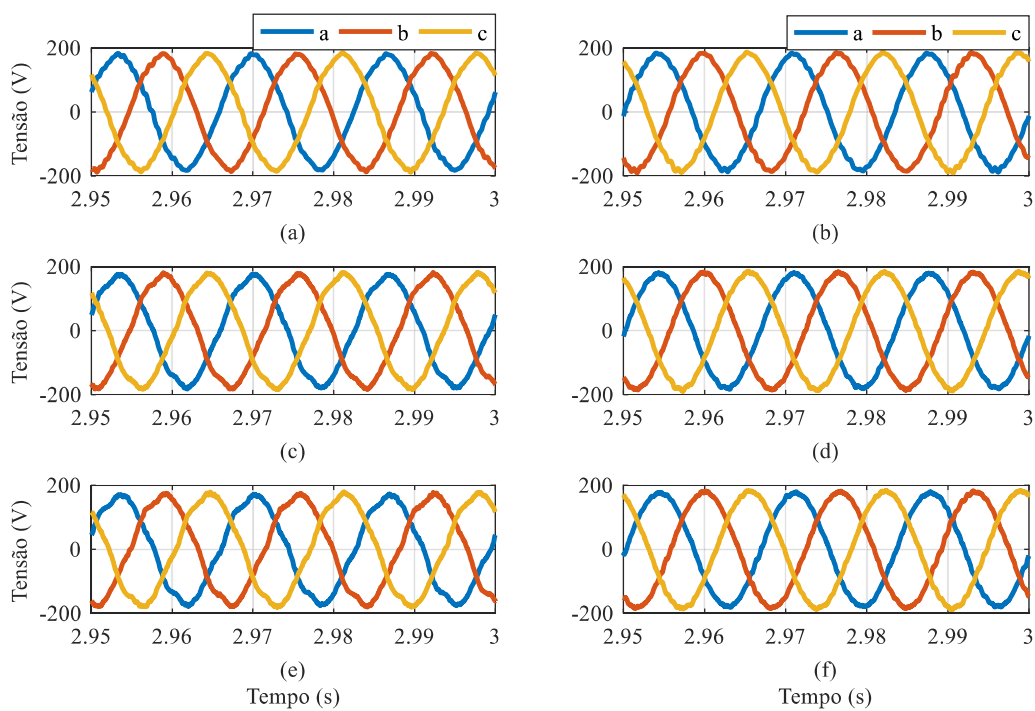


Figura 42 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 3$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

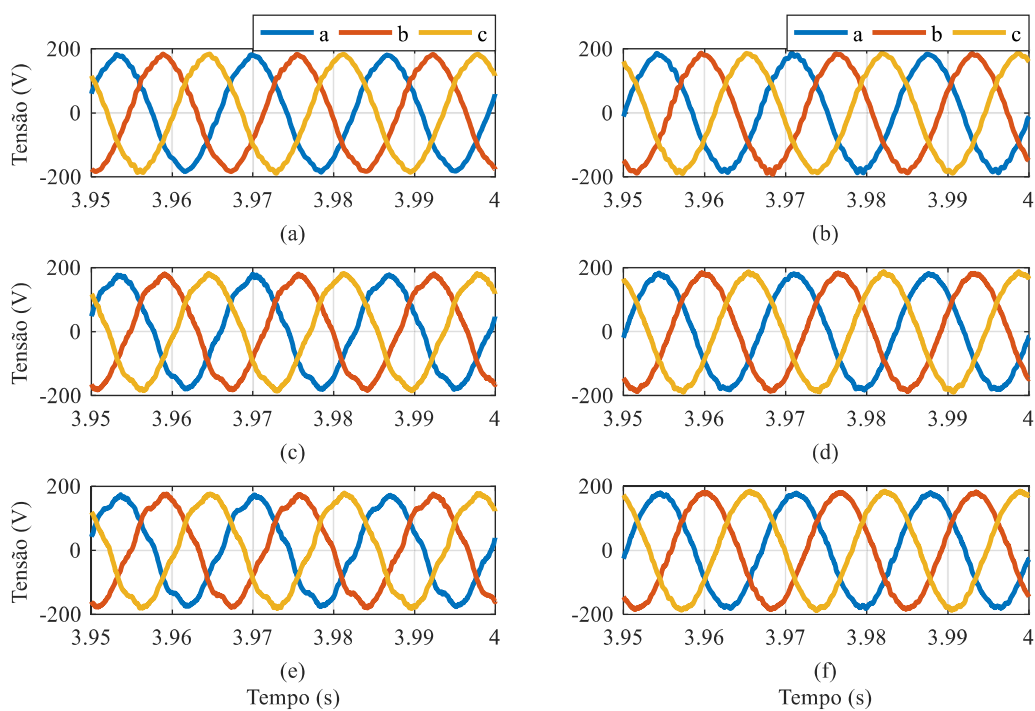


Figura 43 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 4$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 44 mostra a amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e a DHT das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3 no cenário C3. Analisando a Tabela 44, é perceptível, em um cenário sem amortecimento da tensão harmônica, que a DHT aumenta à medida que o barramento em análise está mais distante do barramento 1, que é a fonte de tensão do sistema. Com a compensação, com exceção dos harmônicos da fase B no barramento 2 em $t = 3,0$ s, é possível amortecer significativamente a distorção de tensão presente no sistema, como pode ser visto na Tabela 44.

Tabela 44 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C3

t (s)	Barramento	h	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	2	5 (V)	4,28	5,37	3,64	3,11	2,57	2,70	-27,3	-52,1	-25,8
		7 (V)	2,72	3,29	3,39	1,14	0,48	0,93	-58,1	-85,4	-72,6
		DHT (%)	3,00	3,93	3,42	2,20	2,21	2,11	-26,7	-43,6	-38,2
	3	5 (V)	8,19	7,04	5,46	1,43	2,42	1,75	-82,5	-65,6	-67,9
		7 (V)	5,72	4,44	5,61	1,36	2,54	0,85	-76,2	-42,8	-84,8
		DHT (%)	5,98	5,04	5,08	1,54	2,29	1,83	-74,3	-54,6	-63,9
	4	5 (V)	11,24	9,95	9,55	2,28	2,44	2,66	-79,7	-75,5	-72,1
		7 (V)	6,69	5,77	4,66	1,97	1,70	1,45	-70,6	-70,5	-68,9
		DHT (%)	8,00	6,97	6,33	1,94	1,99	2,42	-75,8	-71,5	-61,8
3	2	5 (V)	3,79	3,66	3,68	3,15	4,59	2,85	-16,9	25,4	-22,6
		7 (V)	1,73	1,24	0,72	0,62	1,92	0,62	-64,2	54,8	-13,9
		DHT (%)	2,44	2,46	2,33	1,96	3,23	2,05	-19,8	31,3	-12,3
	3	5 (V)	5,73	6,18	4,16	1,36	2,58	1,61	-76,3	-58,3	-61,3
		7 (V)	3,71	4,30	3,96	0,50	2,11	0,41	-86,5	-50,9	-89,6
		DHT (%)	4,04	4,67	3,91	1,06	2,37	1,54	-73,8	-49,3	-60,7
	4	5 (V)	8,00	7,74	7,64	1,86	1,76	0,41	-76,8	-77,3	-94,6
		7 (V)	3,78	3,75	2,61	1,02	0,79	1,99	-73,0	-78,9	-23,8
		DHT (%)	5,34	5,20	4,80	1,38	1,51	2,18	-74,2	-71,0	-54,6
4	2	5 (V)	3,92	3,87	3,82	3,21	2,75	2,69	-18,1	-28,9	-29,6
		7 (V)	2,50	1,70	1,14	0,96	0,41	0,86	-61,6	-75,9	-24,6
		DHT (%)	2,72	2,60	2,44	1,96	2,09	2,15	-27,9	-19,5	-11,7
	3	5 (V)	6,83	6,74	4,91	1,57	1,23	1,59	-77,0	-81,8	-67,6
		7 (V)	4,50	5,11	5,09	0,97	0,81	0,55	-78,4	-84,1	-89,2
		DHT (%)	4,92	5,15	4,58	1,41	1,58	1,64	-71,3	-69,3	-64,2
	4	5 (V)	9,44	9,07	7,23	2,17	1,93	2,54	-77,0	-78,7	-64,9
		7 (V)	5,33	5,88	5,62	1,73	1,23	1,08	-67,5	-79,1	-80,8
		DHT (%)	6,61	6,73	5,74	1,82	1,86	2,11	-72,5	-72,4	-63,2

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 45 mostra as DHIs e a DHT das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C3 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 45 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C3

t (s)	Barramento	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	2	5 (%)	2,4	3,1	2,1	1,7	1,4	1,5	5,0
		7 (%)	1,5	1,9	1,9	0,6	0,3	0,5	5,0
		DHT (%)	3,0	3,9	3,4	2,2	2,2	2,1	8,0
	3	5 (%)	4,8	4,1	3,1	0,8	1,4	1,0	5,0
		7 (%)	3,3	2,6	3,2	0,8	1,4	0,5	5,0
		DHT (%)	6,0	5,0	5,1	1,5	2,3	1,8	8,0
	4	5 (%)	6,8	5,9	5,5	1,3	1,4	1,5	5,0
		7 (%)	4,0	3,4	2,7	1,1	0,9	0,8	5,0
		DHT (%)	8,0	7,0	6,3	1,9	2,0	2,4	8,0
3	2	5 (%)	2,1	2,1	2,1	1,8	2,6	1,6	5,0
		7 (%)	1,0	0,7	0,4	0,3	1,1	0,3	5,0
		DHT (%)	2,4	2,5	2,3	2,0	3,2	2,0	8,0
	3	5 (%)	3,3	3,6	2,4	0,8	1,4	0,9	5,0
		7 (%)	2,2	2,5	2,3	0,3	1,2	0,2	5,0
		DHT (%)	4,0	4,7	3,9	1,1	2,4	1,5	8,0
	4	5 (%)	4,8	4,5	4,4	1,0	1,0	0,2	5,0
		7 (%)	2,3	2,2	1,5	0,6	0,4	1,1	5,0
		DHT (%)	5,3	5,2	4,8	1,4	1,5	2,2	8,0
4	2	5 (%)	2,2	2,2	2,1	1,8	1,5	1,5	5,0
		7 (%)	1,4	1,0	0,6	0,5	0,2	0,5	5,0
		DHT (%)	2,7	2,6	2,4	2,0	2,1	2,2	8,0
	3	5 (%)	4,0	3,9	2,8	0,9	0,7	0,9	5,0
		7 (%)	2,6	3,0	2,9	0,5	0,4	0,3	5,0
		DHT (%)	4,9	5,2	4,6	1,4	1,6	1,6	8,0
	4	5 (%)	5,7	5,4	4,2	1,2	1,1	1,4	5,0
		7 (%)	3,2	3,5	3,3	1,0	0,7	0,6	5,0
		DHT (%)	6,6	6,7	5,7	1,8	1,9	2,1	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C3 antes da compensação, somente as DHIs de 5ª ordem no barramento 4 nos instantes $t = 2$ s e $t = 4$ s e do DHT da fase a do barramento 4 estão acima dos valores propostos na norma. Com a compensação, estes valores ficam dentro dos valores estabelecidos na norma e as demais DHIs e DHTs tem seus valores reduzidos, como mostrado na Tabela 45.

As Figuras 44, 45 e 46 mostram as correntes nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C3.

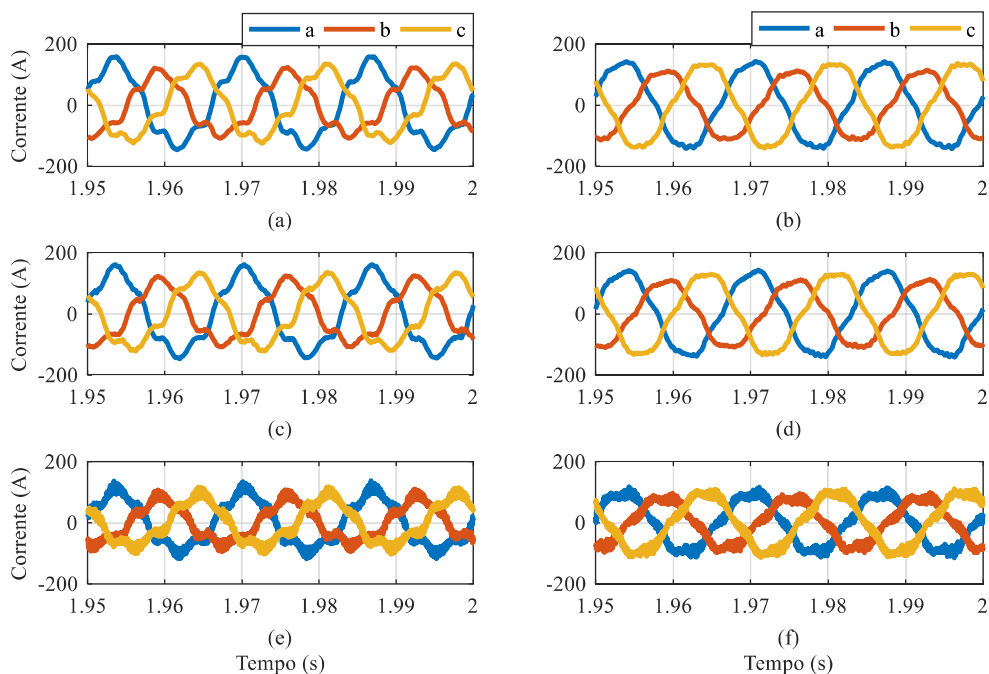


Figura 44 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 2$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

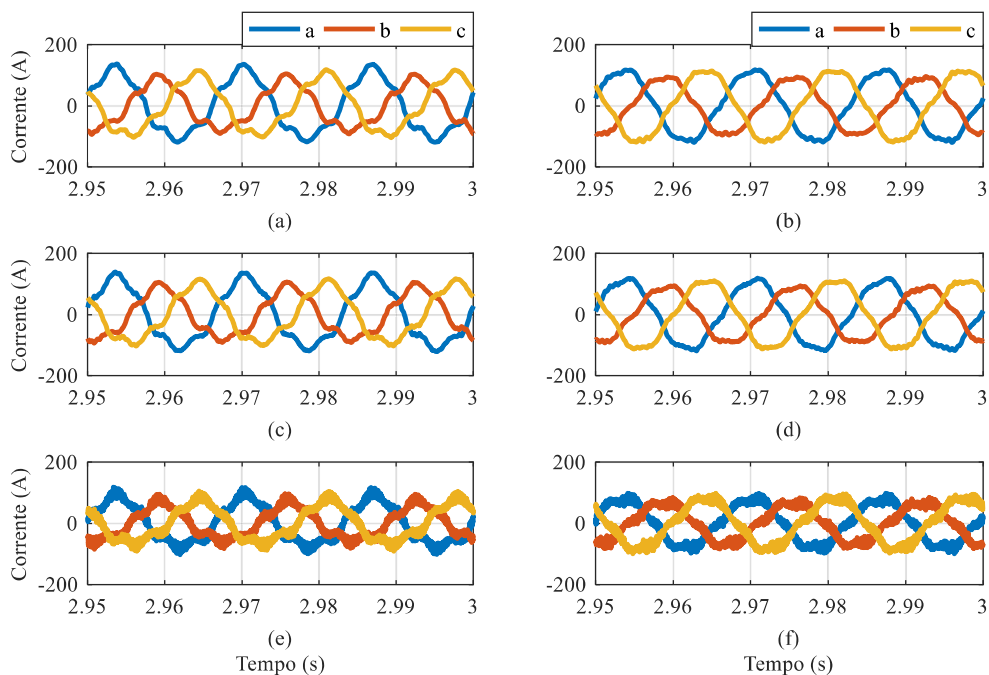


Figura 45 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 3$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

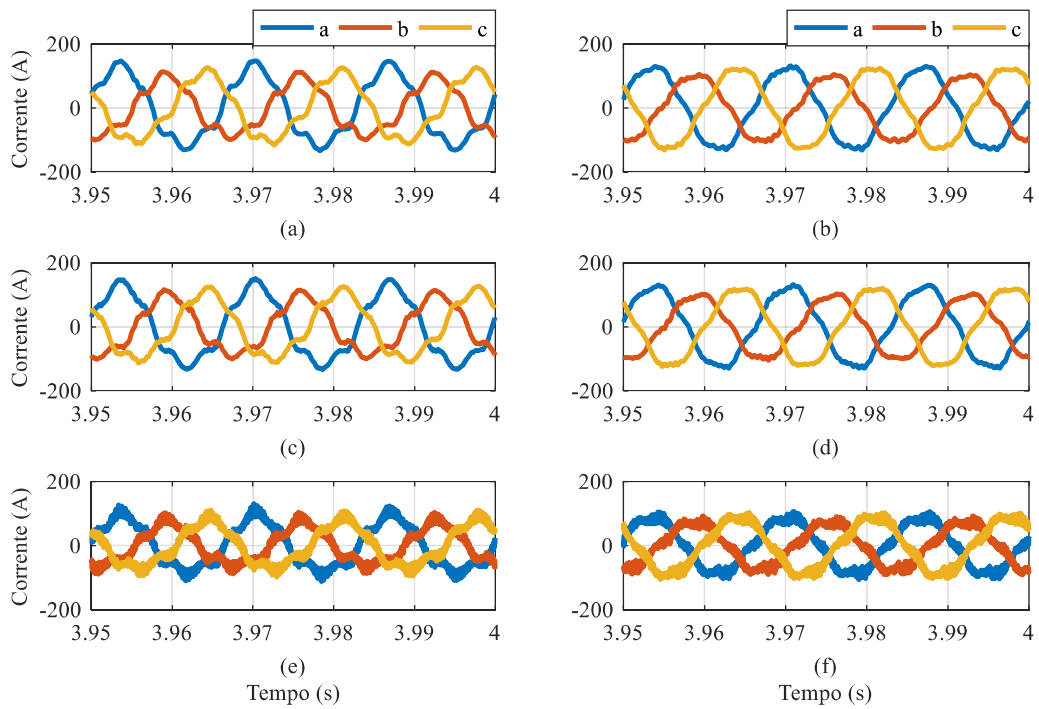


Figura 46 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C3 para $t = 4$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 46 mostra a amplitude dos harmônicos de 5^a e 7^a ordens e a DHT das correntes nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3. Como o controlador FLC3 foi projetado para amortecer as tensões harmônicas do sistema, ele não mitiga o 5^o harmônico de corrente com a mesma eficácia com que amortece o 5^o harmônico de tensão. Entretanto, é notável que o controlador FLC3 reduz satisfatoriamente os harmônicos de 5^a e 7^a ordens e a DHT das correntes, como pode ser visto na Tabela 46.

Tabela 46 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C3

<i>t</i> (s)	Alimen- tador	<i>h</i>	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	12	5 (A)	17,66	16,18	16,05	8,74	7,44	8,33	-50,5	-54,0	-48,1
		7 (A)	5,99	5,52	4,29	2,66	2,39	1,89	-55,6	-56,7	-55,9
		DHT (%)	13,56	16,84	14,24	6,61	6,94	6,29	-51,3	-58,8	-55,8
	23	5 (A)	17,90	15,68	15,79	9,55	9,41	8,85	-46,6	-40,0	-44,0
		7 (A)	5,64	4,45	4,25	2,42	2,05	0,90	-57,1	-53,9	-78,8
		DHT (%)	13,55	15,60	14,03	7,22	9,15	6,86	-46,7	-41,3	-51,1
	34	5 (A)	14,38	12,89	12,70	8,47	8,27	8,60	-41,1	-35,8	-32,3
		7 (A)	3,95	3,30	3,27	1,96	1,57	1,78	-50,4	-52,4	-45,6
		DHT (%)	16,54	19,65	17,23	9,71	10,83	9,37	-41,3	-44,9	-45,6
3	12	5 (A)	13,96	13,01	12,39	7,71	7,87	7,52	-44,8	-39,5	-39,3
		7 (A)	3,12	3,20	2,90	1,29	1,44	1,09	-58,7	-55,0	-62,4
		DHT (%)	12,44	15,71	12,67	6,84	8,76	6,59	-45,0	-44,2	-48,0
	23	5 (A)	13,24	13,14	12,28	8,44	7,74	7,98	-36,3	-41,1	-35,0
		7 (A)	2,75	3,23	1,88	1,13	1,38	0,37	-58,9	-57,3	-80,3
		DHT (%)	11,68	15,53	12,74	7,48	8,69	7,42	-36,0	-44,0	-41,8
	34	5 (A)	11,74	10,76	10,91	8,04	7,61	7,57	-31,5	-29,3	-30,6
		7 (A)	2,2	2,09	2,13	1,14	0,7	1,23	-48,2	-66,5	-42,3
		DHT (%)	15,77	19,34	17,15	10,86	12,13	10,17	-31,1	-37,3	-40,7
4	12	5 (A)	15,97	14,19	13,85	8,35	7,27	7,75	-47,7	-48,8	-44,0
		7 (A)	4,69	4,26	3,98	2,03	1,94	1,67	-56,7	-54,5	-58,0
		DHT (%)	13,15	15,75	13,25	6,87	7,34	6,40	-47,7	-53,4	-51,7
	23	5 (A)	15,32	14,04	14,44	9,20	8,00	8,69	-39,9	-43,0	-39,8
		7 (A)	3,80	4,33	3,08	1,67	1,71	1,39	-56,1	-60,5	-54,9
		DHT (%)	12,42	15,45	13,93	7,49	8,20	7,25	-39,7	-46,9	-48,0
	34	5 (A)	12,93	12,22	11,74	8,59	8,56	7,84	-33,6	-30,0	-33,2
		7 (A)	3,21	2,46	2,77	1,74	2,01	1,64	-45,8	-18,3	-40,8
		DHT (%)	16,03	20,02	17,07	10,63	12,56	9,41	-33,7	-37,3	-44,9

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 47 mostra as DHIs e a DHT das correntes dos alimentadores dos trechos 12, 23 e 34 antes a após a compensação no cenário C3 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 47 - DHIs e DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C3

t (s)	Alimentador	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	12	5 (%)	12,8	15,8	13,6	6,2	6,5	6,0	7,0
		7 (%)	4,3	5,4	3,6	1,9	2,1	1,4	7,0
		DHT (%)	13,6	16,8	14,2	6,6	6,9	6,3	8,0
	23	5 (%)	12,9	15,0	13,5	6,9	8,6	6,6	4,0
		7 (%)	4,1	4,3	3,6	1,8	1,9	0,7	4,0
		DHT (%)	13,5	15,6	14,0	7,2	9,2	6,9	5,0
	34	5 (%)	15,9	19,0	16,6	9,2	10,5	9,0	4,0
		7 (%)	4,4	4,9	4,3	2,1	2,0	1,9	4,0
		DHT (%)	16,5	19,7	17,2	9,7	10,8	9,4	5,0
3	12	5 (%)	12,1	15,2	12,3	6,5	8,3	6,4	7,0
		7 (%)	2,7	3,7	2,9	1,1	1,5	0,9	7,0
		DHT (%)	12,4	15,7	12,7	6,8	8,8	6,6	8,0
	23	5 (%)	11,4	15,0	12,4	7,3	8,4	7,2	4,0
		7 (%)	2,4	3,7	1,9	1,0	1,5	0,3	4,0
		DHT (%)	11,7	15,5	12,7	7,5	8,7	7,4	5,0
	34	5 (%)	15,4	18,9	16,7	10,6	11,7	9,7	4,0
		7 (%)	2,9	3,7	3,3	1,5	1,1	1,6	4,0
		DHT (%)	15,8	19,3	17,2	10,9	12,1	10,2	5,0
4	12	5 (%)	12,6	15,0	12,6	6,5	6,9	6,1	7,0
		7 (%)	3,7	4,5	3,6	1,6	1,8	1,3	7,0
		DHT (%)	13,1	15,7	13,3	6,9	7,3	6,4	8,0
	23	5 (%)	12,0	14,7	13,5	7,3	7,9	7,1	4,0
		7 (%)	3,0	4,5	2,9	1,3	1,7	1,1	4,0
		DHT (%)	12,4	15,5	13,9	7,5	8,2	7,2	5,0
	34	5 (%)	15,5	19,6	16,5	10,2	12,0	9,0	4,0
		7 (%)	3,9	3,9	3,9	2,1	2,8	1,9	4,0
		DHT (%)	16,0	20,0	17,1	10,6	12,6	9,4	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C3 antes da compensação, as DHIs de 5ª ordem, algumas DHIs de 7ª ordem nos trechos 23 nos instantes $t = 2$ s e $t = 4$ s, e as DHTs estão acima dos limites propostos na norma IEEE 519-2022. Com a compensação harmônica, as DHIs e DHTs diminuem e, em alguns casos, ficam dentro dos limites estabelecidos pela norma. Como esta estratégia de detecção harmônica visa amortecer os harmônicos de tensão presentes no sistema elétrico, a mitigação das correntes harmônicas nos alimentadores não é tão eficiente quando o amortecimento propagação das tensões harmônicas.

4.4.2 Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C4

O perfil das tensões e das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e o ganho adaptativo $k_{v,5}$ são mostrados na Figura 47.

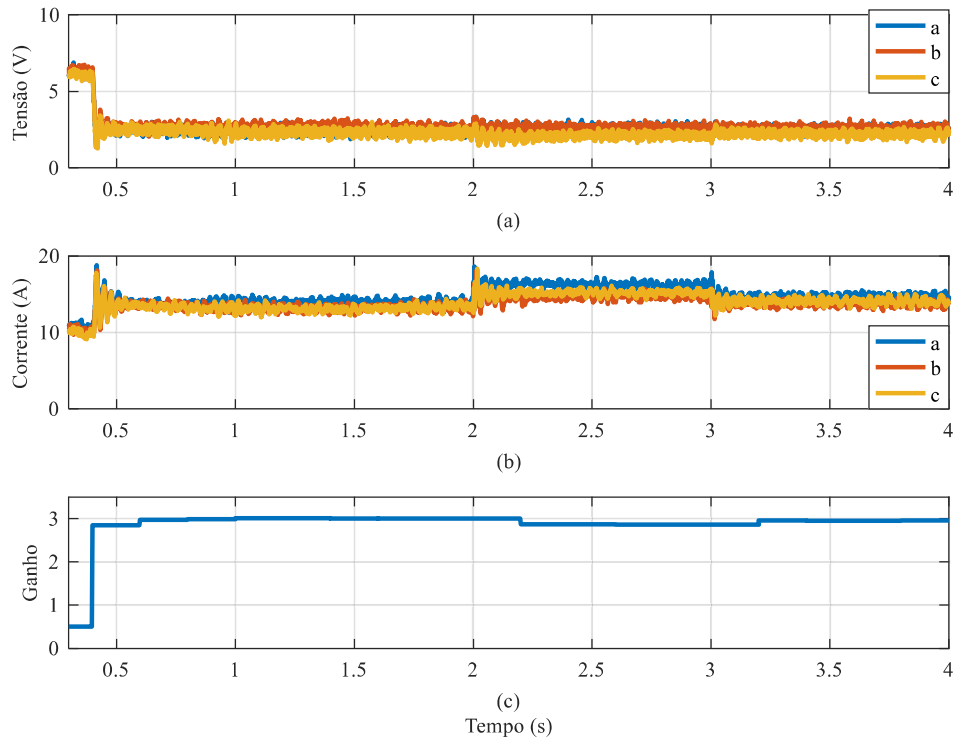


Figura 47 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo $k_{v,5}$ em C4
 Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 47, os harmônicos de tensão se estabilizam em $t = 0.4$ s e o ganho adaptativo $k_{v,5}$ é estabilizado em $t = 0.6$ s. Apesar da tensão se estabilizar, a alteração da carga faz com que o ganho se altere nos instantes $t = 2,0$ s e $t = 3,0$ s. Em $t = 2,0$ s, o erro entre i_{5k} e $i_{5(k-1)}$ aumenta, fazendo com que o ganho adaptativo diminua. Em $t = 3,0$ s, o erro entre i_{5k} e $i_{5(k-1)}$ diminui, fazendo com que o ganho adaptativo aumente.

As Figuras 48, 49 e 50 mostram as tensões nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C4.

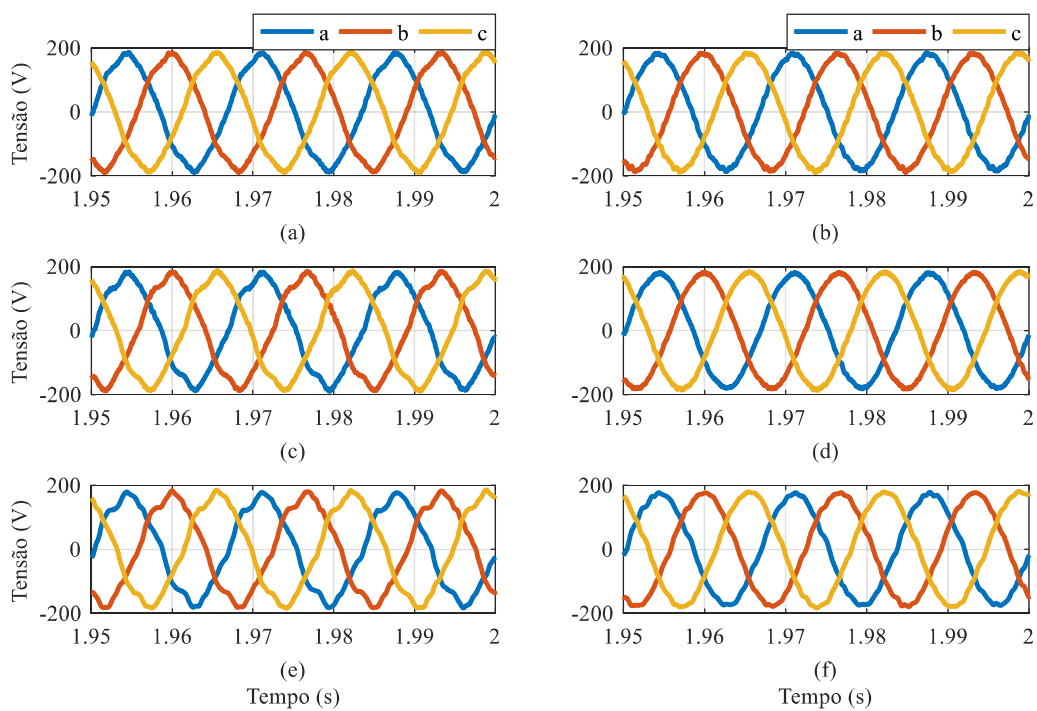


Figura 48 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 2$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

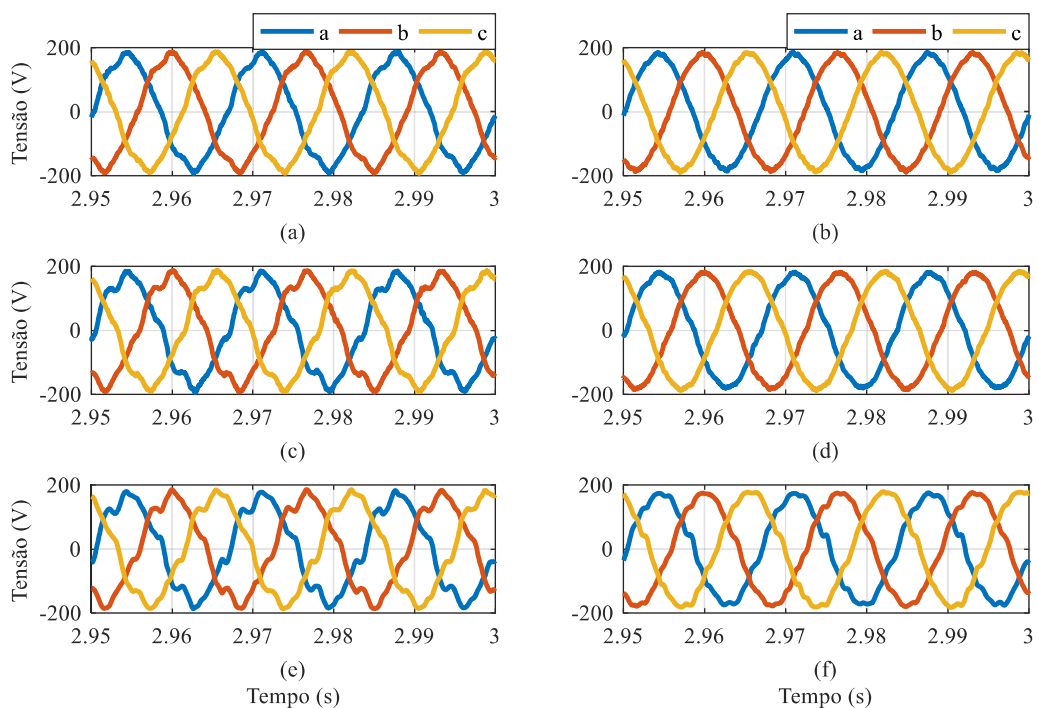


Figura 49 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 3$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

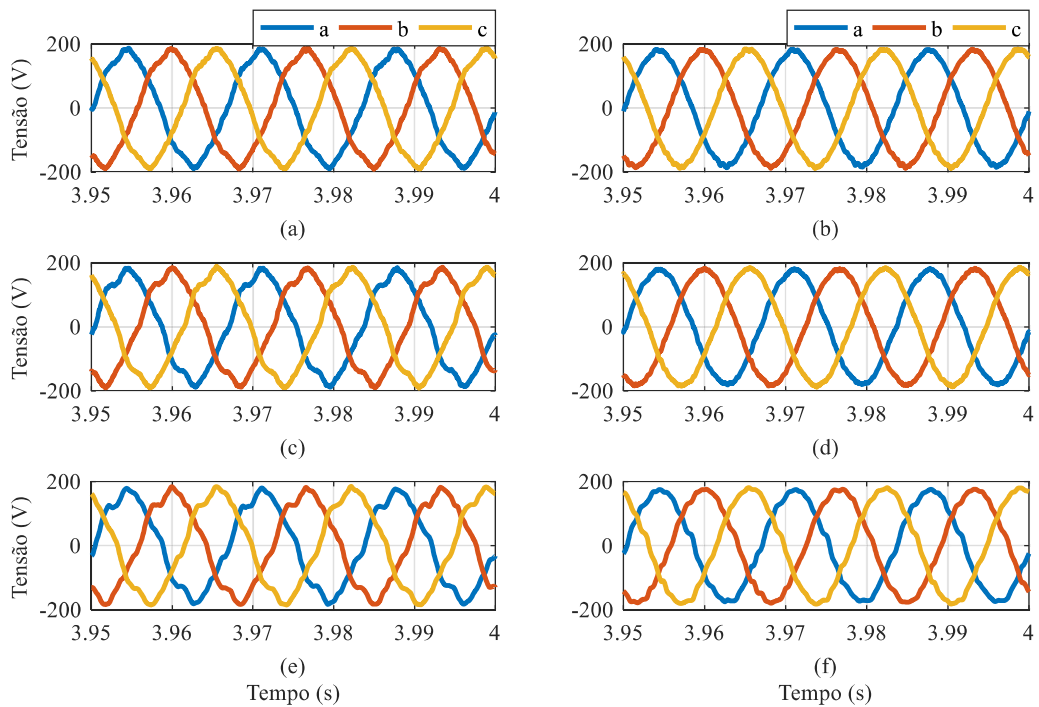


Figura 50 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 4$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 48 mostra a amplitude dos harmônicos de 5^a e 7^a ordens e o DHT das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3. Analisando a Tabela 48, é perceptível, em um cenário sem amortecimento da tensão harmônica, que o DHT é aumentado à medida que o barramento em análise está mais distante do barramento 1, que é a fonte de tensão do sistema. Com a compensação, é possível amortecer significativamente a distorção de tensão presente no sistema.

Tabela 48 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C4

<i>t</i> (s)	Barra- mento	<i>h</i>	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	2	5 (V)	6,52	6,02	6,12	2,49	2,04	2,20	-61,8	-66,1	-64,1
		7 (V)	2,76	2,15	2,00	0,56	0,20	0,53	-79,7	-90,7	-73,5
		DHT (%)	4,06	3,73	3,75	1,53	1,39	1,62	-62,2	-62,6	-56,6
	3	5 (V)	9,34	9,74	8,35	2,55	2,23	2,69	-72,7	-77,1	-67,8
		7 (V)	5,26	5,46	5,62	1,29	0,24	1,02	-75,5	-95,6	-81,9
		DHT (%)	6,26	6,66	6,09	1,78	1,62	2,03	-71,6	-75,7	-66,6
	5	5 (V)	11,68	10,88	10,36	3,80	3,47	1,92	-67,5	-68,1	-81,5
		7 (V)	6,30	5,05	3,65	2,38	3,10	2,19	-62,2	-38,6	-40,0
		DHT (%)	7,94	7,08	6,38	2,97	3,39	3,09	-62,6	-52,1	-51,5
3	2	5 (V)	7,95	8,49	7,07	2,52	2,09	2,32	-68,3	-75,4	-67,2
		7 (V)	6,29	5,65	4,18	1,67	0,71	1,13	-73,4	-87,4	-73,0
		DHT (%)	5,88	6,04	4,74	1,86	1,83	1,84	-68,4	-69,7	-61,2
	3	5 (V)	13,36	11,92	10,01	3,65	3,21	1,71	-72,7	-73,1	-82,9
		7 (V)	11,19	8,60	9,03	3,28	3,66	3,40	-70,7	-57,4	-62,3
		DHT (%)	10,35	8,69	8,10	3,19	3,40	3,10	-69,2	-60,8	-61,7
	4	5 (V)	16,33	16,22	12,94	5,89	4,70	5,35	-63,9	-71,0	-58,7
		7 (V)	12,94	10,93	10,66	5,80	4,11	4,47	-55,2	-62,4	-58,1
		DHT (%)	12,78	11,86	10,13	5,84	3,85	4,81	-54,3	-67,5	-52,5
4	2	5 (V)	6,95	6,42	6,57	2,33	3,61	2,33	-66,5	-43,8	-64,5
		7 (V)	4,07	3,31	2,57	0,87	1,92	0,80	-78,6	-42,0	-68,9
		DHT (%)	4,63	4,24	4,07	1,66	2,98	1,69	-64,2	-29,8	-58,4
	3	5 (V)	10,72	10,35	9,59	2,90	2,84	1,16	-72,9	-72,6	-87,9
		7 (V)	7,20	5,92	5,26	1,81	2,77	2,35	-74,9	-53,2	-55,3
		DHT (%)	7,56	7,02	6,31	2,31	2,85	2,66	-69,5	-59,5	-57,9
	4	5 (V)	12,77	12,44	11,58	4,57	3,58	2,45	-64,2	-71,2	-78,8
		7 (V)	8,31	6,99	5,20	3,52	2,08	2,62	-57,6	-70,2	-49,6
		DHT (%)	9,15	8,46	7,46	4,00	2,81	3,07	-56,3	-66,7	-58,9

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 49 mostra as DHIs e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C4 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 49 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C4

t (s)	Barramento	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	2	5 (%)	3,7	3,4	3,4	1,4	1,1	1,3	5,0
		7 (%)	1,6	1,2	1,1	0,3	0,1	0,3	5,0
		DHT (%)	4,1	3,7	3,7	1,5	1,4	1,6	8,0
	3	5 (%)	5,4	5,6	4,8	1,4	1,2	1,5	5,0
		7 (%)	3,0	3,2	3,2	0,7	0,1	0,6	5,0
		DHT (%)	6,3	6,7	6,1	1,8	1,6	2,0	8,0
	4	5 (%)	6,9	6,3	5,9	2,2	2,0	1,1	5,0
		7 (%)	3,7	2,9	2,1	1,4	1,8	1,2	5,0
		DHT (%)	7,9	7,1	6,4	3,0	3,4	3,1	8,0
3	2	5 (%)	4,5	4,8	3,9	1,4	1,2	1,3	5,0
		7 (%)	3,6	3,2	2,3	0,9	0,4	0,6	5,0
		DHT (%)	5,9	6,0	4,7	1,9	1,8	1,8	8,0
	3	5 (%)	7,8	6,9	5,7	2,1	1,8	0,9	5,0
		7 (%)	6,5	5,0	5,2	1,8	2,1	1,9	5,0
		DHT (%)	10,4	8,7	8,1	3,2	3,4	3,1	8,0
	4	5 (%)	9,8	9,7	7,5	3,4	2,7	3,0	5,0
		7 (%)	7,8	6,5	6,2	3,3	2,3	2,5	5,0
		DHT (%)	12,8	11,9	10,1	5,8	3,9	4,8	8,0
4	2	5 (%)	3,9	3,6	3,7	1,3	2,0	1,3	5,0
		7 (%)	2,3	1,9	1,4	0,5	1,1	0,4	5,0
		DHT (%)	4,6	4,2	4,1	1,7	3,0	1,7	8,0
	3	5 (%)	6,2	6,0	5,4	1,6	1,6	0,6	5,0
		7 (%)	4,2	3,4	3,0	1,0	1,6	1,3	5,0
		DHT (%)	7,6	7,0	6,3	2,3	2,8	2,7	8,0
	4	5 (%)	7,6	7,3	6,6	2,6	2,0	1,4	5,0
		7 (%)	4,9	4,1	3,0	2,0	1,2	1,5	5,0
		DHT (%)	9,1	8,5	7,5	4,0	2,8	3,1	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C4 antes da compensação, as DHIs de 5ª ordem nos barramentos 3 e 4, as DHIs de 7ª ordem nos barramentos 3 e 4 no instante $t = 3$ s, e os DHTs nos barramentos 3 e 4 estão acima dos valores propostos na norma. Com a compensação, estes valores ficam dentro dos valores estabelecidos na norma e as demais DHIs e DHTs tem seus valores reduzidos, como mostrado na Tabela 49.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram as correntes nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C4.

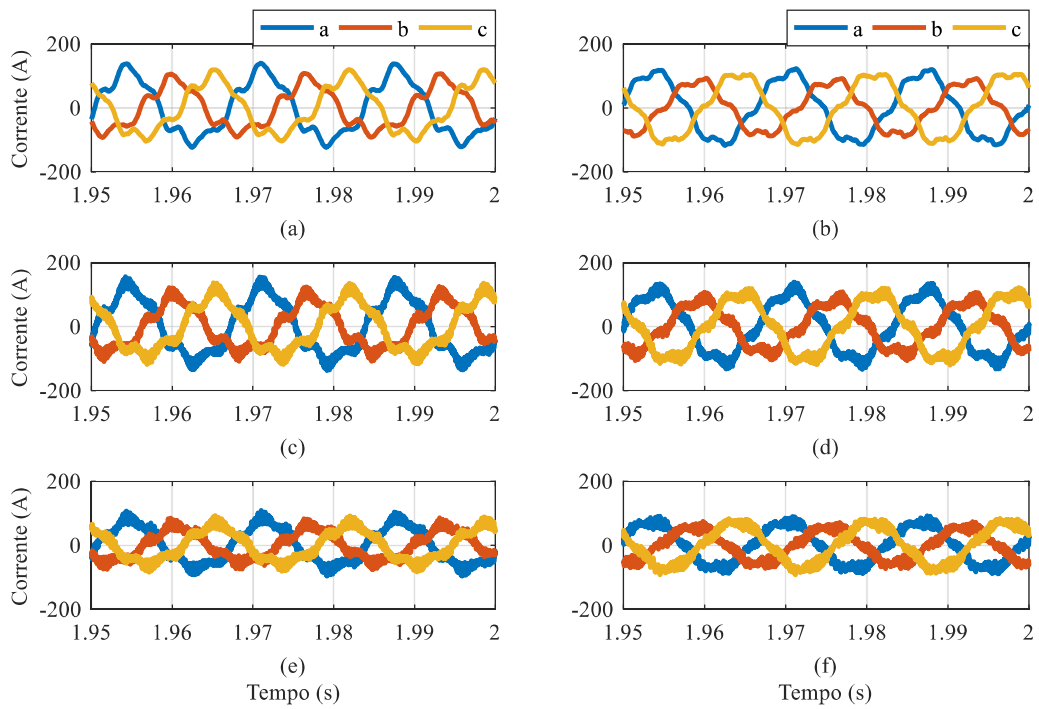


Figura 51 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 2$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

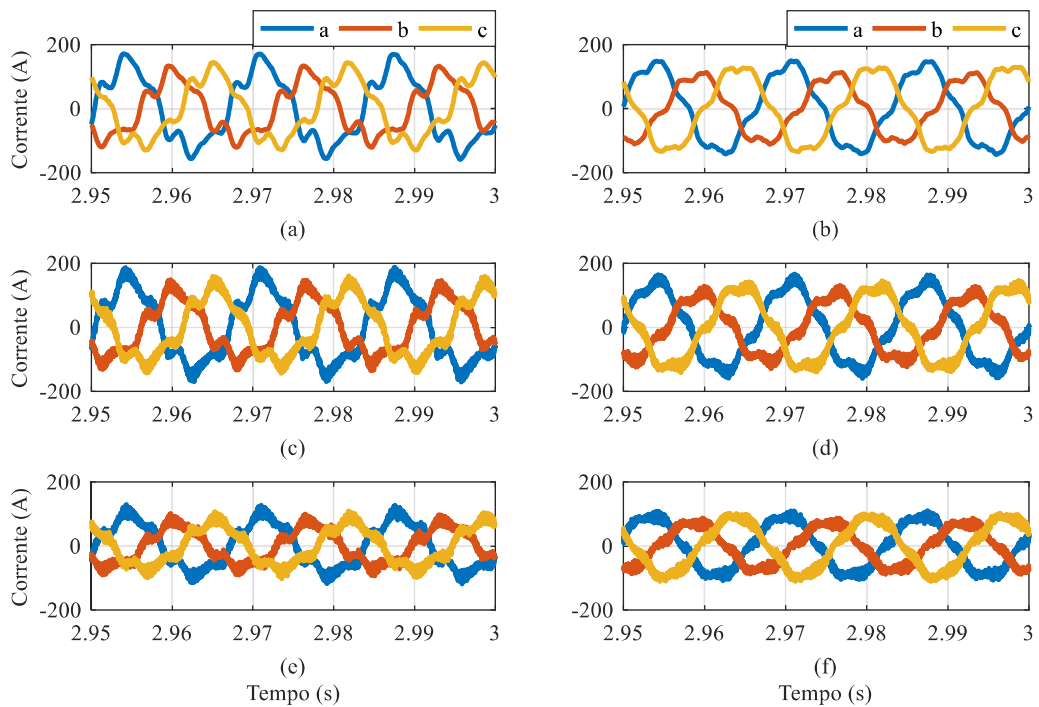


Figura 52 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 3$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

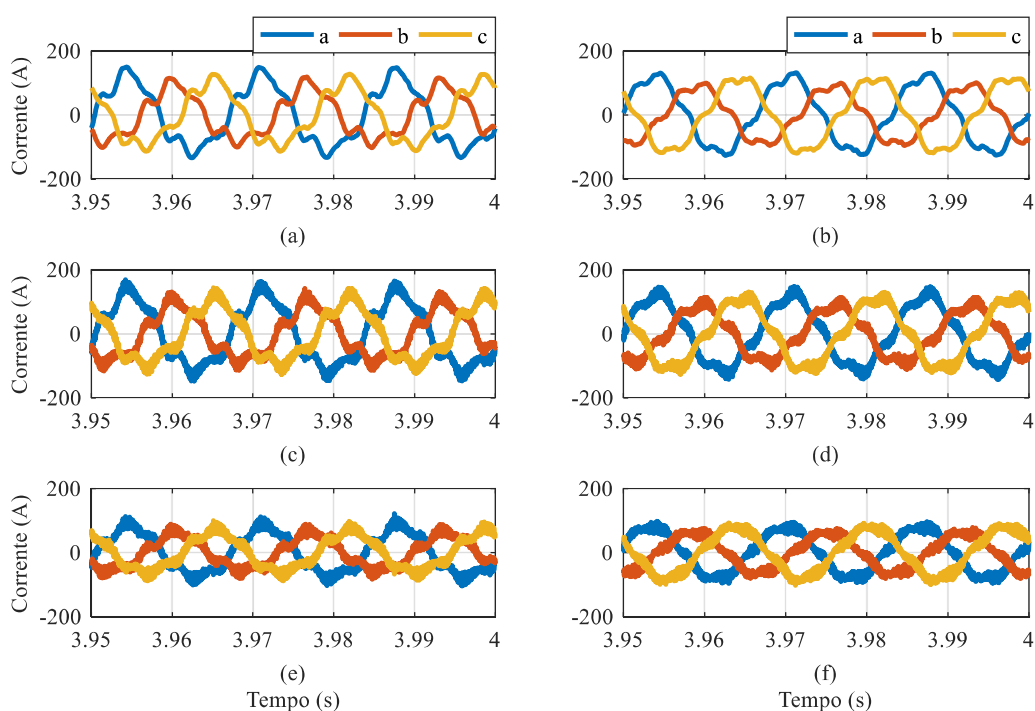


Figura 53 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C4 para $t = 4$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 50 mostra a amplitude dos harmônicos de 5^a e 7^a ordens e a DHT das correntes nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3. Como o controlador FLC3 foi projetado para amortecer as tensões harmônicas do sistema, ele não mitiga o 5^o harmônico de corrente com a mesma eficácia com que amortece o 5^o harmônico de tensão tensões harmônicas. Entretanto, é notável que o controlador FLC3 reduz satisfatoriamente os harmônicos de 5^a e 7^a ordens e a DHT das correntes, como pode ser visto na Tabela 50.

Tabela 50 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C4

<i>t</i> (s)	Alimen- tador	<i>h</i>	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	12	5 (A)	18,66	18,11	17,21	14,18	13,15	13,46	-24,0	-27,4	-21,8
		7 (A)	6,20	5,47	4,61	1,14	1,22	1,63	-81,6	-77,7	-64,6
		DHT (%)	17,57	23,09	18,57	12,94	15,56	12,74	-26,4	-32,6	-31,4
	23	5 (A)	17,27	16,74	16,39	14,16	13,08	13,80	-18,0	-21,9	-15,8
		7 (A)	4,30	4,63	4,19	1,31	0,98	1,46	-69,5	-78,8	-65,2
		DHT (%)	16,67	22,49	19,04	13,90	17,12	14,22	-16,6	-23,9	-25,3
	34	5 (A)	9,92	9,25	9,06	6,30	6,29	6,32	-36,5	-32,0	-30,2
		7 (A)	2,20	2,05	1,73	1,52	0,91	0,92	-30,9	-55,6	-46,8
		DHT (%)	15,06	20,51	16,83	9,51	11,81	9,22	-36,8	-42,4	-45,2
3	12	5 (A)	26,74	22,84	22,49	16,17	14,42	15,23	-39,5	-36,9	-32,3
		7 (A)	13,86	10,25	10,09	3,38	0,32	3,13	-75,6	-96,9	-69,0
		DHT (%)	21,69	24,44	21,14	12,08	13,59	11,90	-44,3	-44,4	-43,7
	23	5 (A)	25,93	23,53	22,23	16,06	14,51	15,14	-38,1	-38,3	-31,9
		7 (A)	11,00	9,19	7,92	3,43	2,88	2,88	-68,8	-68,7	-63,6
		DHT (%)	21,21	25,77	21,74	12,61	15,05	12,72	-40,5	-41,6	-41,5
	34	5 (A)	14,67	13,04	13,16	7,45	7,18	7,04	-49,2	-44,9	-46,5
		7 (A)	5,58	4,32	3,55	2,62	1,89	1,91	-53,0	-56,3	-46,2
		DHT (%)	18,47	21,98	20,11	8,86	10,66	8,34	-52,0	-51,5	-58,5
4	12	5 (A)	21,31	19,63	18,32	14,65	13,39	14,10	-31,3	-31,8	-23,0
		7 (A)	8,65	7,19	7,07	2,15	1,55	2,25	-75,1	-78,4	-68,2
		DHT (%)	19,11	23,43	19,03	12,38	14,60	12,44	-35,2	-37,7	-34,6
	23	5 (A)	20,35	18,81	17,25	14,89	14,19	13,99	-26,8	-24,6	-18,9
		7 (A)	6,38	6,01	5,45	1,86	2,07	1,17	-70,8	-65,6	-78,5
		DHT (%)	18,48	23,40	18,91	13,52	17,48	13,48	-26,8	-25,3	-28,7
	34	5 (A)	11,37	10,60	10,46	6,42	6,05	6,57	-43,5	-42,9	-37,2
		7 (A)	3,28	2,68	2,41	1,58	1,33	1,39	-51,8	-50,4	-42,3
		DHT (%)	16,16	20,50	18,24	8,95	10,41	9,00	-44,6	-49,2	-50,6

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 51 mostra as DHIs e a DHT das correntes dos alimentadores dos trechos 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C4 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 51 - DHIs e DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C4

t (s)	Alimen- tador	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	12	5 (%)	16,6	22,1	17,9	12,8	15,4	12,6	7,0
		7 (%)	5,5	6,7	4,8	1,0	1,4	1,5	7,0
		DHT (%)	17,6	23,1	18,6	12,9	15,6	12,7	8,0
	23	5 (%)	16,1	21,6	18,4	13,8	17,0	14,1	4,0
		7 (%)	4,0	6,0	4,7	1,3	1,3	1,5	4,0
		DHT (%)	16,7	22,5	19,0	13,9	17,1	14,2	5,0
	34	5 (%)	14,6	19,8	16,5	9,1	11,4	8,8	4,0
		7 (%)	3,2	4,4	3,1	2,2	1,7	1,3	4,0
		DHT (%)	15,1	20,5	16,8	9,5	11,8	9,2	5,0
3	12	5 (%)	19,2	22,2	19,2	11,7	13,5	11,6	7,0
		7 (%)	9,9	10,0	8,6	2,4	0,3	2,4	7,0
		DHT (%)	21,7	24,4	21,1	12,1	13,6	11,9	8,0
	23	5 (%)	19,5	24,0	20,4	12,2	14,7	12,4	4,0
		7 (%)	8,3	9,4	7,3	2,6	2,9	2,4	4,0
		DHT (%)	21,2	25,8	21,7	12,6	15,0	12,7	5,0
	34	5 (%)	17,2	20,8	19,3	8,1	10,1	7,8	4,0
		7 (%)	6,5	6,9	5,2	2,9	2,7	2,1	4,0
		DHT (%)	18,5	22,0	20,1	8,9	10,7	8,3	5,0
4	12	5 (%)	17,6	22,0	17,7	12,2	14,5	12,2	7,0
		7 (%)	7,2	8,0	6,8	1,8	1,7	1,9	7,0
		DHT (%)	19,1	23,4	19,0	12,4	14,6	12,4	8,0
	23	5 (%)	17,6	22,2	18,0	13,3	17,1	13,3	4,0
		7 (%)	5,5	7,1	5,7	1,7	2,5	1,1	4,0
		DHT (%)	18,5	23,4	18,9	13,5	17,5	13,5	5,0
	34	5 (%)	15,5	19,7	17,6	8,4	10,0	8,5	4,0
		7 (%)	4,5	5,0	4,1	2,1	2,2	1,8	4,0
		DHT (%)	16,2	20,5	18,2	8,9	10,4	9,0	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C4 antes da compensação, com exceção das DHIs de 7^a ordem nos trechos 12 e 34 no instante $t = 2$ s, as demais DHIs e as DHTs estão acima dos limites propostos na norma IEEE 519-2022. Com a compensação harmônica, as DHIs de 7^a ordem ficam dentro dos limites estabelecidos na norma e as DHIs de 5^a ordem e as DHTs não ficam dentro dos limites propostos, apesar de terem seus valores reduzidos. Como esta estratégia de detecção harmônica visa amortecer os harmônicos de tensão presentes no sistema elétrico, a mitigação das correntes harmônicas nos alimentadores não é tão eficiente quando o amortecimento propagação das tensões harmônicas.

4.4.3 Resultados da aplicação do controle com ganho com passo adaptativo no Cenário C5

O perfil das tensões e das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e o ganho adaptativo $k_{v,5}$ são mostrados na Figura 54.

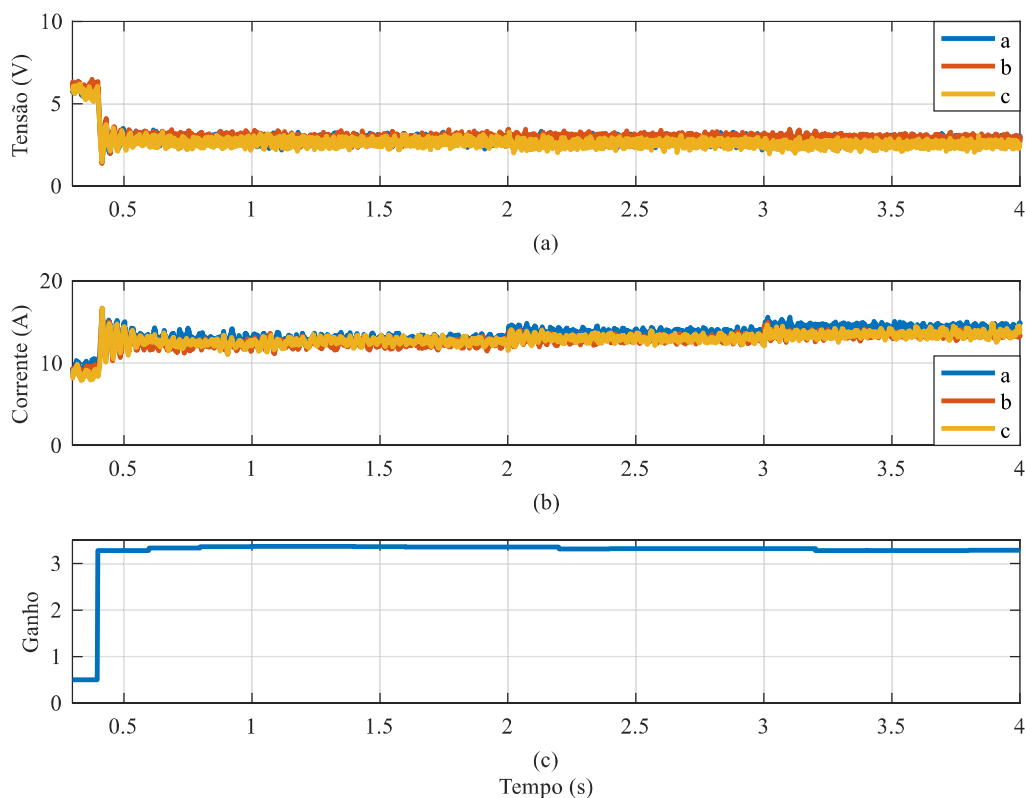


Figura 54 - Perfil (a) das tensões e (b) das correntes de 5º harmônico do alimentador no barramento 2 e (c) o ganho adaptativo $k_{v,5}$ em C5
Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 54, os harmônicos de tensão se estabilizam em $t = 0,4$ s e o ganho adaptativo $k_{v,5}$ é estabilizado em $t = 0,6$ s. Após a alteração das cargas nos instantes $t = 2$ s e $t = 3$ s, o ganho adaptativo rapidamente se estabiliza em um novo valor. Apesar da tensão se estabilizar, a alteração da carga faz com que o ganho se altere nos instantes $t = 2,0$ s e $t = 3,0$ s. Em $t = 2,0$ s e $t = 3,0$ s, o erro entre $i_{5,k}$ e $i_{5,(k-1)}$ aumenta, fazendo com que o ganho adaptativo diminua.

As Figuras 55, 56 e 57 mostram as tensões nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C5.

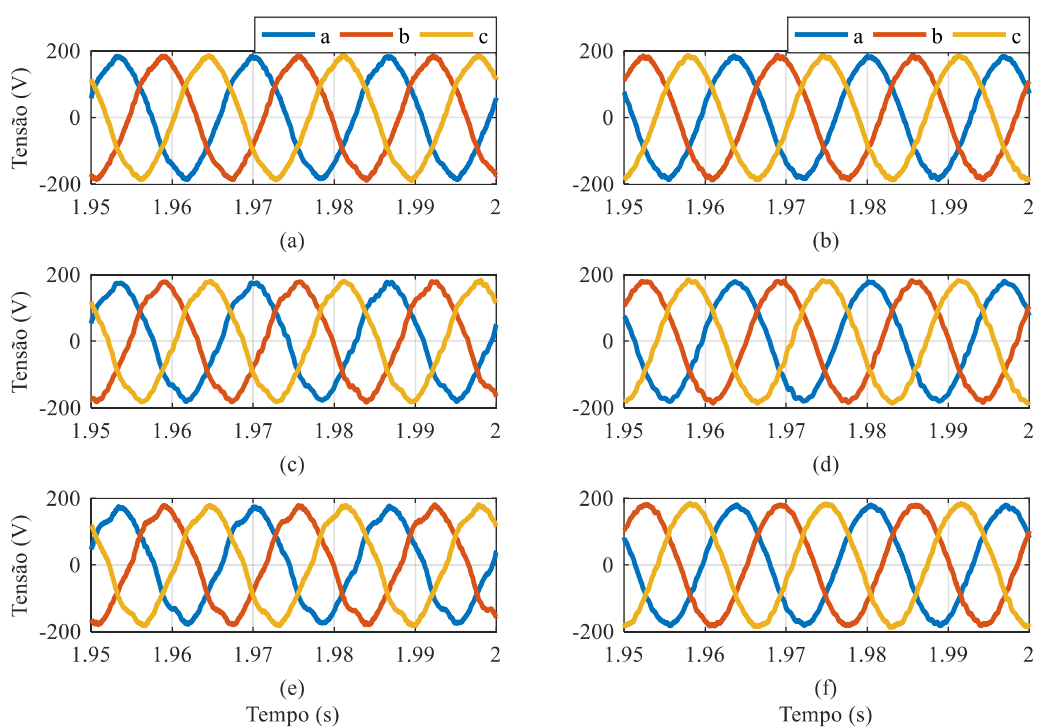


Figura 55 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 2$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

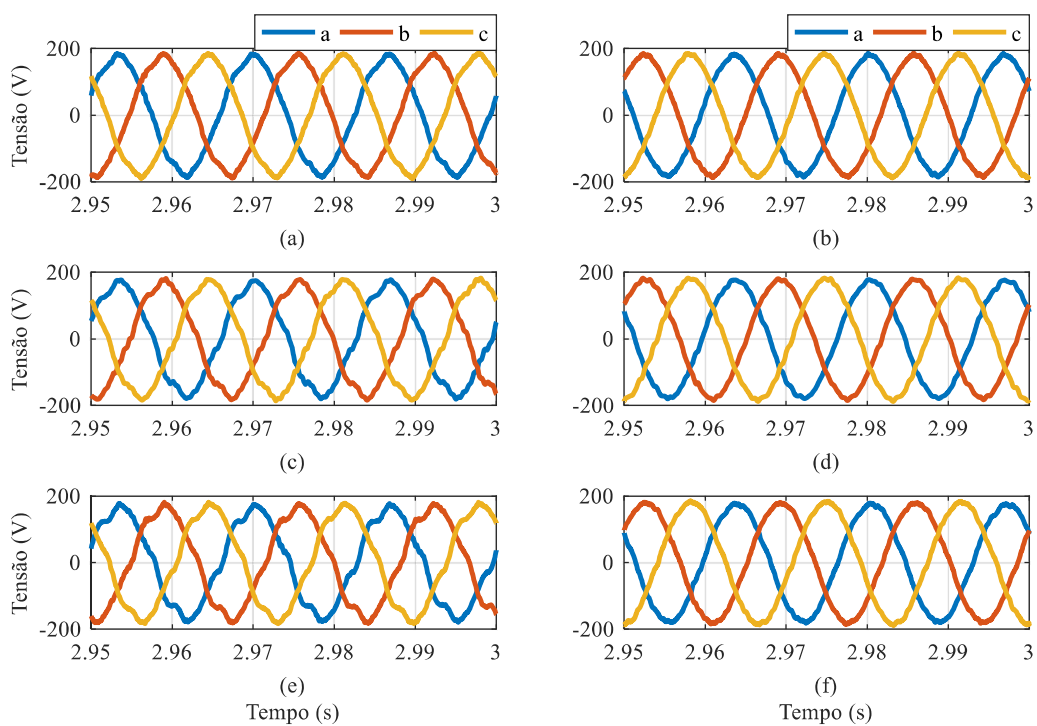


Figura 56 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 3$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

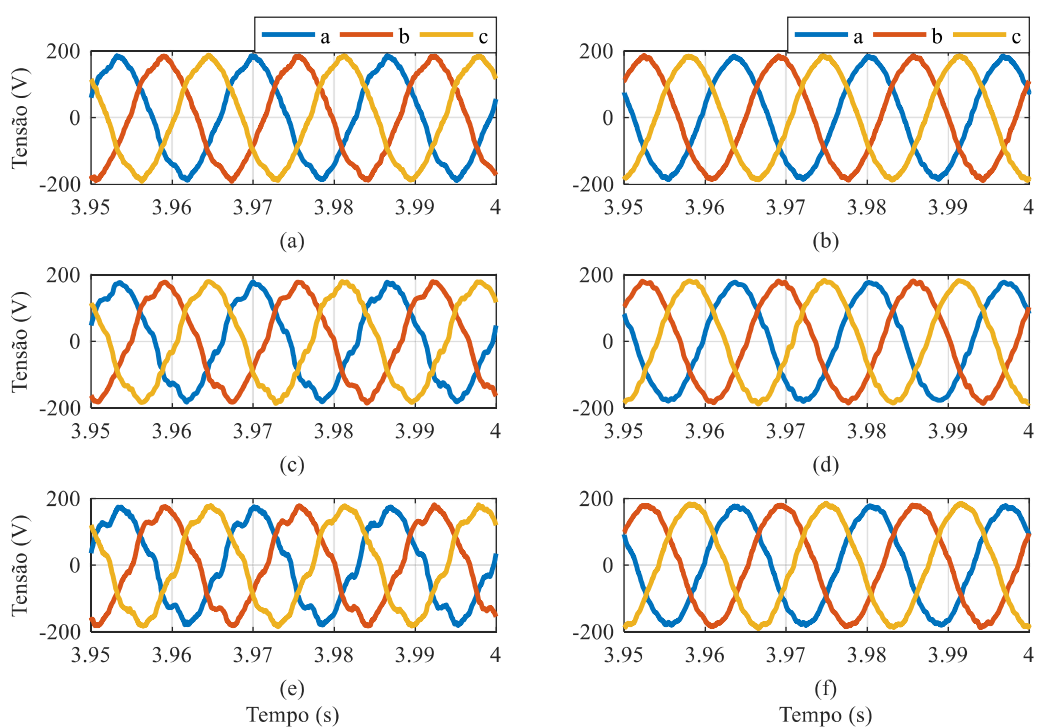


Figura 57 - Tensão no barramento 2 (a) sem e (b) com compensação; tensão no barramento 3 (c) sem e (d) com compensação; tensão no barramento 4 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 4$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 52 mostra a amplitude dos harmônicos de 5^a e 7^a ordens e a DHT das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3. Analisando a Tabela 52, é perceptível, em um cenário sem amortecimento da tensão harmônica, que a DHT aumenta à medida que o barramento em análise está mais distante do barramento 1, que é a fonte de tensão do sistema. Com a compensação, é possível amortecer significativamente a distorção de tensão presente no sistema. Neste cenário, como as cargas estão mais distantes da fonte de tensão do sistema, a distorção da tensão harmônica no barramento 4 é mais acentuada do que a observada nos cenários C3 e C4.

Tabela 52 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C5

<i>t</i> (s)	Barra- mento	<i>h</i>	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	2	5 (V)	5,48	5,15	5,14	2,70	3,98	3,13	-50,7	-22,7	-39,1
		7 (V)	2,30	1,75	1,29	0,33	1,55	1,56	-85,7	-11,4	20,9
		DHT (%)	3,43	3,22	3,09	1,58	2,96	2,73	-53,7	-8,1	-11,7
	3	5 (V)	7,52	7,13	7,04	2,35	1,95	2,18	-68,8	-72,7	-69,0
		7 (V)	4,12	3,59	2,02	1,18	0,65	0,99	-71,4	-81,9	-51,0
		DHT (%)	5,08	4,76	4,34	1,81	1,49	1,89	-64,4	-68,6	-56,5
	5	5 (V)	9,71	8,35	8,76	1,95	1,93	2,30	-79,9	-76,9	-73,7
		7 (V)	4,71	3,96	3,13	0,98	0,51	0,69	-79,2	-87,1	-78,0
		DHT (%)	6,51	5,62	5,52	1,49	1,97	2,12	-77,1	-65,0	-61,7
3	2	5 (V)	6,03	6,88	5,07	2,61	3,98	2,63	-56,7	-42,2	-48,1
		7 (V)	3,53	3,81	3,68	0,87	1,99	0,67	-75,4	-47,8	-81,8
		DHT (%)	4,07	4,86	4,26	1,64	3,09	1,85	-59,7	-36,6	-56,6
	3	5 (V)	9,44	8,52	8,00	2,67	2,12	2,61	-71,7	-75,1	-67,4
		7 (V)	6,05	4,94	3,93	1,82	1,21	1,59	-69,9	-75,5	-59,5
		DHT (%)	6,74	5,86	5,27	2,14	1,89	2,61	-68,2	-67,8	-50,5
	4	5 (V)	12,09	11,18	11,09	2,44	2,51	2,98	-79,8	-77,5	-73,1
		7 (V)	7,91	6,10	5,43	2,06	1,26	1,42	-74,0	-79,3	-73,8
		DHT (%)	8,81	7,69	7,27	2,18	2,05	2,58	-75,3	-73,4	-64,6
4	2	5 (V)	6,40	5,92	5,34	2,62	3,91	2,79	-59,1	-34,0	-47,8
		7 (V)	4,58	3,53	3,19	1,16	2,35	2,25	-74,7	-33,4	-29,5
		DHT (%)	4,61	4,08	3,75	1,74	3,23	2,80	-62,2	-20,8	-25,5
	3	5 (V)	11,13	10,24	9,69	3,19	2,43	2,84	-71,3	-76,3	-70,7
		7 (V)	8,49	6,54	6,13	2,67	2,13	2,11	-68,6	-67,4	-65,6
		DHT (%)	8,45	7,28	6,75	2,85	2,42	2,81	-66,2	-66,7	-58,4
	4	5 (V)	14,79	12,94	10,67	3,20	2,79	3,52	-78,4	-78,4	-67,0
		7 (V)	10,33	9,29	9,05	2,96	2,25	2,46	-71,3	-75,8	-72,8
		DHT (%)	11,18	9,78	8,63	2,83	2,57	3,02	-74,7	-73,7	-65,0

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 53 mostra as DHIs e a DHT das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C5 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 53 - DHIs e DHTs das tensões nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação no cenário C5

t (s)	Barramento	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	2	5 (%)	3,1	2,9	2,9	1,5	2,2	1,7	5,0
		7 (%)	1,3	1,0	0,7	0,2	0,9	0,9	5,0
		DHT (%)	3,4	3,2	3,1	1,6	3,0	2,7	8,0
	3	5 (%)	4,4	4,1	4,0	1,3	1,1	1,2	5,0
		7 (%)	2,4	2,1	1,2	0,7	0,4	0,5	5,0
		DHT (%)	5,1	4,8	4,3	1,8	1,5	1,9	8,0
	4	5 (%)	5,8	4,9	5,1	1,1	1,1	1,3	5,0
		7 (%)	2,8	2,3	1,8	0,6	0,3	0,4	5,0
		DHT (%)	6,5	5,6	5,5	1,5	2,0	2,1	8,0
3	2	5 (%)	3,4	3,9	2,9	1,5	2,2	1,5	5,0
		7 (%)	2,0	2,2	2,1	0,5	1,1	0,4	5,0
		DHT (%)	4,1	4,9	4,3	1,6	3,1	1,9	8,0
	3	5 (%)	5,6	5,0	4,6	1,5	1,2	1,4	5,0
		7 (%)	3,6	2,9	2,2	1,0	0,7	0,9	5,0
		DHT (%)	6,7	5,9	5,3	2,1	1,9	2,6	8,0
	4	5 (%)	7,3	6,6	6,4	1,4	1,4	1,6	5,0
		7 (%)	4,8	3,6	3,1	1,2	0,7	0,8	5,0
		DHT (%)	8,8	7,7	7,3	2,2	2,0	2,6	8,0
4	2	5 (%)	3,6	3,3	3,0	1,5	2,2	1,6	5,0
		7 (%)	2,6	2,0	1,8	0,6	1,3	1,3	5,0
		DHT (%)	4,6	4,1	3,8	1,7	3,2	2,8	8,0
	3	5 (%)	6,6	6,0	5,5	1,8	1,4	1,6	5,0
		7 (%)	5,0	3,8	3,5	1,5	1,2	1,2	5,0
		DHT (%)	8,4	7,3	6,8	2,9	2,4	2,8	8,0
	4	5 (%)	9,0	7,8	6,3	1,8	1,6	1,9	5,0
		7 (%)	6,3	5,6	5,3	1,7	1,3	1,3	5,0
		DHT (%)	11,2	9,8	8,6	2,8	2,6	3,0	8,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C4 antes da compensação, algumas DHIs de 5ª ordem no barramento 3 nos instantes $t = 3$ s e $t = 4$ s e no barramento 4, algumas DHIs de 7ª ordem nos barramentos 3 e 4 no instante $t = 4$ s, e as DHTs na fase a do barramento 4 no instante $t = 3$ s, na fase a do barramento 3 no instante $t = 4$ s, e no barramento 4 no instante $t = 4$ s estão acima dos valores propostos na norma. Com a compensação, estes valores ficam dentro dos valores estabelecidos na norma e as demais DHIs e DHTs tem seus valores reduzidos, como mostrado na Tabela 53.

As Figuras 58, 59 e 60 mostram as correntes nos barramentos 2, 3 e 4 nos intervalos em três instantes distintos no cenário C5.

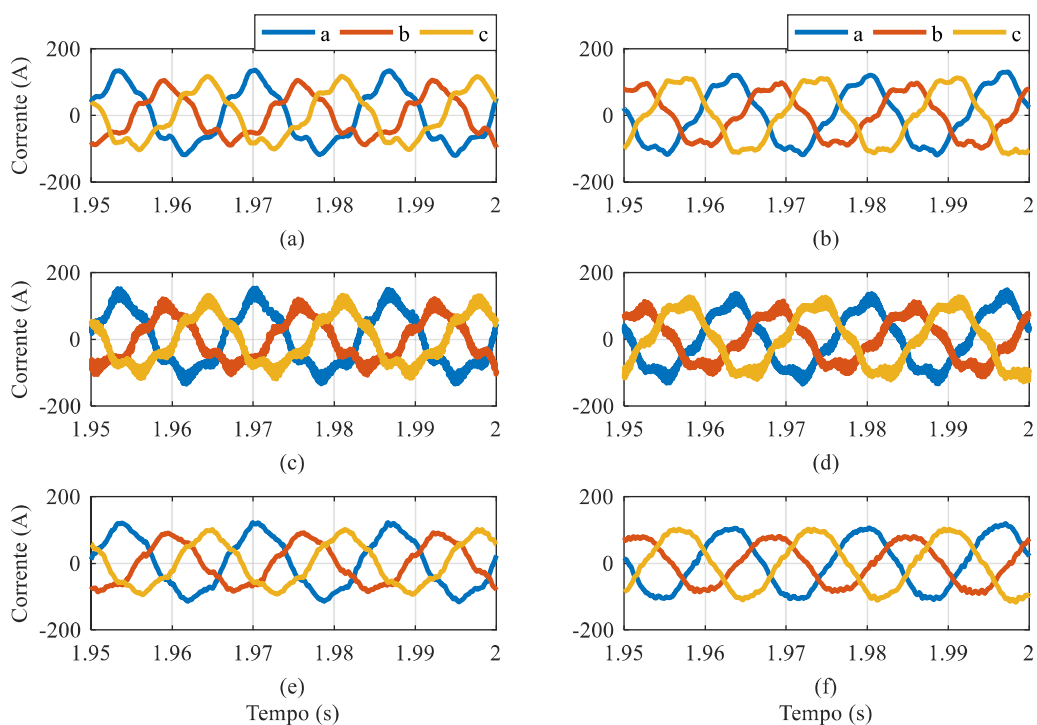


Figura 58 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 2$ s
 Fonte: elaborada pelo autor.

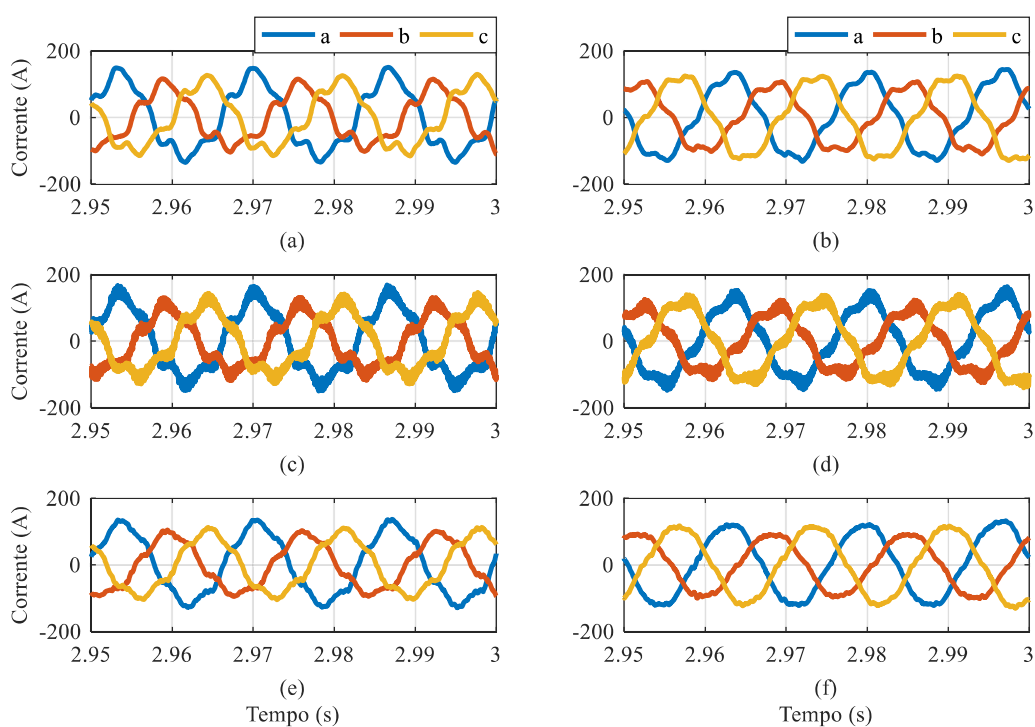


Figura 59 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 3$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

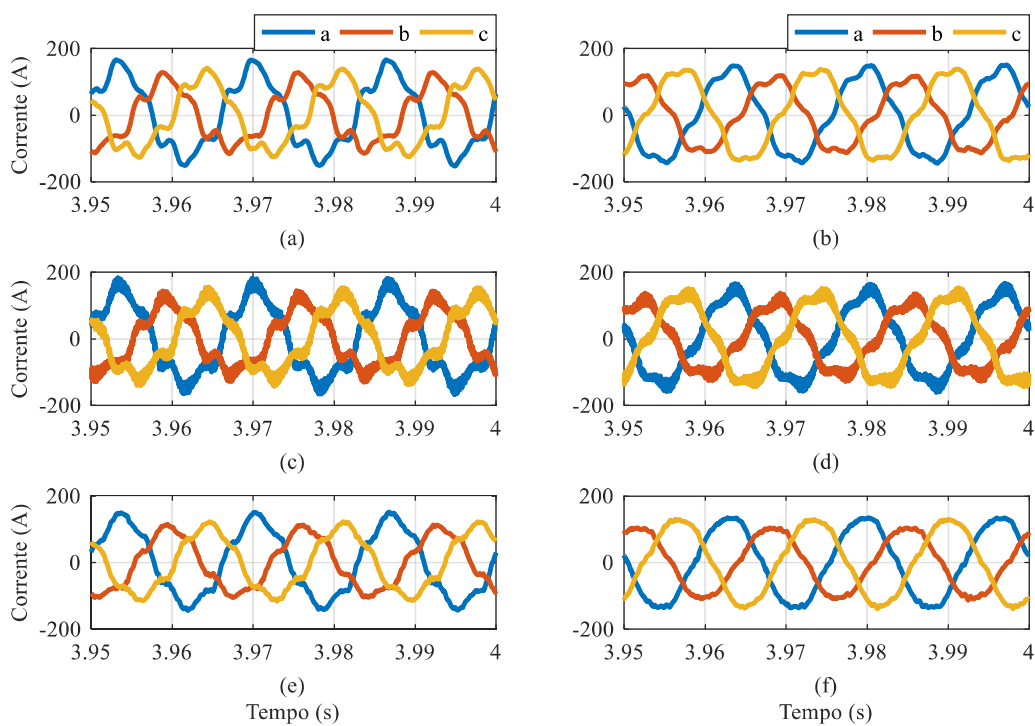


Figura 60 - Corrente no alimentador 12 (a) sem e (b) com compensação; corrente no alimentador 23 (c) sem e (d) com compensação; corrente no alimentador 34 (e) sem e (f) com compensação no cenário C5 para $t = 4$ s
Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 54 mostra a amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e a DHT das correntes nos barramentos 2, 3 e 4 antes e após a compensação, e a redução percentual obtida com o uso da estratégia de controle FLC3. Como o controlador FLC3 foi projetado para amortecer as tensões harmônicas do sistema, ele não mitiga o 5º harmônico de corrente com a mesma eficácia com que amortece o 5º harmônico de tensão. Entretanto, é notável que o controlador FLC3 reduz satisfatoriamente os harmônicos de 5ª e 7ª ordens e a DHT das correntes, como pode ser visto na Tabela 54.

Tabela 54 - Amplitude dos harmônicos de 5ª e 7ª ordens e as DHTs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C5

<i>t</i> (s)	Alimen- tador	<i>h</i>	Sem compensação			Com compensação			Redução Percentual		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	12	5 (A)	15,93	15,65	14,22	13,08	12,23	12,46	-17,9	-21,9	-12,4
		7 (A)	4,40	4,86	3,10	0,81	0,93	1,34	-81,6	-80,9	-56,8
		DHT (%)	14,81	19,98	15,27	11,75	13,82	11,42	-20,7	-30,9	-25,2
	23	5 (A)	15,56	14,84	14,51	12,88	12,33	12,49	-17,2	-16,9	-13,9
		7 (A)	3,41	3,49	3,13	0,88	1,02	0,47	-74,2	-70,8	-85,0
		DHT (%)	14,93	19,44	16,55	12,46	15,30	12,59	-16,6	-21,3	-23,9
	34	5 (A)	9,49	8,82	8,90	4,45	4,11	4,86	-53,1	-53,4	-45,4
		7 (A)	1,94	1,99	1,03	1,27	1,27	0,90	-34,5	-36,2	-12,6
		DHT (%)	9,03	11,20	10,53	4,71	5,58	5,02	-47,9	-50,2	-52,4
3	12	5 (A)	19,75	17,67	16,95	13,74	12,52	12,72	-30,4	-29,1	-25,0
		7 (A)	7,21	6,24	6,10	1,82	1,48	2,18	-74,8	-76,3	-64,3
		DHT (%)	16,88	20,26	16,82	11,06	12,50	10,54	-34,5	-38,3	-37,3
	23	5 (A)	19,12	16,47	17,04	13,62	12,79	13,42	-28,8	-22,3	-21,2
		7 (A)	6,09	5,25	4,44	1,48	1,49	0,99	-75,7	-71,6	-77,7
		DHT (%)	16,70	19,56	17,56	11,69	13,91	11,94	-30,0	-28,9	-32,0
	34	5 (A)	12,21	10,52	10,94	4,83	4,31	5,42	-60,4	-59,0	-50,5
		7 (A)	3,65	2,73	2,86	1,95	2,18	1,78	-46,6	-20,1	-37,8
		DHT (%)	10,54	11,96	11,54	4,66	5,44	5,02	-55,8	-54,5	-56,5
4	12	5 (A)	23,84	20,41	20,51	14,58	13,00	13,77	-38,8	-36,3	-32,9
		7 (A)	10,31	8,72	7,28	2,60	2,41	2,87	-74,8	-72,4	-60,6
		DHT (%)	18,88	21,58	18,65	10,72	11,87	10,38	-43,2	-45,0	-44,3
	23	5 (A)	22,48	19,60	19,62	14,00	13,28	13,84	-37,7	-32,2	-29,5
		7 (A)	8,69	6,64	6,51	2,06	2,01	1,50	-76,3	-69,7	-77,0
		DHT (%)	18,11	21,09	18,73	10,71	12,90	11,14	-40,9	-38,9	-40,5
	34	5 (A)	14,29	12,63	13,24	5,49	4,37	5,76	-61,6	-65,4	-56,5
		7 (A)	4,43	3,91	2,93	3,00	2,76	2,57	-32,3	-29,4	-12,3
		DHT (%)	11,25	13,18	12,81	4,88	5,06	4,99	-56,6	-61,6	-61,0

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 55 mostra as DHIs e as DHTs das correntes dos alimentadores dos trechos 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C5 e o limite estabelecidos pela norma IEEE 519-2022.

Tabela 55 - DHTs e DHIs das correntes nos alimentadores 12, 23 e 34 antes e após a compensação no cenário C5

t (s)	Alimen- tador	h	Sem compensação			Com compensação			IEEE 519
			a	b	c	a	b	c	
2	12	5 (%)	14,2	19,0	14,8	11,7	13,7	11,3	7,0
		7 (%)	3,9	5,9	3,2	0,7	1,0	1,2	7,0
		DHT (%)	14,8	20,0	15,3	11,8	13,8	11,4	8,0
	23	5 (%)	14,5	18,9	16,1	12,4	15,2	12,3	4,0
		7 (%)	3,2	4,4	3,5	0,8	1,3	0,5	4,0
		DHT (%)	14,9	19,4	16,5	12,5	15,3	12,6	5,0
	34	5 (%)	8,7	10,8	10,2	4,2	5,0	4,7	4,0
		7 (%)	1,8	2,4	1,2	1,2	1,5	0,9	4,0
		DHT (%)	9,0	11,2	10,5	4,7	5,6	5,0	5,0
3	12	5 (%)	15,8	19,1	15,7	10,9	12,3	10,3	7,0
		7 (%)	5,8	6,7	5,7	1,4	1,5	1,8	7,0
		DHT (%)	16,9	20,3	16,8	11,1	12,5	10,5	8,0
	23	5 (%)	15,9	18,6	16,9	11,5	13,7	11,8	4,0
		7 (%)	5,1	5,9	4,4	1,3	1,6	0,9	4,0
		DHT (%)	16,7	19,6	17,6	11,7	13,9	11,9	5,0
	34	5 (%)	10,0	11,5	11,1	4,0	4,5	4,6	4,0
		7 (%)	3,0	3,0	2,9	1,6	2,3	1,5	4,0
		DHT (%)	10,5	12,0	11,5	4,7	5,4	5,0	5,0
4	12	5 (%)	17,2	19,8	17,4	10,4	11,6	10,1	7,0
		7 (%)	7,4	8,4	6,2	1,9	2,1	2,1	7,0
		DHT (%)	18,9	21,6	18,6	10,7	11,9	10,4	8,0
	23	5 (%)	16,8	20,0	17,7	10,5	12,7	10,9	4,0
		7 (%)	6,5	6,8	5,9	1,6	1,9	1,2	4,0
		DHT (%)	18,1	21,1	18,7	10,7	12,9	11,1	5,0
	34	5 (%)	10,6	12,5	12,3	4,0	4,1	4,4	4,0
		7 (%)	3,3	3,9	2,7	2,2	2,6	2,0	4,0
		DHT (%)	11,2	13,2	12,8	4,9	5,1	5,0	5,0

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário C5 antes da compensação, com exceção das DHIs de 7ª ordem no trecho 12 nos instantes $t = 2$ s e $t = 3$ s e no trecho 34, as demais DHIs e as DHTs estão acima dos limites propostos na norma IEEE 519-2022. Com a compensação harmônica, as DHIs de 7ª ordem e as DHTs da fase a no trecho 34 ficam dentro dos limites estabelecidos na norma e as DHIs de 5ª ordem e as demais DHTs não ficam dentro dos limites propostos, apesar de terem seus

valores reduzidos. Como esta estratégia de detecção harmônica visa amortecer os harmônicos de tensão presentes no sistema elétrico, a mitigação das correntes harmônicas nos alimentadores não é tão eficiente quando o amortecimento propagação das tensões harmônicas.

4.5 Conclusões

Neste capítulo, são propostos a combinação do controle VSG com estratégias de detecção harmônica baseada em FLC. Com estas estratégias de detecção harmônica, é possível escolher quais ordens harmônicas e as sequências a serem compensadas. As estratégias de detecção baseadas em FLC medem somente as tensões no ponto de acoplamento a fim de detectar as tensões harmônicas, assim como a estratégia EC3 apresentada no Capítulo 3 desta tese, visto que a proposta principal desta tese é propor uma combinação do controle VSG com detecção harmônica para ser aplicado em uma rede de distribuição para amortecer a propagação harmônica em uma rede de distribuição.

Na Seção 4.3, são propostos dois controladores baseados em FLC, FLC1 e FLC2, que usam controladores P e PI, respectivamente, para determinar as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens de compensação. No cenário C1, FLC1 e FLC2 mitigam simultaneamente as correntes harmônicas do alimentador e as tensões harmônicas no PAC. No cenário C2, em que a fonte de tensão do sistema tem tensões harmônicas de 5ª ordem, FLC1 e FLC2 tem limitações para mitigar as correntes harmônicas de quinta ordem, devido à presença desta tensão harmônica na fonte de tensão do sistema, mas conseguem compensar as demais correntes harmônicas do alimentador e as tensões harmônicas no PAC. Como esperado, FLC1 e FLC2 tem um comportamento semelhante à EC3, estratégia na qual FLC1 e FLC2 são baseadas.

Na Seção 4.4, é proposto um controlador com ganho adaptativo a ser aplicado em um sistema com quatro barramentos. O ganho adaptativo é ajustado de acordo com o erro das tensões e correntes harmônicas de 5ª ordem de um barramento de interesse do sistema elétrico. Para validar o funcionamento do controlador proposto, foram propostos três cenários distintos, C3, C4 e C5, com dois inversores e dois conjuntos de cargas harmônicas conectados ao sistema elétrico e, nestes cenários, a fonte de tensão do sistema tem tensões harmônicas de 5ª ordem. Nos três cenários, o ganho adaptativo se estabiliza após os transitórios e, assim como FLC1 e

FLC2, esta estratégia tem limitações para mitigar, as correntes harmônicas de quinta ordem, devido à presença desta tensão harmônica na fonte de tensão do sistema, mas consegue mitigar as demais ordens de correntes harmônicas e as tensões harmônicas no PAC.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Recentemente, inovações tecnológicas e mudanças no ambiente regulatório tem levado ao crescimento da presença das unidades de geração distribuída, como os painéis fotovoltaicos, no sistema elétrico. Entretanto, a conexão dessas GDs ao sistema elétrico é feita através de interfaces CC-CA, que, além de contribuir com a proliferação de harmônicos de alta frequência, não apresentam comportamento inercial e podem prejudicar a estabilidade do sistema. Uma GD pode contribuir para a melhoria da estabilidade do sistema caso a combinação da GD com a interface CC-CA emule o comportamento de uma máquina síncrona, como é proposto no controle do VSG. Assim como o crescimento das unidades de GD no sistema elétrico, a proliferação de dispositivos baseados em eletrônica de potência, que consomem harmônicos de corrente além da componente fundamental em 60 Hz, pode deteriorar a qualidade de energia elétrica do sistema. O uso de filtros ativo de potência é uma alternativa para mitigar os harmônicos presentes no sistema elétrico. Como os controles do VSG e do filtro ativo são aplicados em inversores, é possível embarcar ambos os controles em um único inversor, com o controle do VSG gerando a corrente de referência na componente fundamental, responsável pela característica inercial, e o controle do filtro ativo gerando as correntes harmônicas de referência, responsáveis pela compensação dos harmônicos do sistema elétrico. Neste trabalho, foi mostrado que a combinação destes controles pode simultaneamente melhorar a estabilidade de frequência e a qualidade de energia elétrica do sistema.

No capítulo 2, os controles PQ e VSG são apresentados e o modelo completo de 7ª ordem de uma máquina síncrona e o modelo simplificado utilizado neste trabalho são mostrados. Como o modelo completo de uma MS pode ser desnecessariamente complexo caso o propósito do controle seja emular as características de inércia e amortecimento mecânico de uma MS, algumas simplificações a partir do modelo completo podem ser feitas. A escolha dos parâmetros da MS virtual, tais como o momento de inércia virtual J e o coeficiente de amortecimento D , não estão necessariamente atrelados aos parâmetros de uma MS física e podem ser livremente escolhidos pelo projetista. A partir dos resultados das simulações, é possível observar que valores maiores de J tendem a aumentar a potência ativa que o inversor fornece ao sistema, enquanto valores mais elevados de D tendem a diminuir os valores de oscilação das potências ativa e reativa.

No capítulo 3, três detectores harmônicos baseados na Teoria $p-q$ são apresentados. Enquanto as estratégias de controle EC1 e EC2 precisam de medir tensões e corrente do sistema para detectar as componentes harmônicas presentes no sistema, a estratégia de controle EC3 mede somente as tensões do sistema para realizar a detecção harmônica. Simulações foram realizadas para comparar as características de compensação das três estratégias estudadas. Em um cenário em que a tensão do sistema não apresenta harmônicos, todas as três estratégias conseguem mitigar satisfatoriamente os harmônicos de corrente e de tensão do sistema. Entretanto, em um cenário que a fonte de tensão do sistema apresenta um 5º harmônico de tensão, as três estratégias estudadas não conseguem mitigar de maneira satisfatória e simultânea os harmônicos de corrente e de tensão. Neste cenário com distorção de tensão na fonte do sistema, as estratégias EC1 e EC2 conseguem mitigar as correntes de maneira satisfatória, enquanto EC3 não mitiga as correntes satisfatoriamente. Entretanto, a estratégia EC3 consegue mitigar as tensões harmônicas satisfatoriamente, enquanto as estratégias EC1 e EC2 não conseguem compensá-las com tanta eficiência. As estratégias EC1 e EC2 são mais indicadas para consumidores finais, em que é necessário compensar as correntes harmônicas de um alimentador ou de uma carga específica, enquanto a estratégia EC3 é mais indicada para concessionárias de energia, em que a prioridade é amortecer os harmônicos de tensão presentes no sistema elétrico. Além destas simulações, foram realizadas simulações para comparar a combinação das estratégias de detecção harmônica com o controle VSG e a combinação das estratégias de detecção harmônica com controle PQ e, assim, evidenciar que o controle VSG pode contribuir para a estabilidade de frequência do sistema.

No capítulo 4, detectores harmônicos baseados em FLC são apresentados. Como os detectores estudados neste capítulo buscam amortecer as tensões harmônicas de um sistema, eles medem somente as tensões no PAC. Com estes detectores é possível selecionar os harmônicos a serem compensados e diferentes controladores, como P e PI, podem ser utilizados em cada componente harmônica. De acordo com o controlador escolhido, o amortecimento pode ser mais acentuado, como mostrado nas simulações que comparam as combinações do controle VSG com os detectores harmônicos FLC1 e FLC2. Neste capítulo é proposta a principal contribuição deste trabalho, um detector harmônico baseado em FLC com ganho adaptativo FLC3. Neste detector, o ganho do quinto harmônico é ajustado de acordo com o erro de medições de corrente e tensão de uma barra de interesse do sistema. Nos resultados das simulações que combinam o controle VSG e o detector harmônico FLC3, é possível observar que inversores instalados ao longo da rede podem melhorar o perfil de tensão da mesma.

5.1 Trabalhos futuros

Para a continuidade dos estudos realizados nesta tese, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Acrescentar ganhos adaptativos no detector harmônico em outras frequências além do 5º harmônico;
- Acrescentar o DHT da corrente para o ajuste do ganho adaptativo;
- Aplicar a combinação do controle VSG com o detector harmônico baseado em FLC com ganho adaptativo em sistemas com maior número de barras;
- Implementar a combinação do controle VSG com o detector harmônico baseado em FLC com ganho adaptativo em um processador de sinais externo ao Typhoon HIL.

REFERÊNCIAS

ABOLHASSANI, Mehdi T.; TOLIYAT, Hamid A.; ENJETI, Prasad. Harmonic compensation using advanced electrical machines. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, [S. l.], v. 2, p. 1388–1393, 2001. a. DOI: 10.1109/IECON.2001.975984.

ABOLHASSANI, Mehdi T.; TOLIYAT, Hamid A.; ENJETI, Prasad. An electromechanical active harmonic filter. **IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, [S. l.], p. 349–355, 2001. b. DOI: 10.1109/IEMDC.2001.939324.

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ALRAJHI ALSIRAJI, Hasan; EL-SHATSHAT, Ramadan. Comprehensive assessment of virtual synchronous machine based voltage source converter controllers. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. 1762–1769, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1423>. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1423>.

ALTAF, M. W.; ARIF, M. T.; SAHA, S.; ISLAM, S. N.; HAQUE, M. E.; OO, A. M. T. Effective ROCOF-Based Islanding Detection Technique for Different Types of Microgrid. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S. l.], v. 58, n. 2, p. 1809–1821, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3146094.

AMORIM, T. S.; CARLETTI, D.; ENCARNAÇÃO, L. F. Virtual Synchronous Generator with Harmonic Current Filtering Capability Based on Voltage Detection. *In*: PROCEEDINGS OF 2019 IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES EUROPE, ISGT-EUROPE 2019 2019a, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905706.

AMORIM, Thiago Silva; CARLETTI, Daniel; ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera. Gerador Síncrono Virtual com Compensação de Correntes Harmônicas. *In*: (Marcos de Sales Guerra Tsuzuki, Fabrício Junqueira, Org.)2018 13TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: IEEE, 2018. p. 1196–2002.

AMORIM, Thiago Silva; CARLETTI, Daniel; ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera. Enhanced Virtual Synchronous Generator with Harmonic Current Filtering Capability. *In: IECON 2019 - 45TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY 2019b*, Lisbon, Portugal. **Anais [...]**. Lisbon, Portugal: IEEE, 2019. p. 1732–1737. DOI: 10.1109/IECON.2019.8926804. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8926804/>.

AMORIM, Thiago Silva; CARLETTI, Daniel; ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera. Comparison of inverter controllers with synthetic inertia and harmonic compensation features. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 197, p. 107344, 2021. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107344.

AOUINI, Raouia; MARINESCU, Bogdan; BEN KILANI, Khadija; ELLEUCH, Mohamed. Stability improvement of the interconnection of weak AC zones by synchronverter-based HVDC link. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 142, p. 112–124, 2017. DOI: 10.1016/J.EPSR.2016.09.005.

BARRIOS-GOMEZ, J. A.; SANCHEZ, F.; CLAUDIO, G.; GONZALEZ-LONGATT, F.; ACOSTA, M.; TOPIC, D. RoCoF Calculation Using Low-Cost Hardware in the Loop: Multi-area Nordic Power System. *In: 2020 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (SST) 2020*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 187–192. DOI: 10.1109/SST49455.2020.9264119.

BARROS JUNIOR, Odair de Barros; AMORIM, Thiago Silva; CARLETTI, Daniel; NETO, Anselmo Frizera; ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera. Design of an Enhanced FLC-Based Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. **Electronics 2020**, Vol. 9, Page 2052, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 2052, 2020. DOI: 10.3390/ELECTRONICS9122052. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/12/2052/htm>. Acesso em: 26 abr. 2022.

BECK, Hans Peter; HESSE, Ralf. Virtual synchronous machine. **2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU**, [S. l.], 2007. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220.

BEVRANI, Hassan; ISE, Toshifumi; MIURA, Yushi. Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S. l.], v. 54, p. 244–254, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061513003062>.

CHEN, Jikai; LI, Haoyu; YANG, Shiyan. Simulation study for harmonic compensation system with synchronous machine based on park transformation. **2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09**, [S. l.], p. 1713–1718, 2009. DOI: 10.1109/IPEMC.2009.5157669.

CHEN, Yong; HESSE, Ralf; TURSCHNER, Dirk; BECK, Hans Peter. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines. **International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**, [S. l.], 2011. DOI: 10.1109/POWERENG.2011.6036498.

D'ARCO, Salvatore; SUUL, Jon Are. Virtual synchronous machines - Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids. **2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013**, [S. l.], 2013. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652456.

D'ARCO, Salvatore; SUUL, Jon Are; FOSSO, Olav B. Control system tuning and stability analysis of Virtual Synchronous Machines. **2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013**, [S. l.], p. 2664–2671, 2013. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647045.

DRIESEN, Johan; VISSCHER, Klaas. Virtual synchronous generators. **IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES**, [S. l.], 2008. DOI: 10.1109/PES.2008.4596800.

ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera; CARLETTI, Daniel; DE ANGELI SOUZA, Sabrina; DE BARROS, Odair; BROEDEL, Dayane Corneau; RODRIGUES, Patrick Trivilin. Virtual Inertia for Power Converter Control. **Advances in Renewable Energies and Power Technologies**, [S. l.], v. 2, p. 377–411, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-813185-5.00010-3.

FRANÇA, Bruno Wanderley; AREDES, Mauricio; DA SILVA, Leonardo F.; GONTIJO, Gustavo F.; TRICARICO, Thiago C.; POSADA, Johnny. An Enhanced Shunt Active Filter Based on Synchronverter Concept. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 494–505, 2022. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3103836.

FUKAMI, Tadashi; ONCHI, Toshinari; NAOE, Nobuyuki; HANAOKA, Ryoichi. Compensation for neutral current harmonics in a three-phase four-wire system by a synchronous machine. **IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines and Drives**

Conference, [S. l.], p. 466–470, 2001. DOI: 10.1109/IEMDC.2001.939346.

HOSSEINI, Delnia; NADERI, Mobin; SHAFIEE, Qobad; SAVAGHEBI, Mehdi; BEVRANI, Hassan. Virtual Synchronous Generator Controller for Power Quality Enhancement in Microgrids. **2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation, ICCIA 2022**, [S. l.], 2022. DOI: 10.1109/ICCIA54998.2022.9737193.

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), 2019. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std 519-1992, 1993. DOI: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.

IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014), 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9848440.

IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), 2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112.

KARAPANOS, Vasileios; KOTSAMPOPOULOS, Panos; HATZIARGYRIOU, Nikos. Performance of the linear and binary algorithm of virtual synchronous generators for the emulation of rotational inertia. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 123, p. 119–127, 2015. DOI: 10.1016/J.EPSR.2015.02.004.

KAZEMI, Hamed Mohammad; AFJEI, Ebrahim; RAHMATI, Ali. A combination of VSG and amended fractional-order repetitive control for improving power quality of grid-connected inverter. **Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1109/EPE.2019.8778191.

KUNDUR, Prabha; BALU, Neil J.; LAUBY, Mark G. **Power System Stability and Control**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede; HANSEN, Steffan. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S. l.], v. 41, n. 5, p. 1281–1291, 2005. DOI: 10.1109/TIA.2005.853373.

LISERRE, Marco; TEODORESCU, Remus; BLAABJERG, Frede. Multiple harmonics

control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 836–841, 2006. DOI: 10.1109/TPEL.2006.875566.

LOU, Guannan; YANG, Quan; GU, Wei; QUAN, Xiangjun; GUERRERO, Josep; LI, Shanlin. Analysis and Design of Hybrid Harmonic Suppression Scheme for VSG Considering Nonlinear Loads and Distorted Grid. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [S. l.], v. 36, n. 4, p. 3096–3107, 2021. DOI: 10.1109/TEC.2021.3063607.

MA, Zhenyu; ZHONG, Qing Chang. Synchronverter-based Control Strategy for Back-to-back Converters in Wind Power Applications. **IFAC Proceedings Volumes**, [S. l.], v. 45, n. 21, p. 349–354, 2012. DOI: 10.3182/20120902-4-FR-2032.00062.

MACHOWSKI, Jan; LUBOSNY, Zbigniew; W. BIALEK, Janusz; R. BUMBY, James. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2020.

MONTEIRO, L. F. C.; ENCARNAÇÃO, L. F.; AREDES, M. A novel selective control algorithm for the shunt active filter. *In*: THE 2010 INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE - ECCE ASIA - 2010, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 2288–2293. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5543147.

MORÁN, Luis; DIXON, Juan. Active Filters. **Power Electronics Handbook**, [S. l.], p. 1067–1102, 2007. DOI: 10.1016/B978-012088479-7/50057-2.

PELCZAR, Christopher. **Mobile virtual synchronous machine for vehicle-to-grid applications**. 2012. Germany, 2012. DOI: <https://doi.org/>. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22073234>.

PEPERMANS, Guido; DRIESEN, J.; HAESLONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2003.10.004.

QU, Zisen; YANG, Huan; CAI, Yunyi; WANG, Haibing. Application of virtual synchronous generator technology in three-phase four-leg inverter. **2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017**, [S. l.], 2017. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056346.

REYNOLDS, Terry S.; BERNSTEIN, Theodore. Edison and “The Chair”. **IEEE Technology and Society Magazine**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 19–28, 1989. DOI: 10.1109/44.17683.

RIVIERE, Cameron N.; SCOTT RADER, R.; THAKOR, Nitish V. Adaptive canceling of physiological tremor for improved precision in microsurgery. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, [S. l.], v. 45, n. 7, p. 839–845, 1998. DOI: 10.1109/10.686791.

RIVIERE, Cameron N.; THAKOR, Nitish V. Modeling and canceling tremor in human-machine interfaces. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 29–36, 1996. DOI: 10.1109/51.499755.

RODRÍGUEZ, P.; LUNA, A.; CIOBOTARU, M.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F. Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, [S. l.], p. 5173–5178, 2006. DOI: 10.1109/IECON.2006.347807.

SAKIMOTO, K.; MIURA, Y.; ISE, T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function. **8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: “Green World with Power Electronics”, ICPE 2011-ECCE Asia**, [S. l.], p. 1498–1505, 2011. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944492.

SOUZA, Sabrina de Angeli; ENCARNAÇÃO, Lucas Frizera; CARLETTI, Daniel; BRUNORO, Marcelo. A Virtual Synchronous Machine Implementation and a Tuning Strategy for its Excitation and Governing Systems. *In*: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal

TAKASE, Fuyuto; TOMINAGA, Masatoshi; UEDA, Yoshisuke; TEMMA, Takamasa; GENJI, Takamu; OKU, Kiyoshi; HIRA, Takayuki; ASHIZAWA, Atsushi. Harmonic compensation using a synchronous machine with resonant field circuits. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 143–148, 1997. DOI: 10.1109/60.629696.

VAN WESENBEECK, M. P. N.; DE HAAN, S. W. H.; VARELA, P.; VISSCHER, K. Grid tied converter with virtual kinetic storage. **2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future**, [S. l.], 2009. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282048.

VAZ, Christopher; KONG, Xuan; THAKOR, Nitish. An Adaptive Estimation of Periodic

Signals Using a Fourier Linear Combiner. **IEEE Transactions on Signal Processing**, [S. l.], v. 42, n. 1, p. 1–10, 1994. DOI: 10.1109/78.258116.

VISSCHER, Klaas; HAAN, Sjoerd Walter Hero De. Virtual synchronous machines (VSG's) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation. *In*: CIREN SEMINAR 2008: SMARTGRIDS FOR DISTRIBUTION 2008, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–4.

ZHANG, Chang Hua; ZHONG, Qing Chang; MENG, Jin Song; CHEN, Xin; HUANG, Qi; CHEN, Shu Heng; LV, Zhi Peng. An improved synchronverter model and its dynamic behaviour comparison with synchronous generator. **IET Conference Publications**, [S. l.], v. 2013, n. 623 CP, 2013. DOI: 10.1049/CP.2013.1879.

ZHONG, Qing Chang; MA, Zhenyu; MING, Wen Long; KONSTANTOPOULOS, George C. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 89, p. 719–726, 2015. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2014.10.027.

ZHONG, Qing Chang; WEISS, George. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S. l.], v. 58, n. 4, p. 1259–1267, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2010.2048839.

APÊNDICE A – MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA COMPENSAÇÃO DE HARMÔNICOS

Em (TAKASE et al., 1997), os autores propuseram um método para compensar os harmônicos de uma carga não linear específica a partir do uso de uma máquina com múltiplos enrolamentos de campo. No sistema apresentado, os enrolamentos de campo são auto excitados passivamente por capacitores ressonantes sem controle. Com o uso desta máquina, as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem podem ser absorvidas.

O 5º harmônico de corrente dos enrolamentos da armadura produz uma força magnetomotriz (FMM) que gira na velocidade de 5ω na direção reversa em relação ao campo girante do estator, onde ω é velocidade mecânica em ângulo elétrico. De modo similar, o 7º harmônico de corrente gira na velocidade de 7ω na mesma direção em relação ao campo girante do estator. Como pode ser visto na Tabela 56, do ponto de vista do rotor, ambos campos magnéticos giram a uma velocidade de 6ω e em direções opostas. Estas FMM de velocidade 6ω podem ser canceladas se os 6º harmônicos de correntes de sequências positiva e negativa são injetados nos enrolamentos de campo de eixo d e de eixo q .

Tabela 56 - Explicação da FMM interna

Corrente de armadura	5º harmônico	7º harmônico
Rotação mecânica	Rotação na direção direta (ω)	Rotação na direção direta (ω)
Rotação elétrica	Rotação na direção reversa (5ω)	Rotação na direção direta (7ω)
FMM do ponto de vista do rotor	Rotação na direção reversa (6ω)	Rotação na direção direta (6ω)
Corrente de campo	6º harmônico de sequência-negativa	6º harmônico de sequência-positiva

Fonte: elaborada pelo autor.

Os 6º harmônicos de correntes podem ser fornecidos por fontes harmônicas CA ou por capacitores ressonantes conectados nos enrolamentos de campo. Os 6º harmônicos de tensão são induzidos nos enrolamentos de campo pelos 5º ou 7º harmônicos da corrente de armadura. Se os capacitores ressonantes com esta tensão induzida são escolhidos, as correntes de 6º harmônico circularão nos enrolamentos de campo.

O circuito experimental proposto em (TAKASE et al., 1997) é mostrado na Figura 61. Os capacitores ressonantes são conectados aos enrolamentos de campo dos eixos d e q . Como uma fonte CC é uma fonte de tensão constante e curto-circuitada para harmônicos, uma *choke coil*, que previne que o 6º harmônico de corrente circule pela fonte CC, é conectada em série com a fonte CC. O gerador de harmônicos fornece os 5º e 7º harmônicos de corrente.

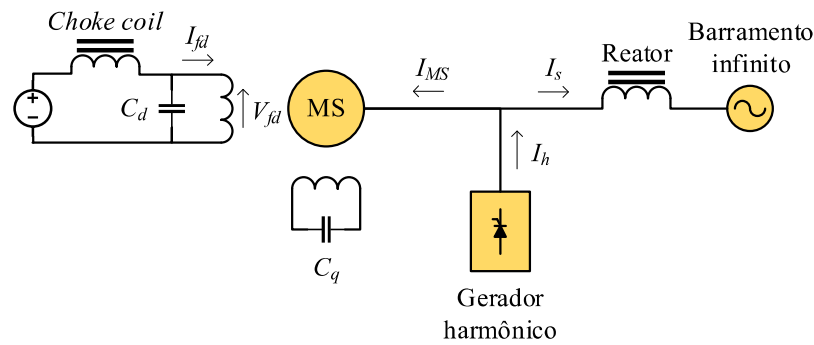


Figura 61 - Circuito experimental da compensação harmônica usando uma máquina síncrona com circuitos de campo ressonante
Fonte: elaborada pelo autor.

Em (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001a), os autores propõem um filtro ativo eletromecânico para cancelar os harmônicos mais dominantes gerados pelas cargas não lineares. Nesta proposta, os 5º e 7º harmônicos são suprimidos e os 11º e 13º harmônicos são reduzidos significativamente. A abordagem proposta consiste de uma máquina de enrolamento concentrado de entreferro assimétrico (AACWSM, tradução livre do inglês *asymmetric air gap concentrated winding machine*) com excitação de campo CC e CA. A AACWSM é uma máquina projetada para desenvolver um campo eletromagnético (EMF) retangular, ao invés do senoidal convencional de máquinas CA, a fim de gerar os harmônicos necessários para a carga não linear. A fim de controlar a amplitude e a fase dos harmônicos de corrente nos enrolamentos de campo e a eliminação completa dos 5º e 7º harmônicos, é proposto injetar 2º, 4º e 6º harmônicos de corrente nos enrolamentos de campo. A corrente de excitação do campo com 2º, 4º e 6º harmônicos controláveis é gerada por amplificadores de potência chaveados.

As vantagens desta proposta são:

- Correntes harmônicas da rede de 5ª e 7ª ordens geradas por cargas não lineares são canceladas e as correntes harmônicas de 11ª e 13ª ordens são reduzidas significativamente;
- A abordagem é robusta e pode ser adaptada para sistemas de baixa e média tensão;
- O sistema pode ser controlado para simultaneamente transferir potência ativa para a carga, compensar energia reativa e compensar harmônicos gerados por cargas não lineares em uma planta industrial.

O diagrama de blocos do filtro harmônico eletromecânico proposto é mostrado na Figura 62. O bloco detector harmônico detecta a amplitude e a fase dos harmônicos produzidos pela carga não linear. A detecção dos 5º e 7º harmônicos gerados pela carga não linear é feita com o uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) e o sinal segue para o bloco de decisão da compensação harmônica. Neste bloco, a corrente de excitação para o cancelamento destas componentes harmônicas é calculada e então o controle da corrente de excitação é feito no bloco Circuito de Excitação de Campo.

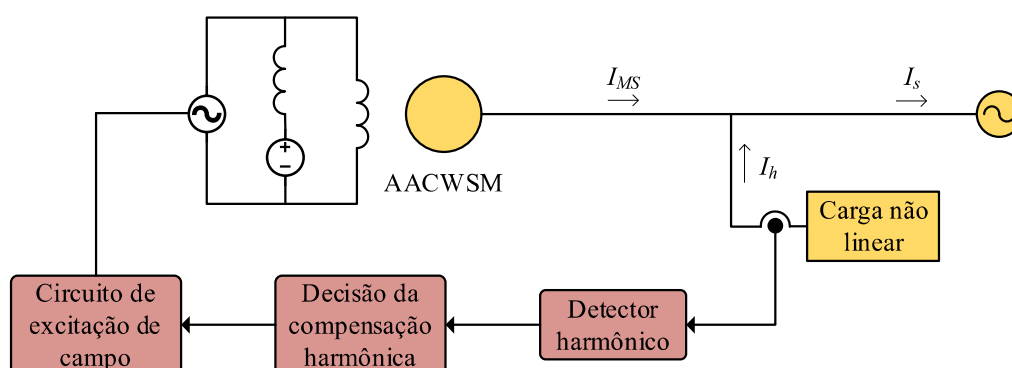


Figura 62 - Circuito do filtro harmônico eletromecânico proposto usando AACWSM

Fonte: elaborada pelo autor.

A corrente de campo é a combinação dos 2º, 4º e 6º harmônicos e da corrente CC. Inicialmente, para encontrar as quantidades necessárias destes harmônicos, o 6º harmônico de corrente é ajustado de maneira que seja produzido o 7º harmônico necessário. O 4º harmônico de corrente a ser injetado é ajustado para gerar o restante do 5º harmônico de corrente necessário. Por fim, o 2º harmônico é calculado a fim de cancelar o 3º harmônico de corrente. A Tabela 57 mostra a combinação dos harmônicos injetados no enrolamento de campo e as FMMs produzidas.

Tabela 57 - Combinação dos harmônicos injetados no enrolamento de campo e as FMMs produzidas

Correntes harmônicas injetadas no enrolamento de campo	FMM produzidas		Correntes produzidas
	Direta	Reversa	
6º	7º	5º	i_5, i_7
4º	5º	3º	i_3, i_5
2º	3º	1º	i_1, i_3
Total	7º, 5º, 1º		i_1, i_5, i_7

Fonte: elaborada pelo autor.

Em (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001b), os autores propõem o uso de uma máquina síncrona convencional com modificação adequada nos circuitos de excitação de campo para compensar os harmônicos de corrente de uma carga específica. Com um controle apropriado da excitação de campo, o filtro harmônico eletromecânico proposto pode

compensar os 5º e 7º harmônicos presentes no sistema elétrico de distribuição. Esta abordagem permite o controle independente dos 5º e 7º harmônicos em amplitude e fase. A corrente de excitação do campo com 2º, 4º e 6º harmônicos controláveis são gerados com o uso de amplificadores chaveados de potência.

As vantagens desta proposta são:

- Um gerador síncrono padrão pode ser modificado para realizar a função de um compensador harmônico ativo;
- Correntes harmônicas da rede de 5ª e 7ª ordens geradas por cargas não lineares são canceladas;
- A abordagem é robusta e pode ser adaptada para sistemas de baixa e média tensão;
- O sistema pode ser controlado para simultaneamente transferir potência ativa para a carga, compensar energia reativa e compensar harmônicos gerados por cargas não lineares em uma planta industrial.

O circuito de blocos do filtro harmônico eletromecânico é mostrado na Figura 63. O bloco Detector Harmônico detecta a amplitude e a fase dos 5º e 7º harmônicos gerados pela carga não linear. A detecção dos 5º e 7º harmônicos de corrente é feita com o uso da FFT e o sinal segue para o bloco Decisão da corrente de campo CA. Neste bloco, a corrente de excitação para cancelar estes harmônicos é calculada e, então, a corrente de excitação a ser chaveada pelo conversor PWM é calculada no bloco Corrente de referência.

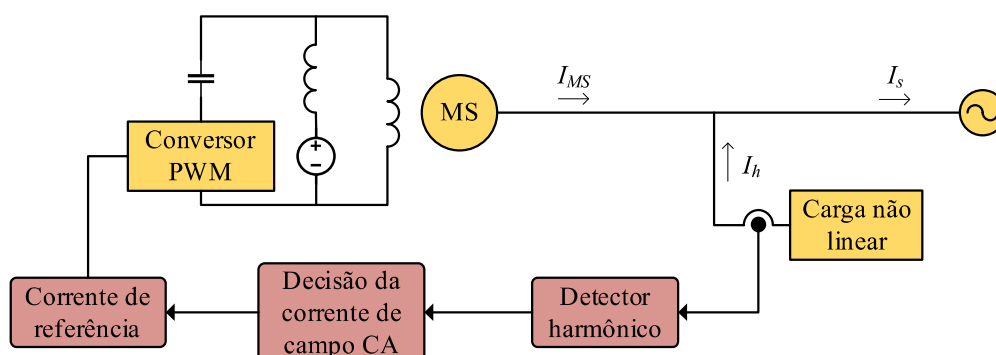


Figura 63 - Circuito do filtro harmônico eletromecânico proposto usando uma MS convencional
Fonte: elaborada pelo autor.

A combinação das correntes harmônicas injetadas no campo a fim de compensar as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens de uma carga não linear é similar a proposta em (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001a) e é mostrada na Tabela 57.

Em (FUKAMI et al., 2001), os autores propõem um novo método que absorve passivamente todas as correntes harmônicas de sequência zero de neutro da rede por uma máquina síncrona. Quando o enrolamento da armadura é arranjado em 2/3 do enrolamento de passo encurtado (do inglês *short-pitch winding*), as reatâncias de sequência zero da máquina síncrona atingem o valor mínimo, que permite a compensação harmônica pela máquina síncrona. Uma das características notáveis deste método é que vários harmônicos podem ser simultaneamente absorvidos sem controle adicional.

A Figura 64 apresenta o circuito do sistema experimental para compensação de correntes harmônicas de neutro em um sistema trifásico a quatro fios por uma MS.

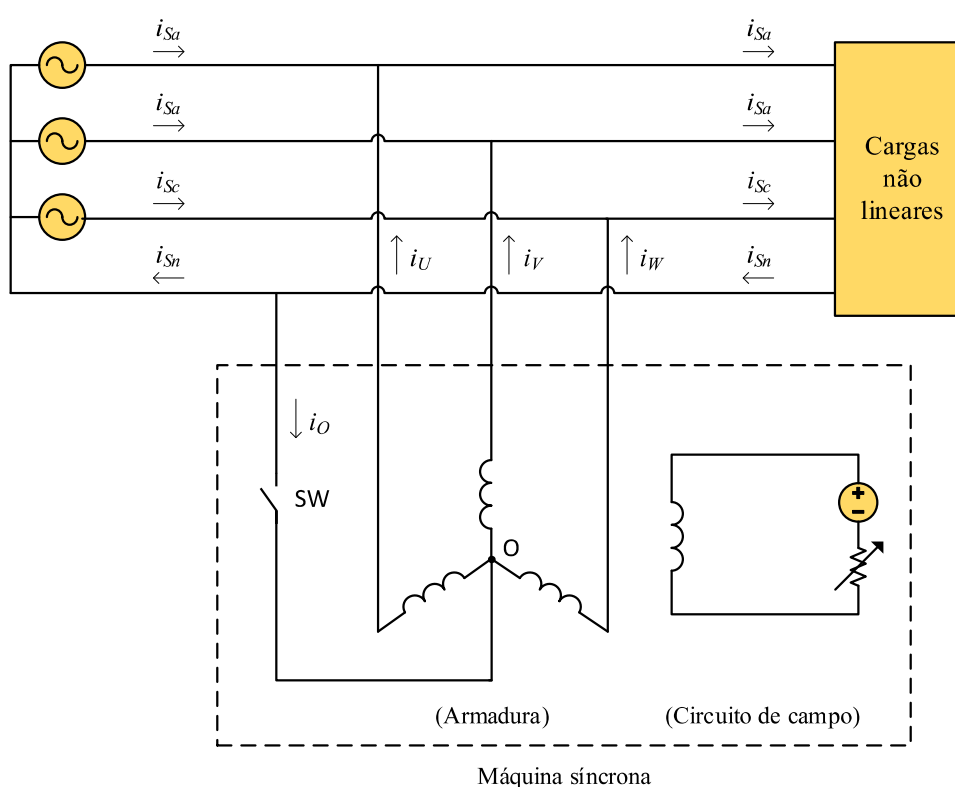


Figura 64 - Circuito experimental da compensação de correntes harmônicas de neutro em um sistema trifásico a quatro fios por uma MS

Fonte: adaptada de FUKAMI et al. (2001).

A máquina síncrona utilizada para absorção de harmônicos é instalada entre a fonte e as cargas não lineares. O ponto neutro do enrolamento de armadura (O) conecta ao neutro da

rede através de uma chave (SW). Por fazê-lo, o circuito que pode compensar as correntes harmônicas de sequência zero será configurado quando SW é fechada. Além disso, um reator amortecedor (do inglês *buffer*) L_B é instalado no lado da fonte do neutro da rede de modo que as características da compensação harmônica não dependam da impedância do lado da fonte.

Como pode ser visto na Figura 64, as correntes harmônicas de sequência zero geradas pelas cargas não lineares podem fluir na máquina síncrona e na fonte de energia. Portanto, se for possível, fazer as impedâncias de sequência zero da máquina síncrona suficientemente menores que as da fonte de energia, a máquina síncrona permitiria a absorção das correntes harmônicas de sequência zero.

Geralmente, quando uma corrente harmônica de sequência zero flui no enrolamento de armadura da máquina síncrona, um campo magnético alternado será produzido dentro dele. Por esta razão, a reatância de sequência zero da máquina síncrona se torna relativamente grande. Como resultado, a máquina síncrona não pode absorver as correntes harmônicas de sequência zero efetivamente.

Em contraste a isso, quando a bobina de passo do enrolamento de armadura é selecionada como 2/3 do enrolamento de passo encurtado, o campo magnético alternado não é produzido pela corrente de sequência zero. Como resultado, a reatância de sequência zero da máquina síncrona se torna a mínima. Neste caso, pode ser visto que o sistema com respeito aos harmônicos de sequência zero é aproximadamente curto-circuitado pela resistência de armadura da máquina síncrona. Consequentemente, é possível absorver simultaneamente todas as correntes harmônicas de sequência zero pela máquina síncrona.

As vantagens desta proposta são:

- O método proposto pode compensar simultaneamente todas as correntes harmônicas de sequência zero sem controle adicional;
- Além da compensação harmônica, a máquina síncrona proposta pode simultaneamente operar como um motor ou gerador;
- A potência reativa no sistema de distribuição pode ser facilmente controlada quando a MS opera como condensador síncrono.

Este método pode ser utilizado em MS com rotor cilíndrico ou polos salientes.

Em (ABOLHASSANI; TOLIYAT; ENJETI, 2001a, 2001b; TAKASE et al., 1997), os autores introduzem o princípio da FMM harmônica inversa (tradução livre de *principle of harmonic MMF counteraction*), mas não propõem circuito equivalente e modelo matemático detalhado da MS funcionando sob condição harmônica. Em (CHEN; LI; YANG, 2009), baseado na Transformada de Park, os autores propõem o modelo matemático e o circuito equivalente do sistema de compensação harmônico pela máquina síncrona com capacitor ressonante. Algumas conclusões foram obtidas a partir deste estudo:

- A corrente harmônica de h -ésima ordem excitada pelo capacitor ressonante no enrolamento de campo pode gerar uma FMM inversa para eliminar a FMM induzida pelas correntes harmônicas de $(h-1)$ -ésima e $(h+1)$ -ésima ordem que circulam no enrolamento de armadura, que resulta na redução da impedância da máquina síncrona para as correntes harmônicas de $(h-1)$ -ésima e $(h+1)$ -ésima ordem. Assim, as essas correntes harmônicas são absorvidas pelo sistema de compensação baseado em máquina síncrona;
- Diferentes ordens de correntes harmônicas podem ser compensadas a partir do ajuste do valor do capacitor de ressonância;

A compensação harmônica de algumas ordens de correntes harmônicas pode não ser tão boa quanto outras.

APÊNDICE B – PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Os seguintes artigos foram publicados a partir dos estudos realizados neste trabalho:

- [1] AMORIM, THIAGO SILVA; CARLETTI, DANIEL; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Comparison of inverter controllers with synthetic inertia and harmonic compensation features. **ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH**, v. 197, p. 107344, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107344>.
- [2] AMORIM, THIAGO SILVA; CARLETTI, DANIEL; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Virtual Synchronous Generator with Harmonic Current Filtering Capability Based on Voltage Detection. In: 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGTEurope), 2019, **Bucharest. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)**, 2019. p. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905706>.
- [3] AMORIM, THIAGO SILVA; CARLETTI, DANIEL; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Enhanced Virtual Synchronous Generator with Harmonic Current Filtering Capability. In: IECON 2019 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, Lisbon. **IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, 2019. p. 1732–1737. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926804>.
- [4] AMORIM, THIAGO SILVA; CARLETTI, DANIEL; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Gerador Síncrono Virtual com Compensação de Correntes Harmônicas. In: 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications INDUSCON 2018, 2018, São Paulo. **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications INDUSCON 2018**, 2018. p. 1196–2002.

O aluno também participou, como coautor, da publicação dos seguintes artigos:

- [5] BACHETI, GABRIEL GABURRO; CAMARGO, RENNER SARTÓRIO; AMORIM, THIAGO SILVA; YAHYAOUI, IMENE ; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Model-Based Predictive Control with Graph Theory Approach Applied to Multilevel Back-to-Back Cascaded H-Bridge Converters. **ELECTRONICS**, v. 11, p. 1711, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11111711>.
- [6] CARLETTI, DANIEL; AMORIM, ARTHUR EDUARDO ALVES; AMORIM, THIAGO SILVA; SIMONETTI, DOMINGOS SÁVIO LYRIO; FARDIN, JUSSARA FARIAS; ENCARNACAO, LUCAS FRIZERA. Adaptive Armature Resistance Control of Virtual Synchronous Generators to Improve Power System Transient Stability. **Energies**, v. 13, p. 2365, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13092365>.
- [7] BARROS JUNIOR, ODAIR DE; AMORIM, THIAGO SILVA; CARLETTI, DANIEL; FRIZERA NETO, ANSELMO; ENCARNAÇÃO, LUCAS FRIZERA. Design of an Enhanced FLC-Based Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. **ELECTRONICS**, v. 9, p. 2052, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9122052>.
- [8] DE BARROS, ODAIR ; AMORIM, THIAGO SILVA ; NETO, ANSELMO FRIZERA ; ENCARNACAO, LUCAS FRIZERA. Novel active filter selective control strategy using fourier linear combiners. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018, Niteroi. **2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**, 2018. p. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395528>.

APÊNDICE C – CARGAS HARMÔNICAS

Neste trabalho, as cargas harmônicas foram modeladas como fontes de corrente controladas, visto que o uso de cargas lineares baseadas em eletrônica de potência, como retificadores monofásicos e trifásicos, impossibilitaria a simulação em tempo real nos sistemas propostos.

A Tabela 58 mostra o conteúdo harmônico da carga harmônica nos cenários C1 e C2.

Tabela 58 - Harmônicos e sequências da carga modelada como fonte de corrente nos em C1 e C2

h	Seq. + (A)	Seq. – (A)	Seq. 0 (A)
1	75	15	0
3	0	0	0
5	1	5	0
7	5	1	0
9	0	0	0
11	0,5	2,5	0

Fonte: elaborada pelo autor.

As Tabelas 52, 53 e 54 mostram os conteúdos das cargas harmônicas nos cenários C3, C4 e C5, respectivamente.

Tabela 59 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C3

t (s)	h	Carga 1			Carga 2		
		Seq. + (A)	Seq. – (A)	Seq. 0 (A)	Seq. + (A)	Seq. – (A)	Seq. 0 (A)
$0 \leq t < 2$	1	75	15	0	37,5	7,5	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	1	5	0	0,5	2,5	0
	7	5	1	0	2,5	0,5	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,5	2,5	0	0,25	1,25	0
	13	1,5	0,3	0	0,75	0,15	0
$2 \leq t < 3$	1	62,5	12,5	0	31,25	6,25	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,5	2,5	0	0,25	1,25	0
	7	2,5	0,5	0	1,25	0,25	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,25	1,25	0	0,13	0,63	0
	13	0,75	0,15	0	0,38	0,08	0
$t \geq 3$	1	68,75	13,75	0	34,38	6,88	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,75	3,75	0	0,38	1,88	0
	7	3,75	0,75	0	1,88	0,38	0
	11	0,38	1,88	0	0,19	0,94	0
	13	1,13	0,23	0	0,56	0,11	0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 60 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C4

t (s)	h	Carga 1			Carga 2		
		Seq. + (A)	Seq. - (A)	Seq. 0 (A)	Seq. + (A)	Seq. - (A)	Seq. 0 (A)
$0 \leq t < 2$	1	60	12	0	30	6	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,4	2	0	0,2	1	0
	7	2	0,4	0	1	0,2	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,2	1	0	0,1	0,5	0
	13	0,6	0,12	0	0,3	0,06	0
$2 \leq t < 3$	1	75	15	0	37,5	7,5	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	1	5	0	0,5	2,5	0
	7	5	1	0	2,5	0,5	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,5	2,5	0	0,25	1,25	0
	13	1,5	0,3	0	0,75	0,15	0
$t \geq 3$	1	65	13	0	32,5	6,5	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,6	3	0	0,3	1,5	0
	7	3	0,6	0	1,5	0,3	0
	11	0	0	0	0	0	0
	13	0,3	1,5	0	0,15	0,75	0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 61 - Harmônicos e sequências das cargas modeladas como fonte de corrente nos em C5

t (s)	h	Carga 1			Carga 2		
		Seq. + (A)	Seq. - (A)	Seq. 0 (A)	Seq. + (A)	Seq. - (A)	Seq. 0 (A)
$0 \leq t < 2$	1	45	9	0	45	9	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,3	1,5	0	0,3	1,5	0
	7	1,5	0,3	0	1,5	0,3	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,15	0,75	0	0,15	0,75	0
	13	0,45	0,09	0	0,45	0,09	0
$2 \leq t < 3$	1	50,63	10,13	0	50,63	10,13	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,53	2,63	0	0,53	2,63	0
	7	2,63	0,53	0	2,63	0,53	0
	9	0	0	0	0	0	0
	11	0,27	1,31	0	0,27	1,31	0
	13	0,79	0,16	0	0,79	0,16	0
$t \geq 3$	1	56,25	11,25	0	56,25	11,25	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5	0,75	3,75	0	0,75	3,75	0
	7	3,75	0,75	0	3,75	0,75	0
	11	0	0	0	0	0	0
	13	0,38	1,88	0	0,38	1,88	0

Fonte: elaborada pelo autor.