



UM FILTRO HÍBRIDO DE POTÊNCIA PARA CONEXÃO EM REDES ELÉTRICAS DE ALTA TENSÃO SEM TRANSFORMADORES

Arthur do Carmo Mouco

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

Orientador: Mauricio Aredes.

Rio de Janeiro

Junho de 2011

UM FILTRO HÍBRIDO DE POTÊNCIA PARA CONEXÃO EM REDES ELÉTRICAS
DE ALTA TENSÃO SEM TRANSFORMADORES

Arthur do Carmo Mouco

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

Examinada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Ricardo Lúcio de Araújo Ribeiro, Dsc.

Prof. Luís Fernando Corrêa Monteiro, Dsc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2011

Mouco, Arthur do Carmo

Um Filtro Híbrido de Potência para Conexão em
Redes Elétricas de Alta Tensão Sem Transformadores /
Arthur do Carmo Mouco. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2011.

IX, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Mauricio Aredes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 85-86.

1. Filtro Híbrido. 2. Correntes Harmônicas. 3.
Condicionamento de Energia. I. Aredes, Mauricio. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

DEDICATÓRIA
A meus pais,
Pelo exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS
A minha esposa.

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

UM FILTRO HÍBRIDO DE POTÊNCIA PARA CONEXÃO EM REDES ELÉTRICAS DE ALTA TENSÃO SEM TRANSFORMADORES

Arthur do Carmo Mouco

Junho/2011

Orientadores: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho é apresentado um filtro híbrido conectado em uma rede elétrica de alta tensão, sem transformadores. Para tal foi necessário a realização de adequações no princípio de funcionamento do conversor paralelo, o qual funciona como uma fonte de corrente controlada. Como resultado, foram concebidos novos algoritmos de controle. De fato, com as adequações implementadas nos algoritmos de controle é possível fazer com que a componente fundamental da tensão fique majorada sobre o filtro passivo. Neste sentido, o conversor de potência pode ser submetido a uma tensão baixa o suficiente para que a utilização da topologia convencional seja viável, eliminando a necessidade de utilizar transformadores de potência. Estas adequações consistem em contribuições originais do trabalho proposto. Testes e ensaios a partir de simulações computacionais são apresentados, com o objetivo de validar os algoritmos de controle propostos.

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

A TRANSFORMERLESS HYBRID FILTER FOR CONECTION IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS

Arthur do Carmo Mouco

June/2011

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

In this work a transformerless hybrid filter connected to a high voltage system is presented. This condition was possible to be implemented through modifications on the behavior of the shunt active converter, which acts as a controlled current source and, as consequence, it results in new control algorithms. In fact, with the adjustments implemented in the control algorithms it is possible to let the voltage fundamental component be depleted over the passive filter. In this sense, the low voltage applied in the power converter can allow the use of a conventional topology, eliminating the need of power transformers. These adjustments consist on original contributions of the proposed work. Tests performed and computer simulations are presented in order to validate the proposed control algorithms.

SUMÁRIO

1- Introdução.....	01
1.1- Identificação do Problema.....	01
1.2- Motivação do Trabalho.....	02
1.3- Objetivos e Contribuições.....	05
1.4- Estrutura da Dissertação.....	06
2- Sobrecarga Harmônica na SE Ibiúna.....	07
2.1- Introdução.....	07
2.2- Resultados da Campanha de Medição.....	08
2.3- Conclusões Parciais.....	20
3- Teoria da Potência Instantânea para Algoritmos de Controle em Tempo Real.....	21
3.1- Teoria de Potência Convencional.....	21
3.2- Bases da Teoria P-Q.....	24
3.3- Conclusões Parciais.....	30
4- Filtros de Potência Conectados em Paralelo no Sistema Elétrico.....	31
4.1- Introdução.....	31
4.2- Filtros Passivos.....	31
4.2.1- Algumas Topologias de Filtros Passivos.....	32
4.2.2- Metodologia para Dimensionamento do Filtro Passivo.....	34
4.3- Filtro Ativo Paralelo.....	38
4.3.1- Fundamentos de Controle para Filtro Ativo Paralelo.....	40
4.3.2- Algumas Técnicas de Chaveamento.....	41
4.4- Filtros Híbridos.....	42
4.5- Conclusões Parciais.....	44
5- Estratégias de Controle do Filtro Híbrido.....	45
5.1- Introdução.....	45
5.2- Estratégias de Controle.....	46
5.2.1- Estratégia de Detecção de Componente Harmônica.....	47
5.2.2- Estratégia de Controle da Injeção de Corrente Fundamental.....	53
5.2.3- Estratégia de Regulação de Tensão do Lado CC... ..	55

5.2.4-	Lógica de Chaveamento do Conversor.....	60
5.3-	Resposta do Filtro e Conclusões Parciais.....	62
6-	Filtro Híbrido Conectado a uma Rede Elétrica de Alta Tensão.....	64
6.1-	Dimensionamento do Filtro Híbrido.....	64
6.2-	Modelo Sistêmico Utilizado.....	66
6.3-	Resultados da Simulação.....	67
6.3.1-	Dinâmica do Filtro Híbrido.....	68
6.3.2-	Avaliação das Condições do Sistema.....	70
6.3.3-	Resultados Obtidos.....	71
6.4-	Conclusões Parciais.....	77
7-	Conclusões.....	81
7.1-	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	84

1 - INTRODUÇÃO

Os filtros ativos, quando comparados a filtros passivos, são superiores em termos de desempenho de filtragem, são fisicamente menores e mais flexíveis para aplicações. Com estes é possível realizar compensação harmônica, balanceamento de carga, compensação de energia reativa, redução de *flicker* de tensão e combinações dessas aplicações [1].

No entanto, a conexão desse tipo de filtro em sistemas de potência, com tensões e correntes elevadas, tem restrições. Isto se deve ao fato de que, atualmente, os dispositivos semicondutores disponíveis possuem características de operação (tensão de bloqueio e corrente de condução) com condições de serem utilizados, a priori, em redes elétricas de baixa tensão [2].

Uma possibilidade de suplantar essa restrição é combinar o filtro ativo com um filtro passivo, uma vez que estes são muito mais flexíveis quanto à aplicação em sistemas de potência. Através desta combinação, denominada filtro híbrido, é possível extrair as características positivas de ambos, permitindo sua conexão em alta tensão e levando a um melhor desempenho de filtragem [3].

Este trabalho propõe uma aplicação de filtro híbrido paralelo de forma a permitir sua conexão em uma barra de alta tensão do sistema interligado nacional (SIN). O objetivo é amenizar a sobrecarga harmônica identificada em filtros passivos instalados na SE Ibiúna, localizada na região metropolitana de São Paulo. Esta sobrecarga harmônica foi estudada através de uma campanha de medição de harmônicos realizada pelo operador nacional do sistema elétrico (ONS), descrita no Capítulo 2.

As adequações realizadas tanto no sistema de controle quanto no princípio de operação do filtro híbrido proposto constituem em contribuições originais deste trabalho.

1.1 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A região metropolitana de São Paulo, do qual fazem parte a SE Ibiúna e a SE Bandeirantes, tem um problema de sobrecarga de corrente harmônica de 5ª ordem,

verificado por meio de leituras realizadas nos filtros harmônicos de 3ª e 5ª ordem conectados ao barramento de 345kV da SE Ibiúna denominados ZRC e ZRN. O objetivo destes filtros, definido em projeto, era apenas a compensação da corrente harmônica gerada pelos conversores que compõem o elo de corrente contínua que leva energia da usina Itaipu a SE 345kV Ibiúna.

A região onde estão inseridas estas subestações está próxima a grandes centros industriais e também a uma grande carga residencial, a região metropolitana de São Paulo, sendo este o maior centro de carga da América latina. Devido ao problema de sobrecarga harmônica citado, foi realizado pelo ONS uma campanha de medição de correntes harmônicas no sistema de transmissão em torno da SE Ibiúna [4].

Esta campanha ocorreu em duas etapas ao longo de 2007 e início de 2008. O objetivo da campanha, como será discutido mais a frente, foi identificar a origem da sobrecarga harmônica encontrada nos filtros ZRC e ZRN da SE Ibiúna. Com base nos resultados obtidos, foi identificada a SE Bandeirantes como barra mais próxima à maior fonte contribuinte de corrente harmônica de 5ª ordem, e, portanto a principal responsável pela sobrecarga nos filtros da SE Ibiúna. Este aspecto motivou a busca por soluções para evitar a sobrecarga nos filtros, conforme descrito em seguida.

1.2 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O estudo realizado durante a campanha de medição [4,7] abrangeu vinte e duas subestações com níveis de tensão que variam de 500 a 88kV. Os resultados da campanha identificaram a SE Bandeirantes como a subestação mais próxima à maior fonte de corrente harmônica de 5ª ordem responsável pela sobrecarga nos filtros da SE Ibiúna. O caminho elétrico que conecta a SE Bandeirantes a SE Ibiúna é intermediado pela SE Xavantes e a SE Interlagos, ambas com nível de tensão de 345kV, como pode ser observado na Figura 1.1.

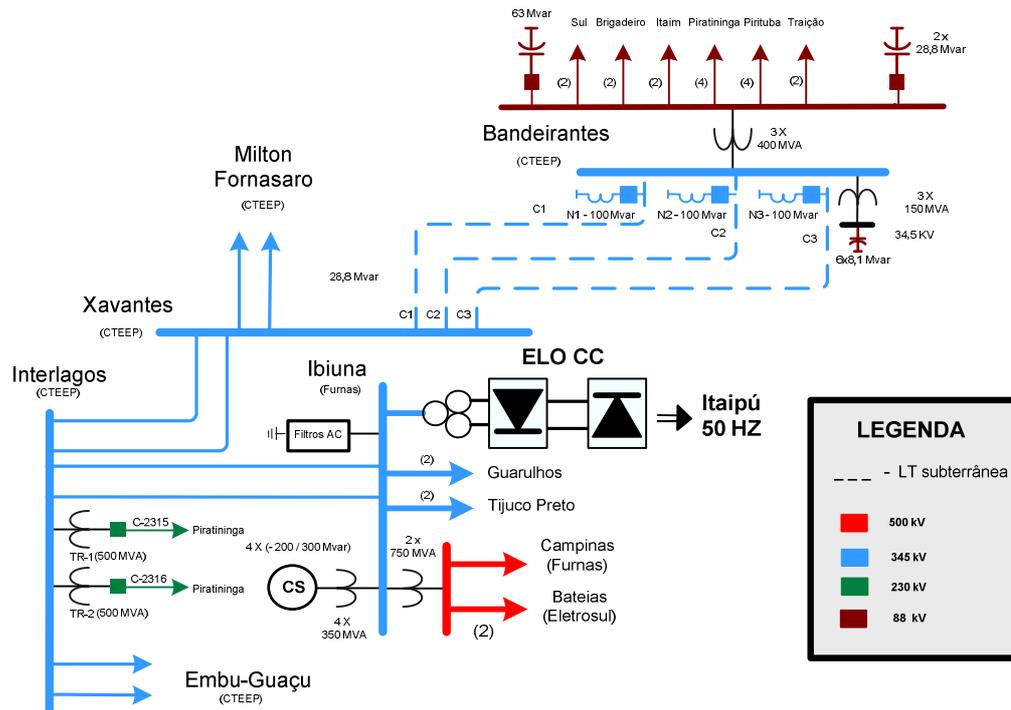


Figura 1.1 Sistema Elétrico Ibiúna-Interlagos-Xavantes-Bandeirantes

A proposta deste trabalho é uma solução prática ao problema de sobrecarga nos filtros harmônicos ZRC e ZRN de 3ª e 5ª ordem situados na SE Ibiúna. Em função do sistema foco do problema ser muito malhado, com pode ser visto na Figura 1.1, foi decidido que a proposta de solução depende de filtragem ativa de corrente, de forma a garantir que o filtro atinja seus objetivos na SE Ibiúna. Essa decisão, porém, levantou uma série de questionamentos sobre as dificuldades reais de tal implementação, como:

- Aplicação de semicondutores em alta tensão, que demandaria a utilização de um transformador.
- Custo do filtro.
- Dificuldades na utilização de medição das correntes na lógica de controle do filtro em um barramento com diversos circuitos conectados (19 circuitos trifásicos no caso da SE Bandeirantes).

- Erro associado a uma referência calculada, utilizando diversas medições (erro acumulado).
- Dimensionamento de parâmetros reais dos componentes do filtro.
- Robustez do filtro, uma vez que ele seria, teoricamente, submetido a variações de tensão e sobrecarga harmônica.

Durante a realização dos trabalhos, para reduzir o custo envolvido, foi definido que seria evitado o uso de um transformador para conexão do filtro ao barramento de alta tensão. De fato transformadores conectados a níveis elevados de tensão apresentam custo elevado. Isto pode tornar inviável a utilização do filtro híbrido. Neste sentido a decisão tomada foi estudar uma topologia de filtro híbrido, formado por um filtro passivo e um filtro ativo em série, que permitisse a sua conexão ao barramento do 88kV da SE Bandeirantes sem a utilização de transformadores, como mostrado na Figura 1.2. Neste filtro híbrido proposto, o filtro ativo funciona como uma fonte de corrente controlada para a componente harmônica de 5ª ordem.

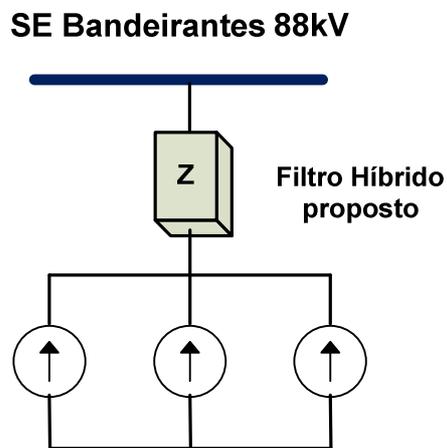


Figura 1.2 Filtro Proposto

O estudo das estratégias de controle para permitir sua aplicação nesse nível de tensão, além da estratégia de compensação harmônica baseada em medição de tensão, são o foco deste trabalho.

1.3 – OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo deste trabalho constitui em propor um novo princípio de funcionamento do filtro híbrido para viabilizar a sua conexão em redes de alta tensão e permitir que sua estratégia de controle de corrente harmônica seja baseada em medição de tensão. Conforme mencionado neste Capítulo, o filtro híbrido conectado ao barramento de 88kV da SE Bandeirante tem por objetivo minimizar a sobrecarga de corrente harmônica de 5ª ordem nos filtros ZRC e ZRN conectados ao barramento de 345kV da SE Ibiúna. Como parte dos objetivos durante o desenvolvimento deste trabalho, o dimensionamento dos componentes do filtro híbrido proposto foi feito de forma a trabalhar com valores reais, fisicamente reproduzíveis, permitindo assim uma proposta genuína de solução para o problema identificado.

Na bibliografia pesquisada, foi observado em [5] que o autor propõe como solução para controle de corrente harmônica a conexão de um filtro híbrido sem transformador a uma rede de 6.6kV. A solução proposta em [5] não seria a ideal para aplicação ao problema identificado neste trabalho, pois o autor utilizou na estratégia de controle a medição de correntes do sistema. Outro ponto que impossibilitaria sua aplicação neste caso é que a estratégia utilizada para chaveamento do conversor é baseada em uma referência de tensão; como resultado disso, a corrente produzida será a necessária para realizar a compensação e pode gerar valores impeditivos de corrente nos conversores.

Em outra proposta feita em [3], o autor utilizou um filtro híbrido para redução de componente harmônica de tensão em um sistema de baixa tensão, onde não há dificuldades impeditivas na aplicação de filtros ativos. Outro ponto observado foi que a estratégia de controle baseou-se em medição de corrente, o que também não seria aplicável ao problema proposto.

As contribuições deste trabalho estão na concepção e validação de novos algoritmos de controle para permitir que um filtro híbrido seja conectado a um barramento de alta tensão. Além disso, este filtro é capaz de produzir correntes de compensação harmônica baseado apenas em medição de tensão.

Após seu desenvolvimento, o filtro híbrido proposto foi testado em um modelo sistêmico composto por todas as barras, transformadores, linhas de transmissão, filtros e equipamentos de compensação que formam o sistema foco do estudo realizado pelo ONS [4,7]. Esse modelo é capaz de reproduzir condições similares às observadas no sistema real, permitindo assim verificar o comportamento do filtro híbrido proposto em condições reais de operação.

1.4 – ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. A seguir será feito um breve comentário sobre o conteúdo dos capítulos restantes.

O capítulo 2 apresenta o problema harmônico verificado na SE Ibiúna, detalhando os resultados da campanha de medição realizada pelo ONS.

O capítulo 3 descreve as diferenças entre a teoria de potência convencional e a teoria da potência instantânea, utilizada no desenvolvimento das lógicas de controle do filtro descrito, bem como as vantagens conceituais desta última.

O capítulo 4 traz o estado da arte relacionado a filtros conectados em paralelo, descrevendo as tecnologias de filtros passivos, ativos e híbridos, caracterizando seus tipos e algumas topologias possíveis.

O capítulo 5 descreve o desenvolvimento do filtro híbrido proposto, destacando separadamente todos os passos do dimensionamento, da criação das lógicas de controle e provendo resultados preliminares do desempenho verificado em um pequeno sistema teste desenvolvido.

O capítulo 6 detalha os parâmetros do modelo sistêmico utilizado para reproduzir as condições reais do sistema, com descrição dos ajustes realizados e a metodologia para inicialização do filtro, e provêm os resultados da aplicação do filtro híbrido desenvolvido neste sistema.

O capítulo 7 aborda as principais conclusões obtidas durante a realização do trabalho, incluindo sugestões para trabalhos futuros, encerrando assim o trabalho.

2 – SOBRECARGA HARMÔNICA NA SE IBIÚNA

2.1 – INTRODUÇÃO

Segundo a campanha de medição de harmônicas no sistema de transmissão em torno da SE Ibiúna para avaliação das sobrecargas harmônicas de corrente nos Filtros de 3ª e 5ª ordem harmônicas [4], o sistema de transmissão em corrente contínua da empresa FURNAS que leva energia da usina Itaipu (50Hz) até a subestação de 345kV Ibiúna necessitaria, visando apenas permitir a correta operação dos conversores em Ibiúna, de um filtro de 3ª e 5ª ordens conectado na barra de corrente alternada da referida SE. No projeto foram incluídos dois filtros de 3ª e 5ª ordem, os filtros ZRC de 279,8 Mvar e o ZRN de 296 Mvar, de forma que um filtro estaria sobressalente e sua função seria evitar, em caso de manutenção, que fosse necessário operar o elo de corrente contínua citado sem compensação harmônica.

O projeto do elo de corrente contínua indicava que no caso da perda dos dois filtros, ZRC e ZRN, a potência transmitida teria que ser reduzida de uma potência máxima de 6300MW [6] para apenas 160 MW. Essa restrição poderia trazer grandes transtornos para a operação do Sistema Interligado nacional.

Nos últimos anos foram registradas diversas ocorrências de sobrecarga harmônica nos filtros de 3ª e 5ª ordem instalados na subestação de Ibiúna, que culminaram no desligamento automático destes filtros por atuação de proteção mesmo operando com os dois filtros ligados simultaneamente. Esta condição vem forçando a operação simultânea dos filtros, em desacordo com o projeto, trazendo dificuldades para a realização de manutenções preventivas.

A ANEEL, através da resolução nº 739 de dezembro de 2003, autorizou a empresa FURNAS a implantar reforços nas instalações de transmissão de energia elétrica na SE Ibiúna. Foram instalados mais dois filtros de 3ª e 5ª ordem harmônicas de 59Mvar cada, denominados ZRI e ZRJ, para eliminar as dificuldades operativas discutidas.

A campanha de medição de harmônicas [4,7] teve o objetivo de determinar as causas da elevação dos valores de corrente harmônicas drenadas pelos filtros de 3ª e 5ª da subestação de 345kV Ibiúna.

Os resultados obtidos através das medições realizadas nas subestações estudadas, bem como a descrição dos procedimentos utilizados na campanha de medição, são descritos no item a seguir.

2.2 – RESULTADOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

A região analisada na campanha de medição de harmônicas no sistema de transmissão em torno da SE Ibiúna, na região metropolitana de São Paulo, para avaliação das sobrecargas harmônicas nos Filtros de 3ª e 5ª ordem harmônicas compreende um sistema composto pelas subestações descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Subestações Participantes da Pesquisa

Nível de Tensão	Subestação
500kV	SE Campinas
	SE Bateias
	SE Ibiuna
440kV	SE Cabreúva
	SE Oeste
345kV	SE Ibiuna
	SE Guarulhos
	SE Interlagos
	SE Tijuco Preto
	SE Xavantes
	SE Bandeirante
	SE Embuguaçu
	SE Norte
	SE Miguel Reale
	SE Milton Fornasaro
	SE Baixada Santista
230kV	SE Carbocloro
	SE Nova Piratininga
	SE Anhanguera
	SE Henry Borden

O trabalho realizado ocorreu em duas fases, cada um com algumas etapas de medição, uma vez que apenas 11 medidores de tensão e corrente harmônicas estavam disponíveis para o trabalho. A primeira fase de medições ocorreu de 12/03/2007 até 04/09/2007, verificando tensões e correntes harmônicas nas linhas de transmissão que interconectam as subestações estudadas e nos filtros de 3ª e 5ª ordens harmônicas na SE Ibiúna, como pode ser verificado na Figura 2.1, retirada de [4].

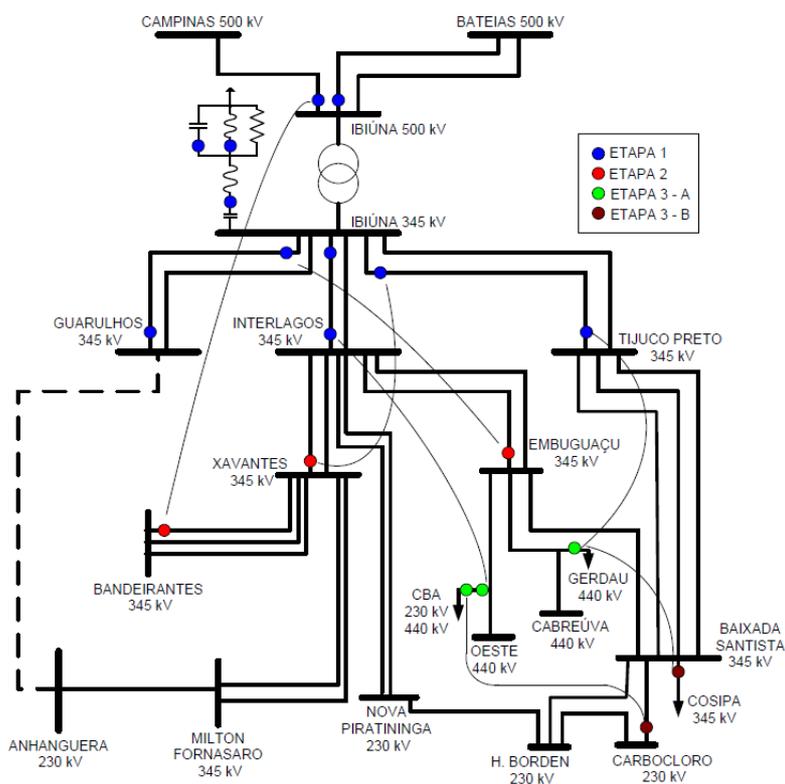


Figura 2.1 Medição Harmônica – 1ª Fase

Os resultados obtidos através dessas medições, como pode ser visto em [4], indicaram que a sobrecarga causada pelo harmônico de 5ª ordem é bem superior ao de terceira ordem. A principal constatação foi que as cargas industriais (GERDAU, CBA e COSIPA entre outros) não são os responsáveis pela sobrecarga harmônica observada nos filtros de 3ª e 5ª ordem na SE Ibiúna.

Com base nos resultados obtidos, houve um forte indício de que a maior parte da corrente harmônica de 5ª ordem drenada pelos filtros de Ibiúna trafega a partir dos corredores Ibiúna-Interlagos-Milton Fornasaro-Anhanguera e Ibiúna-Guarulhos-Anhanguera. Em função disso foi sugerido nos resultados desta campanha que se realizasse uma nova etapa de medição, focando os medidores nessas linhas de transmissão em que se verificou o maior indício de sobrecarga. Essa etapa de medição ocorreu de 06/01/2008 a 12/04/2008 e os medidores harmônicos de 3ª e 5ª ordem foram dispostos conforme Figura 2.2, retirada de [7].

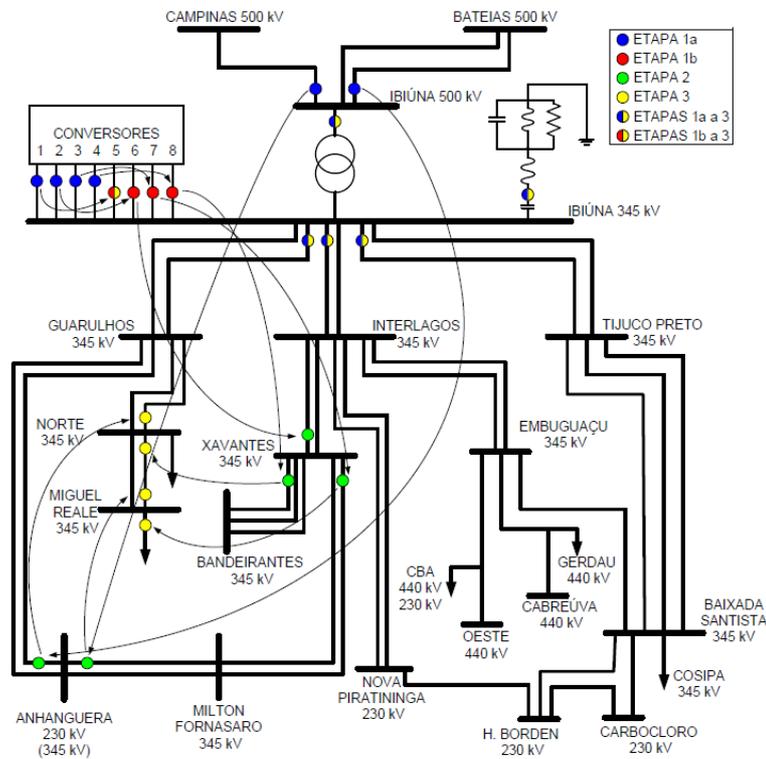


Figura 2.2 Medição Harmônica – 2ª Fase

Como já havia sido verificado na primeira fase de medição que a corrente harmônica de 3ª ordem era substancialmente menor que a de 5ª ordem, a segunda fase de medição considerou no trabalho apenas a corrente harmônica de 5ª ordem.

Os resultados foram obtidos com base em gráficos de correlação de carregamento da corrente harmônica de 5ª ordem nas linhas de transmissão que formam os corredores identificados como críticos em [4].

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Xavantes-Interlagos e Ibiúna-Interlagos.

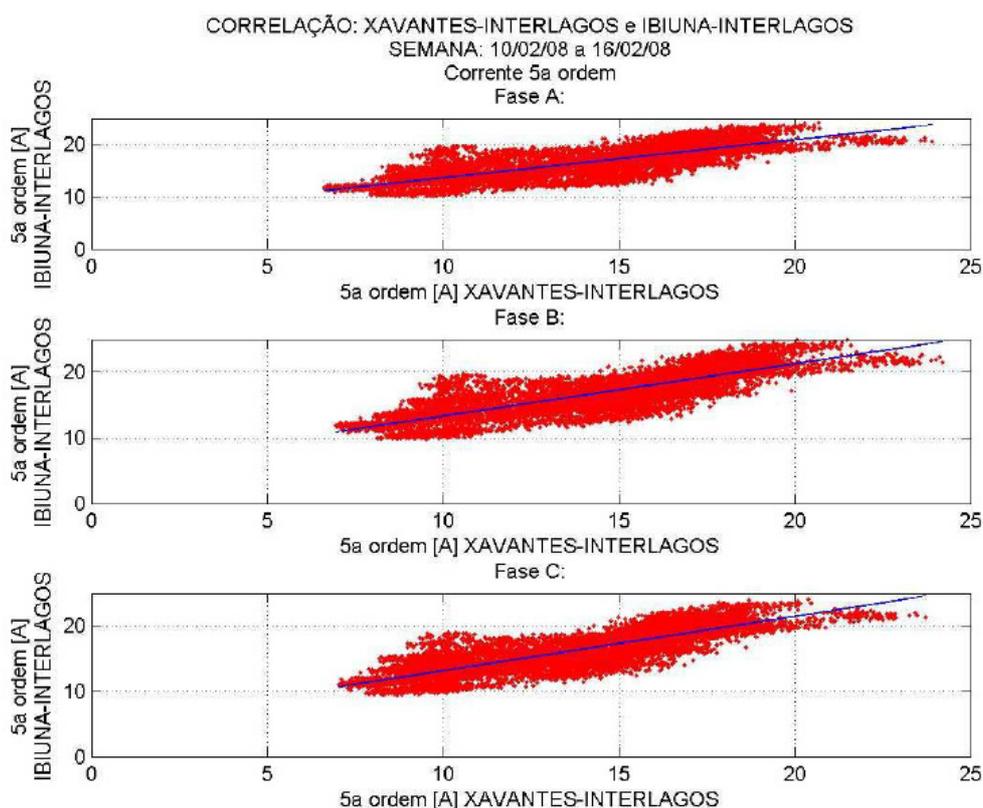


Figura 2.3 Correlação entre Xavantes-Interlagos e Ibiúna-Interlagos

Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação da corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 82%, entre os corredores de Xavantes-Interlagos e Ibiúna-Interlagos. Isso indica que a fonte de corrente harmônica de 5ª ordem, possivelmente responsável pela sobrecarga nos filtros de Ibiúna, utiliza esses corredores como caminho elétrico. Os resultados podem ser melhor observados na Tabela 2.1, retirada de [7].

Tabela 2.1 Correlação entre Xavantes-Interlagos e Ibiúna-Interlagos

XAVANTES-INTERLAGOS e IBIUNA-INTERLAGOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5ª harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
0,80261	0,72836	0,83552	0,79838	0,83636	0,83172

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Xavantes-Bandeirantes e Xavantes-Interlagos.

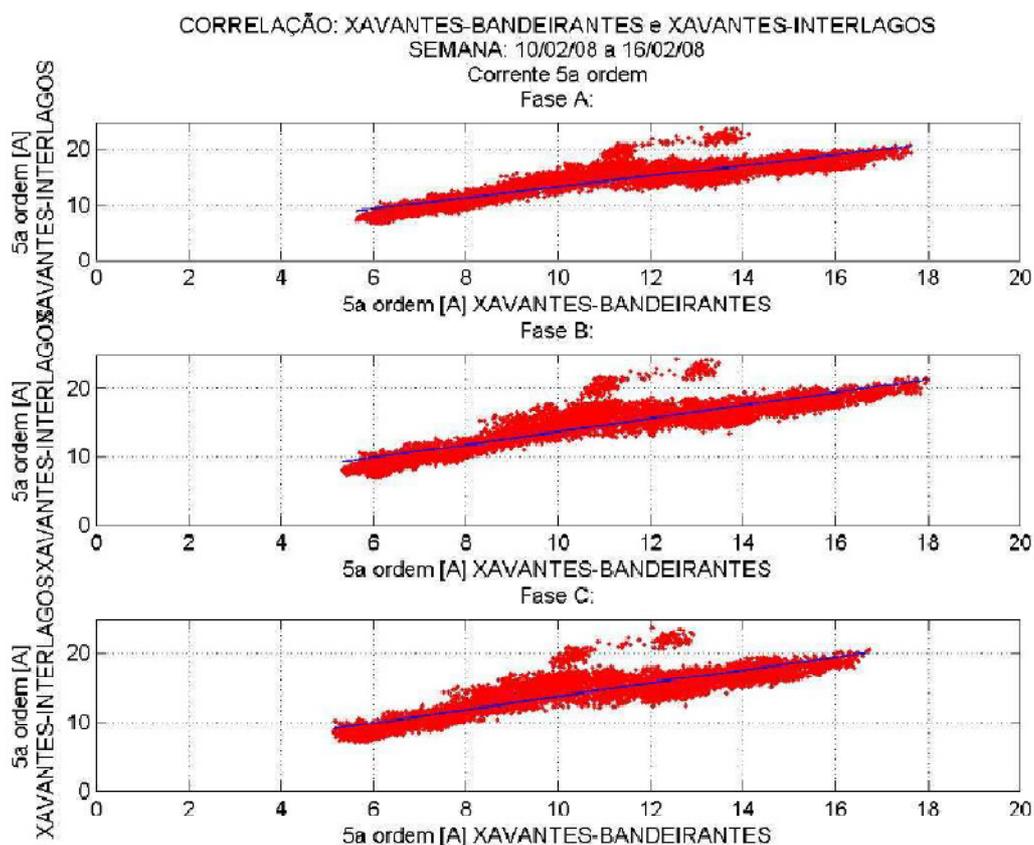


Figura 2.4 Correlação entre Xavantes-Bandeirantes e Xavantes-Interlagos

Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação da corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 89%, entre os corredores de Xavantes-Bandeirantes e Xavantes-Interlagos. Isso indica que a fonte de corrente harmônica de 5ª

ordem, possivelmente responsável pela sobrecarga nos filtros de Ibiúna, utiliza esses corredores como caminho elétrico. Os resultados obtidos podem ser melhor observados na Tabela 2.2, retirada de [7].

Tabela 2.2 Correlação entre Xavantes-Bandeirantes e Xavantes-Interlagos

XAVANTES-BANDEIRANTES e XAVANTES-INTERLAGOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5a harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
0,89103	0,96758	0,89493	0,95838	0,87987	0,94719

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Xavantes-Milton Fornasaro e Xavantes-Interlagos.

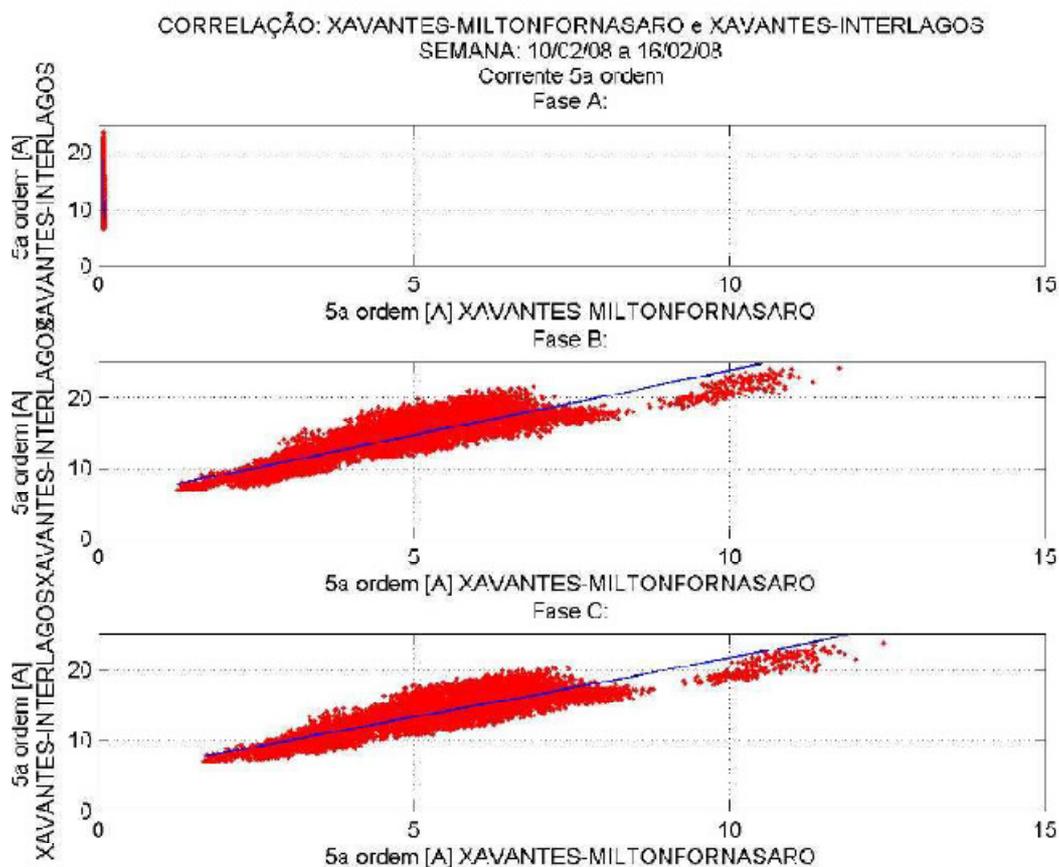


Figura 2.5 Correlação entre Xavantes-Milton Fornasaro e Xavantes-Interlagos

Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação da corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 89%, entre os corredores de Xavantes-Milton Fornasaro e Xavantes-Interlagos. Isso indica que a fonte de corrente harmônica de 5ª ordem, possivelmente responsável pela sobrecarga nos filtros de Ibiúna, utiliza esses corredores como caminho elétrico. Os resultados obtidos podem ser melhor observados na Tabela 2.3, retirada de [7].

Tabela 2.3 Correlação entre Xavantes-Milton Fornasaro e Xavantes-Interlagos

XAVANTES-MILTONFORNASARO e XAVANTES-INTERLAGOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5ª harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
-	-	0,89486	1,8387	0,89667	1,6733

A partir das medições realizadas foi montada a Tabela 2.4, retirada de [7], com os fasores de corrente de 5ª ordem harmônica nas linhas de transmissão que se conectam a SE Xavantes.

Tabela 2.4 Fasores da corrente de 5ª ordem harmônica da fase B medidas na SE Xavantes

GPS Local Time	2x (Xavantes-Interlagos)		2x (Xavantes-Milton Fornasaro)		3x (Xavantes-Bandeirantes)		SOMA TOTAL	
	B 1 5 mag	B 1 5 ph	B 1 5 mag	B 1 5 ph	B 1 5 mag	B 1 5 ph	B 1 5 mag	B 1 5 ph
02-15-08 12:45:00	36,18	-30,55	11,08	-157,66	45,39	131,35	14,63	128,37
02-15-08 13:00:00	27,33	-33,45	8,28	-155,56	44,87	127,62	20,93	125,45
02-15-08 13:15:00	38,68	-27,12	13,36	-149,34	44,41	131,59	10,95	126,72
02-15-08 13:30:00	32,15	-29,62	9,82	-153,93	46,14	130,46	18,41	125,97
02-15-08 13:45:00	41,62	-20,39	0,59	-150,02	45,47	131,10	10,27	94,62
02-15-08 14:00:00	43,43	147,61	10,18	22,78	47,76	-48,57	9,62	-63,41
02-15-08 14:15:00	37,90	-30,64	10,05	-152,64	47,11	131,13	13,67	122,32
	Mag	Fase	Mag	Fase	Mag	Fase	Mag	Fase
Média Total	27,70	7,57	9,18	-32,87	31,20	6,21	11,12	4,32
Média Leve	21,64	-34,16	6,71	-28,52	23,25	-23,75	8,34	-18,59
Média Média	31,30	27,10	10,98	-32,83	36,98	20,51	13,58	14,93
Média Pesada	29,13	47,41	10,41	-22,07	31,52	29,13	10,74	19,57
Mínimo	8,20	-179,93	0,61	-179,85	11,06	-179,29	0,27	-179,40
Máximo	50,91	179,93	23,59	179,99	53,62	179,92	62,06	179,89

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Norte-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos.

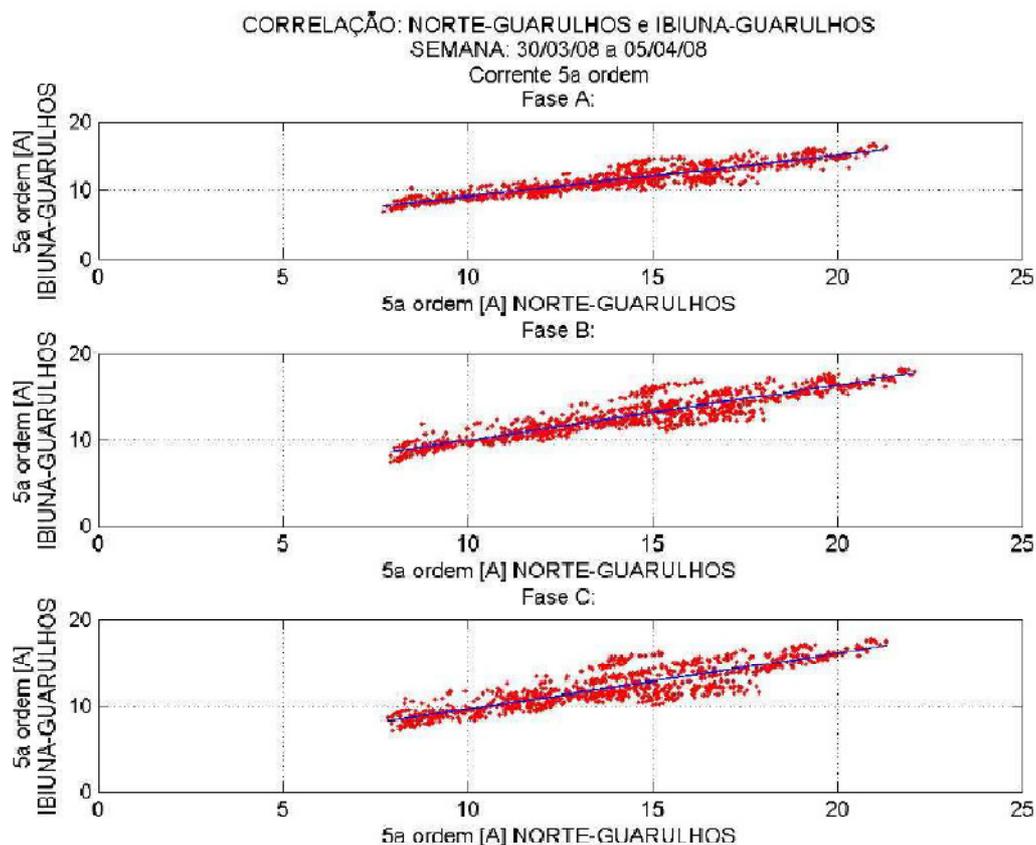


Figura 2.6 Correlação entre Norte-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos

Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação da corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 89%, entre os corredores de Norte-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos. Isso indica que a fonte de corrente harmônica de 5ª ordem, possivelmente responsável pela sobrecarga nos filtros de Ibiúna, utiliza esses corredores como caminho elétrico. Os resultados obtidos podem ser melhor observados na Tabela 2.5, retirada de [7].

Tabela 2.5 Correlação entre Norte-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos

NORTE-GUARULHOS e IBIUNA-GUARULHOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5a harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
0,91475	0,59968	0,91116	0,64281	0,86759	0,64925

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Norte-Miguel Reale e Norte-Guarulhos.

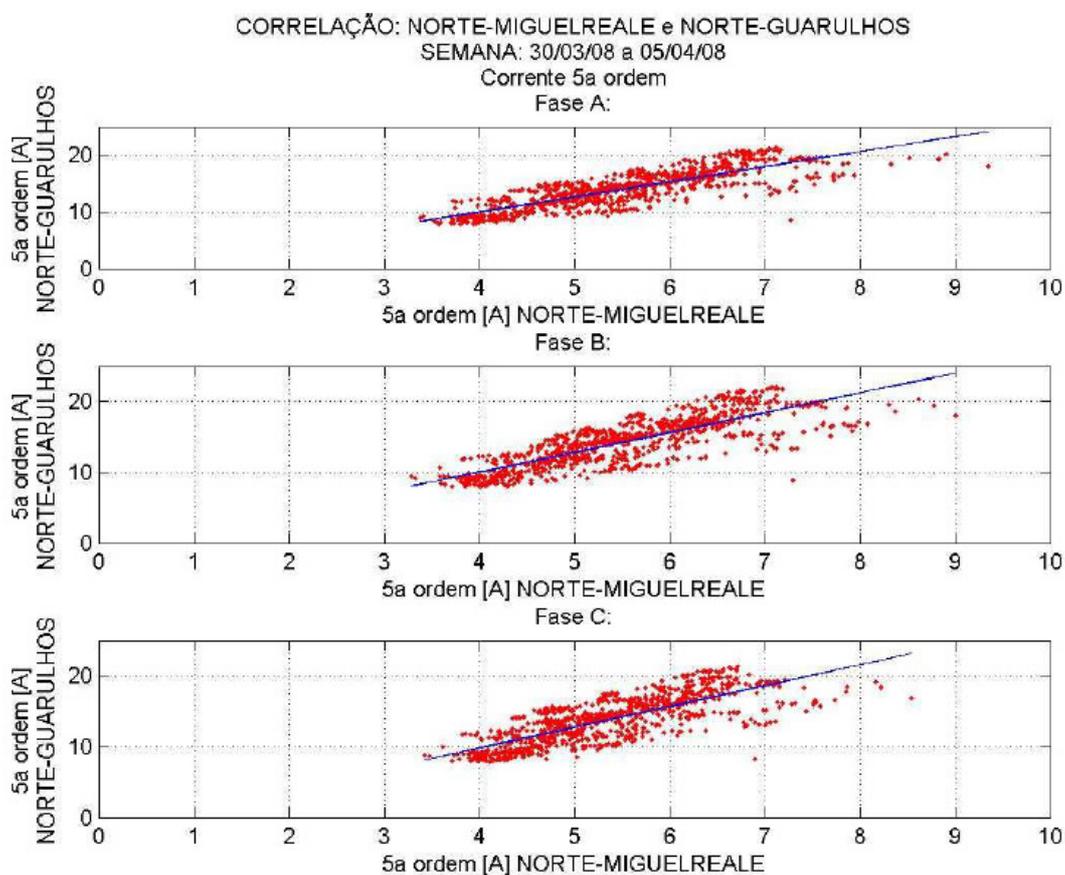


Figura 2.7 Correlação entre Norte-Miguel Reale e Norte-Guarulhos

Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação da corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 81%, entre os corredores de Norte-Miguel Reale e Norte-Guarulhos. Isso indica que a fonte de corrente harmônica de 5ª ordem,

possivelmente responsável pela sobrecarga nos filtros de Ibiúna, utiliza esses corredores como caminho elétrico. Os resultados obtidos podem ser melhor observados na Tabela 2.6, retirada de [7].

Tabela 2.6 Correlação entre Norte-Miguel Reale e Norte-Guarulhos

NORTE-MIGUELREALE e NORTE-GUARULHOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5ª harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
0,8351	2,6648	0,82453	2,7984	0,78898	2,9305

O gráfico a seguir retirado de [7] relaciona o fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem em cada fase das linhas de transmissão Anhanguera-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos.

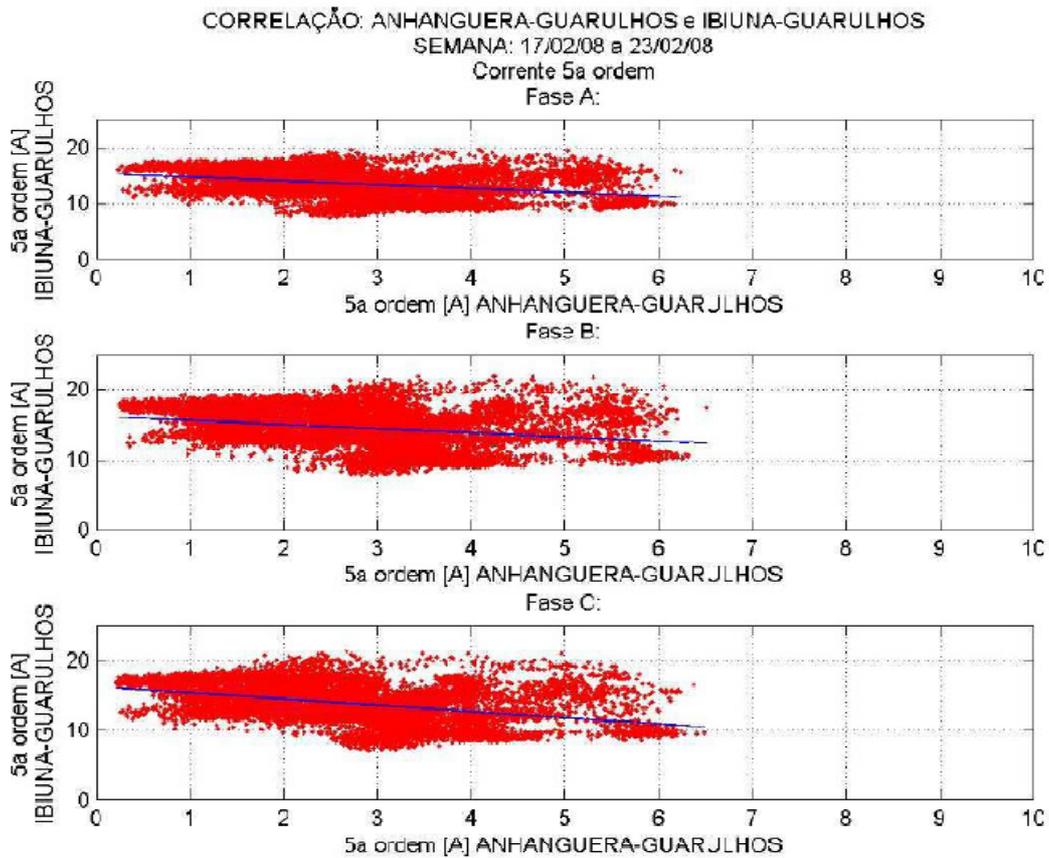


Figura 2.8 Correlação entre Anhanguera-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos

Os resultados obtidos indicam que existe uma correlação inversa de corrente harmônica de 5ª ordem, da ordem de 32%, entre os corredores de Anhanguera-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos. Isso indica que uma fonte de corrente harmônica de 5ª ordem pode estar conectada a SE Guarulhos. Os resultados obtidos podem ser melhor observados na Tabela 2.7, retirada de [7].

Tabela 2.7 Correlação entre Anhanguera-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos

ANHANGUERA-GUARULHOS e IBIUNA-GUARULHOS					
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5a harmônica					
Fase A		Fase B		Fase C	
Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular	Correlação	Coef Angular
-0,31837	-0,67172	-0,26226	-0,5865	-0,39225	-0,88967

A partir das medições realizadas foi montada a Tabela 2.8, retirada de [7], com os fasores de corrente de 5ª ordem harmônica nas linhas de transmissão que se conectam a SE Xavantes.

Tabela 2.8 Fasores da corrente de 5ª ordem harmônica da fase B medidas na SE Norte e na SE Miguel Reale

GPS Local Time	Norte- Guarulhos		Miguel Reale- Norte		Norte-Miguel Reale		Norte-cargas		SOMA TOTAL DAS CORRENTES DA SE NORTE	
	B 5 mag	B 5 ph	B 5 mag	B 5 ph	B 5 mag	B 5 ph	B 5 mag	B 5 ph	B 5 mag	B 5 ph
05-13-08 11:45:00	21,25	-94,69	5,88	61,10	10,55	73,22	8,79	96,91	2,37	-83,95
05-13-08 12:00:00	19,73	-91,67	5,73	63,80	10,12	76,06	7,94	104,07	2,20	-91,69
05-13-08 12:15:00	21,40	-92,18	5,69	62,73	13,19	73,44	9,08	100,58	1,30	8,55
05-13-08 12:30:00	22,68	-91,62	6,13	64,92	13,14	75,50	8,77	99,80	1,74	-48,37
05-13-08 12:45:00	19,61	-92,32	6,05	68,76	14,04	73,63	8,46	100,35	2,74	53,17
05-13-08 13:00:00	25,10	-94,26	5,97	67,14	15,15	71,51	9,40	97,34	2,19	-37,55
05-13-08 13:15:00	19,98	-92,51	5,84	66,06	13,29	73,65	8,71	99,87	1,94	45,04
05-13-08 13:30:00	24,72	-93,15	6,14	65,53	11,25	71,95	10,62	100,48	3,56	-86,80
MÉDIA:	Mag	Fase	Mag	Fase	Mag	Fase	Mag	Fase	Mag	Fase
	21,81	-92,80	5,93	65,00	12,59	73,62	8,97	99,92	2,26	-30,20

A partir da análise dos resultados mostrados e da análise fasorial das medições realizadas, descrita em [7], foi possível concluir que:

- Existe uma forte correlação entre a LT Xavantes-Bandeirantes, a LT Interlagos-Xavantes e a LT Ibiúna-Interlagos no que diz respeito ao fluxo de corrente harmônica de 5ª ordem.
- A maior contribuição de corrente harmônica de 5ª ordem que flui através da LT Ibiúna-Interlagos vem da SE Xavantes, através dos três cabos subterrâneos da LT Xavantes-Bandeirantes. Notadamente se observou uma amplificação de 3 a 4 vezes o valor da corrente harmônica de 5ª ordem que sai da SE Bandeirante e chega na SE Xavantes.
- Existe uma forte correlação entre as correntes harmônicas de 5ª ordem que fluem na LT Interlagos-Xavantes e na LT Ibiúna-Interlagos.
- Existe uma forte correlação entre as correntes harmônicas de 5ª ordem que fluem na LT Guarulhos-Norte e Norte-Miguel Reale para com a LT Ibiúna-Guarulhos.
- Existe uma contribuição significativa de corrente harmônica de 5ª ordem proveniente dos 2 cabos subterrâneos da LT Norte-Miguel Reale.

Os resultados obtidos através dessas medições indicaram, como pode ser visto em [7], que as maiores contribuições da sobrecarga nos filtros da SE Ibiúna vêm dos corredores Ibiúna / Interlagos / Xavantes / Bandeirantes e Ibiúna / Guarulhos / Norte / Miguel Reale. A principal contribuição para a sobrecarga harmônica referida foi verificada da LT 345 kV Ibiúna/ Interlagos, sendo que a principal responsável foi a SE Bandeirantes devido a um forte efeito de amplificação de corrente nos três cabos subterrâneos, com comprimento de 6 km, que interligam a SE Bandeirantes a SE Xavantes. Foram observados ainda efeitos muito significativos de ampliação de

correntes harmônicas nos cabos subterrâneos, com comprimento de 14 km, que interligam a SE Norte a SE Miguel Reale.

2.3 – CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir dos resultados observados nos estudos realizados em [7], é possível definir que a maior fonte de corrente harmônica de 5ª ordem está situada na SE Bandeirantes, sendo esta transmitida aos filtros da SE Ibiúna através do corredor Ibiúna/Interlagos/Xavantes/Bandeirante.

A partir da análise da topologia do sistema elétrico da região, o melhor ponto de conexão para aplicar o filtro proposto é no setor de 88kV da SE Bandeirantes. A decisão de conectar o filtro neste ponto foi baseada na proximidade da fonte de corrente harmônica a ser filtrada e no nível de tensão da subestação. A proximidade do filtro com a fonte diminui a impedância do caminho elétrico à ser percorrido pela corrente harmônica, facilitando seu escoamento, e evita que ocorram sobrecargas nas linhas de transmissão entre estes. O nível de tensão mais baixo diminui o custo filtro.

É possível também considerar que apenas a compensação da componente de 5ª ordem harmônica é necessária, uma vez que ela é bem superior à componente de 3ª ordem como indicado em [7].

3 – TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA PARA ALGORITMOS DE CONTROLE EM TEMPO REAL

Todo o embasamento matemático utilizado nos algoritmos de controle de filtros ativos utilizados neste trabalho está referenciado na teoria da potência instantânea, ou teoria p-q. Isso se deve a algumas facilidades técnicas na utilização desta em detrimento da teoria de potência convencional, principalmente quando se trata da capacidade de observar eventos transitórios na rede elétrica [8]. Algumas diferenças conceituais entre as duas teorias são discutidas neste capítulo.

A teoria de potência instantânea é baseada em um conjunto de potências instantâneas definidas no domínio do tempo. Isso permite sua utilização tanto em regime permanente como em transitórios. Conforme apresentado na literatura, com a utilização da teoria p-q é possível desenvolver algoritmos com grande eficiência e flexibilidade para controle de condicionadores de potência baseados em dispositivos eletrônicos [8]. Os conceitos matemáticos necessários à descrição da teoria p-q serão relacionados neste capítulo, abordando as vantagens de se utilizar esses conceitos em detrimento da teoria de potência convencional.

3.1 - TEORIA DE POTÊNCIA CONVENCIONAL

A teoria de potência convencional se baseia na análise de circuitos monofásicos e considera como sistema trifásico a simples soma de três circuitos monofásicos [9]. As descrições matemáticas abaixo permitirão entender os conceitos da teoria de potência convencional, permitindo assim um entendimento das diferenças entre esta e a teoria p-q.

Considerando um sistema monofásico simples, alimentado por fonte alternada, é possível descrever os conceitos a seguir.

$$v(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (3.2)$$

$$p(t) = v(t)i(t) = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) = VI \cos(\theta) - VI \cos(2\omega t - \theta) \quad (3.3)$$

Decompondo as componentes oscilantes de (3.3) e rearranjando os termos, é possível descrever $p(t)$ como:

$$p(t) = \underbrace{VI \cos \theta [1 - \cos(2\omega t)]}_1 - \underbrace{VI \sin \theta \sin(2\omega t)}_2 \quad (3.4)$$

O primeiro termo de $p(t)$ possui um componente médio, representado por $VI \cos \theta$, e uma componente oscilando com o dobro da frequência da rede elétrica, representado por $1 - \cos(2\omega t)$. Essa parte nunca fica negativa e descreve um fluxo de potência unidirecional, da fonte para a carga.

O segundo termo de $p(t)$ tem apenas uma componente oscilante, com valor de pico representado por $VI \sin \theta$, com o dobro da frequência do sistema, representado por $\sin(2\omega t)$. Esse termo tem valor médio zero.

Dessa forma é possível descrever a potência ativa e reativa como:

$$\text{Potência Ativa} = VI \cos \theta \quad (3.5)$$

$$\text{Potência Reativa} = VI \sin \theta \quad (3.6)$$

A potência instantânea do sistema pode ser então descrita como:

$$p(t) = P[1 - \cos(2\omega t)] - Q \sin(2\omega t) \quad (3.7)$$

Onde:

$v(t)$ – Tensão em função do tempo em volts (V)

$i(t)$ – Corrente em função do tempo em ampère (A)

$p(t)$ – Potência total em função do tempo (VA)

ω – Velocidade angular (rad/s)

P – Potência ativa (W)

Q – Potência reativa (var)

A seguir foi descrita a forma como a teoria de potência convencional considera essas relações de potência ativa e reativa levando em consideração um

sistema trifásico. Como exemplo foi considerado somente a componente de seqüência positiva. Os resultados obtidos levam em consideração apenas este caso particular.

Considerando o sistema trifásico como a soma de três sistemas monofásicos, é possível descrever as tensões e correntes da seguinte forma:

$$\begin{cases} v_a(t) = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \theta_{V_+}) \\ v_b(t) = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \theta_{V_+} - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \theta_{V_+} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} i_a(t) = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_{I_+}) \\ i_b(t) = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_{I_+} - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_{I_+} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.9)$$

(os termos V_+ , I_+ , θ_{V_+} e θ_{I_+} são usados para designar os componentes de seqüência positiva)

Sendo assim, a potência trifásica pode ser descrita:

$$p_{3\phi} = p_a + p_b + p_c = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} p_{3\phi} = V_+ I_+ [& \cos(\theta_{V_+} - \theta_{I_+}) - \cos(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+}) + \\ & \cos(\theta_{V_+} - \theta_{I_+}) - \cos\left(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+} + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & \cos(\theta_{V_+} - \theta_{I_+}) - \cos\left(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+} - \frac{2\pi}{3}\right)] \end{aligned} \quad (3.11)$$

E como:

$$\begin{aligned} & \cos(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+}) + \cos\left(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+} + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & \cos\left(2\omega t + \theta_{V_+} + \theta_{I_+} - \frac{2\pi}{3}\right) = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Temos que:

$$p_{3\phi} = 3V_+ I_+ \cos(\theta_{V_+} - \theta_{I_+}) = 3P \quad (3.13)$$

Pode-se verificar que os termos variantes no tempo se anularam, ou seja, as partes oscilantes se anularam. Com isso a potência reativa calculada através da teoria de potência convencional, para este caso particular, foi nula.

A potência reativa trifásica é definida na teoria de potência convencional como:

$$Q_{3\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{ab}i_c + v_{bc}i_a + v_{ca}i_b) = 3V_+I_+ \sin(\theta_{V_+} - \theta_{I_+}) = 3Q \quad (3.14)$$

Em um sistema trifásico desequilibrado a quatro fios existiriam componentes de seqüência zero e componentes oscilantes que não seriam identificados por esta teoria, como descrito em [9].

O sistema elétrico foco deste trabalho é o de alta tensão, ou seja, funciona a três fios. Dessa forma ele não possui componente de seqüência zero.

É importante observar que, conforme apresentado em [8], a teoria da potência convencional também prevê circuitos trifásicos desequilibrados, porém essa teoria não considera a propagação do desequilíbrio de uma fase para as outras. Desta forma é possível afirmar que sua aplicação para desenvolvimento de estratégias de controle para condicionadores de potência trifásicos é limitada.

3.2 - BASES DA TEORIA P-Q

Na teoria da potência instantânea, ou teoria p-q, as tensões e correntes utilizadas nos cálculos não são referenciadas aos eixos das fases, como na forma convencional. Sua referência é modificada através da transformação dos eixos a, b e c em α , β e 0. Essa transformação também é conhecida como transformada de Clarke [8].

Para efeito de demonstração da teoria, será desconsiderado o eixo 0 da transformada de Clarke, ou seja, será considerado um sistema a três fios, como pode ser verificado na Figura 3.1.

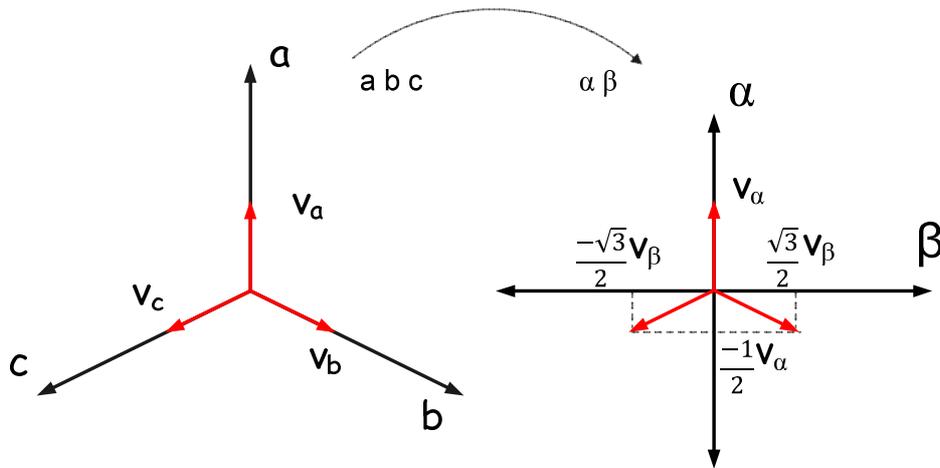


Figura 3.1 Transformada de Clarke

Utilizando a transformada de Clarke é possível descrever as tensões e correntes em termos de α e β , sendo possível assim calcular a potência ativa e reativa nesses termos, como será descrito a seguir.

As tensões em α e β são definidas a partir da relação:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

E, analogamente:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Define-se, então, potência trifásica em termos de α e β como:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (3.17)$$

A partir da equação (3.17) e ainda considerando um sistema sem componente de seqüência zero, os vetores instantâneos das tensões e correntes trifásicas podem ser descritos como:

$$e = (v_\alpha + jv_\beta) \quad (3.18)$$

$$i = (i_\alpha - ji_\beta) \quad (3.19)$$

Conseqüentemente, a potência complexa instantânea é definida como o produto do vetor tensão pelo conjugado do vetor corrente:

$$s_{3\phi} = (v_\alpha + jv_\beta) (i_\alpha - ji_\beta) \quad (3.20)$$

$$s_{3\phi} = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (3.21)$$

Desta forma, potência real e imaginária trifásica em termos de α e β são definidos por:

$$p = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) = \textit{Potência Real} \quad (3.22)$$

$$q = (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) = \textit{Potência Imaginária} \quad (3.23)$$

Ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Foram definidas em (3.22) e (3.23) as potências real e imaginária a partir das equações de tensão e corrente instantâneas (3.18) e (3.19). As equações, portanto, podem ser aplicadas a estudos de regime normal ou transitórios.

A análise de eventos transitórios em sistemas trifásicos deve, necessariamente, considerar os efeitos observados em cada fase como uma soma de fatores provenientes da própria fase observada e das outras duas fases, uma vez que apesar da potência ativa de um sistema estar fluindo da fonte para a carga, a potência

reativa está circulando constantemente entre as fases sem contribuir de forma alguma à energia transferida da fonte à carga [8].

É importante ressaltar que esses termos de potência real (p) e potência imaginária (q) podem ainda ser desmembrados em termos de potências oscilantes e potências médias, como descrito em (3.25) e (3.26).

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.25)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.26)$$

A partir do desenvolvimento da matriz (3.24) é possível obter:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Expandindo-se a matriz:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Definindo-se assim cada componente como:

Corrente ativa instantânea no eixo α :

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (3.29)$$

Corrente reativa instantânea no eixo α :

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (3.30)$$

Corrente ativa instantânea no eixo β :

$$i_{\beta p} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (3.31)$$

Corrente reativa instantânea no eixo β :

$$i_{\beta q} = \frac{-v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (3.32)$$

As potências instantâneas nas coordenadas α e β são definidas então como p_{α} e p_{β} , respectivamente, e calculadas a partir das tensões e correntes instantâneas nos eixos α e β , como descrito a seguir:

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha} \\ p_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} i_{\alpha} \\ v_{\beta} i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} i_{\alpha p} \\ v_{\beta} i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\alpha} i_{\alpha q} \\ v_{\beta} i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Note que, em um sistema trifásico a três fios, a potência ativa instantânea trifásica em termos de componentes de Clarke em (3.17) é igual à potência real instantânea definida em (3.24). À partir de (3.33) e (3.24), a potência real pode ser definida como a soma de p_{α} e p_{β} . Reescrevendo a equação (3.33) é possível obter:

$$\begin{aligned} p &= v_{\alpha} i_{\alpha p} + v_{\beta} i_{\beta p} + v_{\alpha} i_{\alpha q} + v_{\beta} i_{\beta q} \\ &= \frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p + \frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p + \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q + \frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \end{aligned} \quad (3.34)$$

Na equação acima existem dois pontos importantes, o primeiro é que a potência real instantânea p é dada apenas por:

$$v_{\alpha} i_{\alpha p} + v_{\beta} i_{\beta p} = p_{\alpha p} + p_{\beta p} = p \quad (3.35)$$

O segundo é que a relação a seguir existe para os termos dependentes de q :

$$v_{\alpha}i_{\alpha q} + v_{\beta}i_{\beta q} = p_{\alpha q} + p_{\beta q} = 0 \quad (3.36)$$

É possível, então, separar as potências nos seguintes tipos:

Potência ativa instantânea no eixo α :

$$p_{\alpha p} = v_{\alpha}i_{\alpha p} = \frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (3.37)$$

Potência reativa instantânea no eixo α :

$$p_{\alpha q} = v_{\alpha}i_{\alpha q} = \frac{v_{\alpha}v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (3.38)$$

Potência ativa instantânea no eixo β :

$$p_{\beta p} = v_{\beta}i_{\beta p} = \frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (3.39)$$

Potência reativa instantânea no eixo β :

$$p_{\beta q} = v_{\beta}i_{\beta q} = \frac{-v_{\alpha}v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (3.40)$$

Como pode ser observado a partir de (3.38) e (3.39), a soma de $p_{\alpha q}$ e $p_{\beta q}$ é sempre igual a zero. Portanto eles não contribuem para a potência instantânea nem para a potência média transferida da fonte para a carga em um circuito trifásico.

Em função também da soma de $p_{\alpha q}$ e $p_{\beta q}$ ser sempre igual a zero, sua compensação não necessita de nenhum sistema de armazenamento.

Se as variáveis α e β da equação (3.24) forem substituídas por seus equivalentes nos eixos abc utilizando as equações (3.15) e (3.16) é possível descrever:

$$\begin{aligned}
 q &= v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{ab}i_c + v_{bc}i_a + v_{ca}i_b)
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

A potência q definida em (3.41) é chamada de potência instantânea imaginária. A potência instantânea imaginária, como descrito em [8], é o quantitativo da magnitude das potências $p_{\alpha q}$ e $p_{\beta q}$.

A potência imaginária é proporcional à quantidade de energia que está fluindo entre as fases do sistema. Ela não contribui para a energia transferida da fonte para a carga em nenhum momento.

3.3 – CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir da equação (3.35) é possível afirmar que a potência ativa trifásica instantânea é dada pela soma das potências ativas do eixo α e do eixo β . É possível afirmar também que a soma das componentes reativas é sempre zero, isso prova que a potência reativa não contribui para a energia transferida à carga em um sistema trifásico.

Como as componentes reativas se anulam, conclui-se que a compensação de energia reativa em um sistema trifásico não necessita de elementos armazenadores de energia, é necessário apenas um método para transferir essa energia entre as fases.

Seguindo esse preceito, uma alternativa à inserção de elementos armazenadores de energia (capacitores e indutores) para compensação de energia reativa em um sistema de potência trifásico é a transferência controlada dessa energia entre as fases, e conseqüente anulação, através de um filtro ativo.

4 - FILTROS DE POTÊNCIA CONECTADOS EM PARALELO NO SISTEMA ELÉTRICO

4.1 – INTRODUÇÃO

Os harmônicos são gerados a partir de inúmeras fontes como máquinas rotativas, corrente de magnetização de transformadores, conversores de potência estáticos, fornos a arco, controladores de tensão, conversores de frequência, entre outros [10].

Uma questão relevante no que diz respeito à compensação harmônica em sistemas de potência é a flutuabilidade da magnitude de corrente harmônica a ser compensada, em função de variações da carga determinadas por aspectos sociais e ambientais (período do dia, temperatura ambiente, estação do ano, entre outros), bem como a variação dos parâmetros do sistema que se deseja filtrar (tensão, impedância característica entre outros). Dessa dificuldade verificou-se a necessidade de criação de um filtro que pudesse se adaptar às variações sistêmicas, levando em conta a viabilidade financeira e praticidade do projeto.

Este capítulo tem o objetivo de descrever os principais tipos de filtros para atenuação de corrente harmônica em sistemas de potência, detalhando as topologias mais utilizadas, os pontos positivos, negativos e suas aplicações.

4.2 - FILTROS PASSIVOS

Filtros de corrente harmônica são denominados passivos quando não possuem nenhum controle direto sobre a corrente que está sendo drenada. Eles são constituídos, basicamente, por componentes resistivos, capacitivos e indutivos.

Os filtros passivos são amplamente utilizados em sistemas de potência por serem muito efetivos na redução de um componente harmônico específico (quinto, sétimo harmônico) [11]. Eles apresentam, porém, muitas desvantagens como perda de sintonia, alta sensibilidade dos componentes L - C, risco de operação em sobrecarga,

uma vez que a corrente harmônica pode exceder o que foi previsto no dimensionamento do filtro, além de serem muito grandes e pesados [12].

A função do filtro passivo é prover um caminho de baixa impedância para frequências harmônicas específicas, resultando assim na absorção de corrente harmônica. Ele também possui a capacidade de corrigir parcial ou totalmente o fator de potência de cargas indutivas, através da injeção de corrente capacitiva na frequência fundamental. Essa possibilidade traz uma vantagem na aplicação desse tipo de filtro em muitos casos, mas não em todos os casos [1].

Outra consideração importante é o fato do filtro passivo não ser seletivo quanto aos harmônicos que ele compensa. Como ele se torna uma baixa impedância para uma corrente harmônica específica, o filtro pode acabar drenando corrente harmônica de outras fontes vizinhas, sobrecarregando o filtro e reduzindo sua vida útil, podendo ainda resultar em danos parciais ou danificar permanentemente o filtro.

Os filtros passivos são, portanto, elementos utilizados para solucionar problemas harmônicos específicos e pontuais, sendo necessário um estudo do sistema em torno do ponto de conexão desse tipo de filtro.

4.2.1 – ALGUMAS TOPOLOGIAS PARA FILTROS PASSIVOS

Os filtros passivos conectados em paralelo no sistema elétrico são basicamente variações do agrupamento de elementos capacitivos, indutivos e resistivos. Existem basicamente dois tipos de filtros passivos para aplicação em sistemas de potência, o filtro sintonizado e o filtro passa alta [1].

O filtro do tipo sintonizado é configurado de forma a ser uma baixa impedância para uma frequência ou um grupo de frequências. Ele é composto apenas por um circuito RLC em série, no caso de sintonização em apenas uma frequência, ou adiciona-se a esse circuito série um circuito RLC em paralelo para poder sintonizá-lo em duas frequências, conforme mostrado na Figura 4.1.

O filtro passivo sintonizado simples, ou em apenas uma frequência, além da filtragem harmônica tem a vantagem de poder compensar totalmente o fator de potência

do sistema ao qual ele está conectado, através da injeção de corrente fundamental, e como ponto negativo ele pode causar problemas de ressonância.

O filtro passivo duplamente sintonizado além de ser uma baixa impedância em duas frequências definidas, drenando assim corrente harmônica nestas duas frequências, tem a vantagem de ter perdas pequenas na frequência fundamental. O ponto negativo deste efeito é que sua capacidade de compensação do fator de potência fica prejudicada [10].

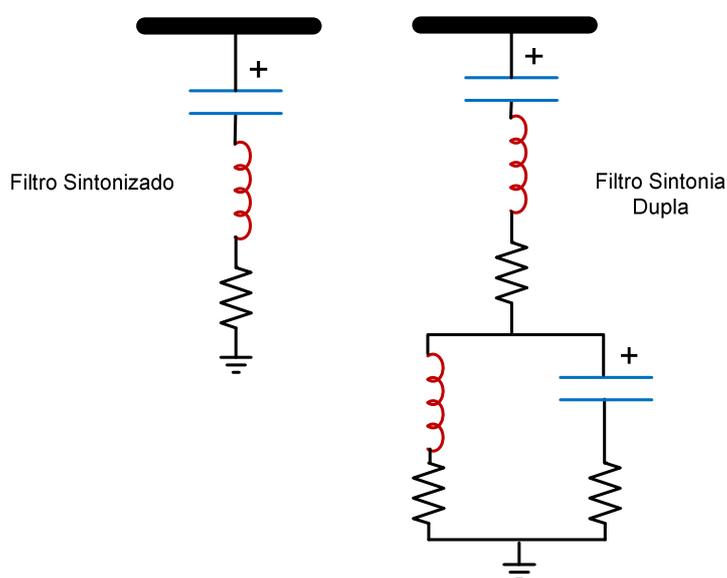


Figura 4.1 Filtros Passivos Sintonizados

O filtro do tipo passa alta é configurado de forma a ser uma baixa impedância para todas as faixas de frequências situadas acima da frequência de corte estabelecida. Ele é composto, no modelo mais simples ou de 1ª ordem, por um capacitor em série com um resistor. Dependendo da necessidade de qualidade de filtragem, é possível configurar o filtro passa alta para trabalhar em ordens maiores, pois quanto maior a ordem do filtro mais perto do filtro ideal fica o seu comportamento. Para isso é necessário configurar um circuito RL ou RCL em série com o capacitor, como mostrado na Figura 4.2.

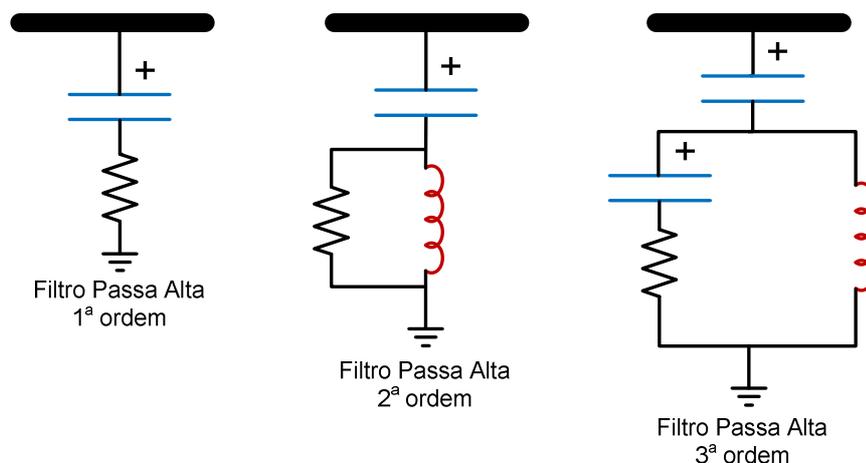


Figura 4.2 Filtros Passivos Passa Alta

O filtro passa alta de 1ª ordem possui elevadas perdas na frequência fundamental. Essa perda diminui proporcionalmente com o aumento da ordem desse tipo de filtro, porém o filtro de 3ª ordem é menos efetivo que o filtro de 2ª ordem [10].

Exemplos das curvas características destes dois tipos de filtro, filtro sintonizado e filtro passa alta, são mostrados no próximo item.

4.2.2 – METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DO FILTRO PASSIVO

O cálculo do filtro passivo se baseia em parâmetros impostos pela rede elétrica em que se pretende inserir o filtro, como tensão da barra conectada e potência a ser absorvida, e nas características de correção desejadas, como frequência do harmônico a ser absorvido e nível de correção do fator de potência desejado [13].

Conforme mostrado na Figura 4.1, o filtro passivo sintonizado pode ser composto por um circuito RLC em série, no caso do sintonizado simples, ou um circuito RLC associado em série com um circuito RLC paralelo, no caso de sintonia dupla. A partir da impedância característica do filtro é possível definir os valores da indutância, capacitância e reatância do filtro em função tanto da frequência de ressonância quanto do fator de qualidade desejado. Como exemplo, é descrito o processo de cálculo do filtro passivo sintonizado simples.

A impedância característica do filtro passivo sintonizado simples pode ser descrita da forma:

$$Z(\omega) = \left(\frac{1}{j\omega C} + j\omega L + R \right) \quad (4.1)$$

Onde:

$Z(\omega)$ - Impedância do filtro em função da frequência

C - Valor da Capacitância do filtro em Faraday (F)

L - Valor da Indutância do filtro em Henry (H)

R - Valor da Resistência do filtro em Ohms (Ω)

ω - Frequência em Hertz (Hz)

j - Número Imaginário ($\sqrt{-1}$)

Considerando o valor da resistência nulo ($R = 0$) e para que o filtro passivo tenha impedância zero na frequência de ressonância, as seguintes relações podem ser estabelecidas:

$$Z(\omega) = \left(-\frac{j}{\omega C} + j\omega L + 0 \right) = 0 \quad (4.2)$$

Ou seja:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (4.3)$$

A partir disso é Possível obter:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{e como} \quad \omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

É possível definir a frequência de ressonância do Filtro Passivo como:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

O fator de qualidade de um filtro é a razão entre a energia armazenada e a energia perdida em um ciclo de sua frequência ressonante. O fator de qualidade para filtros sintonizados varia entre 20 e 100 [1] e pode ser expresso da forma [13]:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.6)$$

A partir das equações (4.5) e (4.6) é possível definir os valores de L, R e C para um filtro passivo sintonizado.

Como exemplo, um filtro passivo sintonizado simples com frequência de ressonância de 300Hz e fator de qualidade 100 pode ter os seguintes valores definidos através das equações (4.5) e (4.6) :

$$R = 0.0053\text{ohm}, \quad C = 1\text{mF} \quad e \quad L = 281.45\mu\text{H} \quad (4.7)$$

A partir da função de transferência do sistema, é possível verificar no diagrama de bode as características de resposta do filtro calculado, como mostrado na Figura 4.3. O gráfico a seguir, bem como todos os gráficos neste capítulo, foi simulado no programa MATLAB.

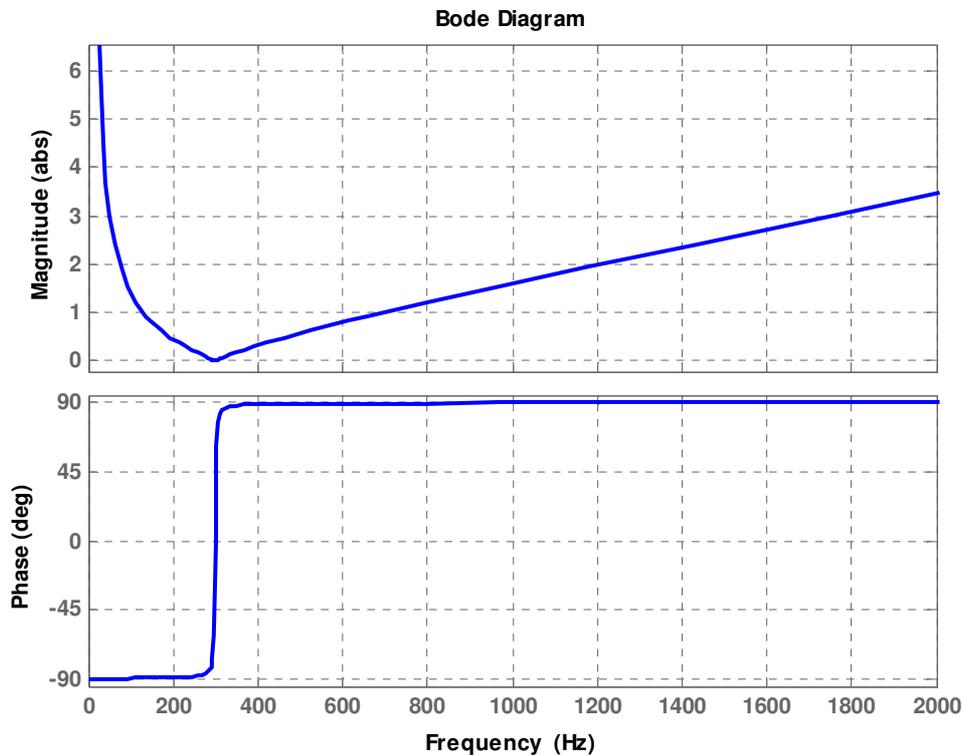


Figura 4.3 Diagrama de Bode – Filtro Sintonizado Simples

O gráfico da Figura 4.3 demonstra que para frequências anteriores à frequência de ressonância, a impedância do filtro tem uma característica capacitiva. Na frequência de ressonância tem impedância zero e para frequências posteriores tem impedância com característica indutiva.

A compensação do fator de potência realizada pelo filtro está diretamente relacionada ao valor da impedância na frequência fundamental e a magnitude de corrente de frequência fundamental que flui através do filtro. Como para frequências anteriores à frequência de ressonância a impedância tem característica capacitiva, o filtro terá característica de compensação capacitiva.

Para o filtro passa alta, o cálculo dos valores de R, L e C é semelhante ao demonstrado sendo que, em função da topologia, a relação entre a frequência e os valores de L e C também pode ser expresso pela equação (4.5) [14].

O fator de qualidade do filtro passa alta varia normalmente entre 0.5 e 2 [15] e pode ser calculado através da seguinte relação [13].

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.8)$$

Como exemplo, um filtro passivo passa alta de 2ª ordem com frequência de ressonância de 300Hz e fator de qualidade 1.88 pode ter os seguintes valores :

$$R = 1\text{ohm}, \quad C = 1\text{mF} \quad e \quad L = 0.28144\text{mH} \quad (4.9)$$

A partir da função de transferência do sistema, é possível verificar no diagrama de bode as características de resposta do filtro calculado, como mostrado na Figura 4.4.

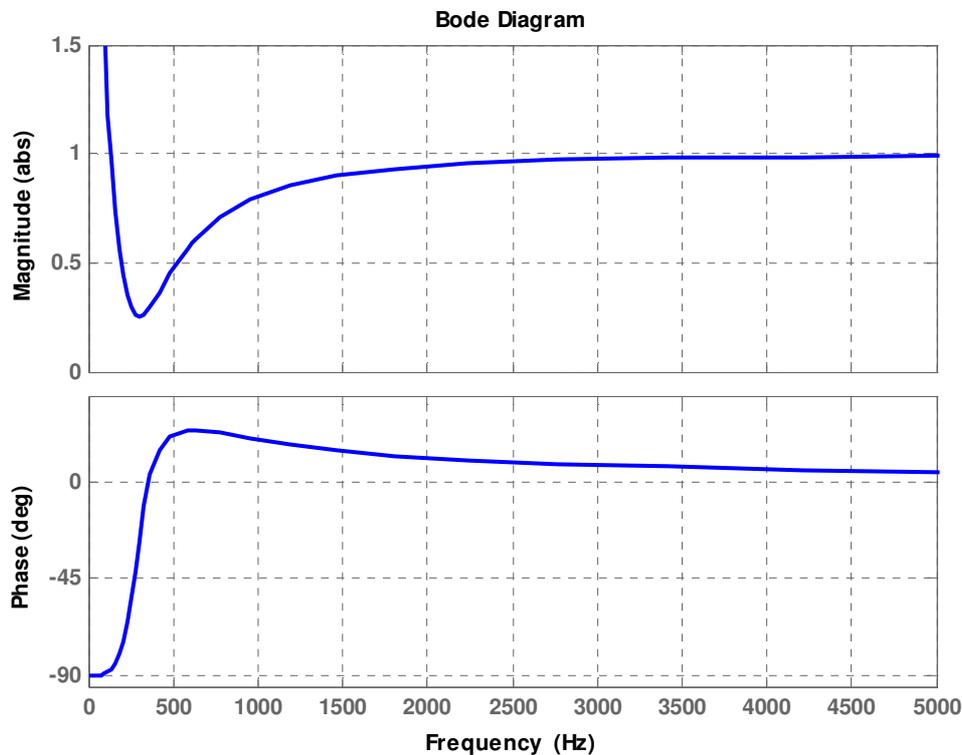


Figura 4.4 Diagrama de Bode – Filtro Passa Alta

O gráfico da Figura 4.4 demonstra que para frequências anteriores à frequência de ressonância, a impedância do filtro tem uma característica capacitiva. Na frequência de ressonância tem impedância pequena e para frequências posteriores tem impedância com pequena característica indutiva, tendendo à resistiva.

4.3 – FILTRO ATIVO PARALELO

O filtro ativo paralelo pode ser considerado como uma fonte de corrente controlada com objetivo tanto de compensar as componentes harmônicas consumidas pela carga quanto de corrigir o fator de potência.

Se comparados aos filtros passivos, os filtros ativos têm um desempenho melhor, são fisicamente menores e possuem mais flexibilidade nas aplicações. Eles podem ser utilizados, além da filtragem harmônica, para controle de potência reativa

visando correção de fator de potência ou regulação de tensão, balanceamento de carga, redução de *flicker* na tensão entre outros. Como pontos negativos, eles são mais caros e possuem uma perda operacional maior [1].

O filtro ativo paralelo, mostrado na Figura 4.5, pode ser utilizado em uma ou várias aplicações simultâneas. É possível, por exemplo, configurar um filtro ativo paralelo de forma a filtrar harmônicos e corrigir o fator de potência do sistema ao qual está conectado.

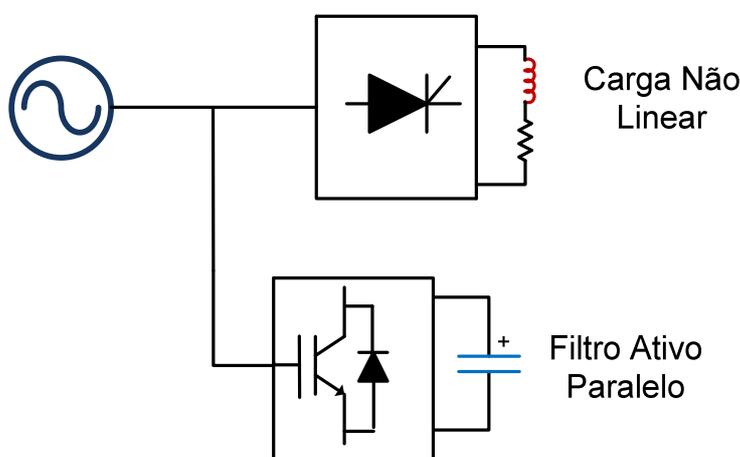


Figura 4.5 Filtro Ativo Paralelo

Os filtros ativos, independente de sua topologia, são constituídos tanto por um circuito de potência quanto por um sistema de controle. O sistema de controle, o qual é abordado mais à frente, é responsável por fazer com que o conversor de potência reproduza a forma de onda da corrente derivada dos algoritmos de controle.

O circuito de potência é formado basicamente pelo conversor CC-CA, que pode ser do tipo fonte de tensão (utilizado mais frequentemente) ou fonte de corrente, e um filtro passivo cuja função é atenuar o *ripple* nas tensões e correntes produzidas pelo conversor [16]. Os algoritmos de controle e as técnicas de chaveamento devem ser adequados de acordo com a topologia apresentada.

Os filtros ativos do tipo fonte de corrente, apesar de serem menos utilizados, têm um desempenho semelhante aos filtros ativos do tipo fonte de tensão; exceto na

condição de baixo carregamento do sistema onde os filtros ativos do tipo fonte de corrente são significativamente mais eficientes do que os do tipo fonte de tensão, como mostrado em [17].

4.3.1 – FUNDAMENTOS DE CONTROLE PARA FILTRO ATIVO PARALELO

A função do filtro ativo, como já foi dito anteriormente, é funcionar como uma fonte de corrente controlada. A partir da medição dos valores de tensão e corrente do sistema, é possível calcular a corrente de referência a ser produzida pelo conversor. Nesse sentido, é possível fazer com que o filtro produza uma corrente com o objetivo de compensar os possíveis problemas de qualidade de energia elétrica como, por exemplo, correção de fator de potência, compensação harmônica, redução de *Flicker* entre outros.

O primeiro passo no desenvolvimento da estratégia de controle é definir qual grandeza se deseja filtrar. A partir da teoria p-q apresentada no capítulo 3, é possível calcular através de parâmetros medidos no sistema os valores de potência ativa e reativa média (\bar{p} e \bar{q}) e potência ativa e reativa oscilante (\check{p} e \check{q}). Uma vez isolado o componente que se deseja filtrar, é possível desmembrá-lo em termos de tensão nos eixos α e β ou corrente nos eixos α e β e, então, definir um sistema de controle de disparo das chaves do conversor de potência.

Os algoritmos de controle são definidos pelas variáveis de entrada e pelas grandezas calculadas que se desejam filtrar. Eles definem, junto com a topologia do conversor, a característica do filtro ativo, que pode ser:

- Fonte de corrente controlada por corrente.
- Fonte de corrente controlada por tensão.
- Fonte de tensão controlada por corrente.
- Fonte de tensão controlada por tensão.

4.3.2 – ALGUMAS TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO

A partir da corrente de referência calculada pelo sistema de controle, é preciso produzir esta corrente pelo conversor de potência.

Os conversores PWM, sigla referente a *Pulse Width Modulator* ou modulador de largura de pulso, são os responsáveis por produzir a corrente de compensação calculada pelos algoritmos de controle. Contudo a técnica para acionamento das chaves do conversor depende de sua topologia.

Os conversores PWM do tipo fonte de tensão são unidirecionais em tensão e bidirecionais em corrente (Figura 4.7 (a)). Os conversores PWM do tipo fonte de corrente são unidirecionais em corrente e bidirecionais em tensão (Figura 4.7 (b)). Como pode ser observado da Figura 4.7 eles não possuem fontes de energia, apenas elementos armazenadores (capacitor ou indutor), portanto o filtro ativo não fornece ou absorve energia do sistema.

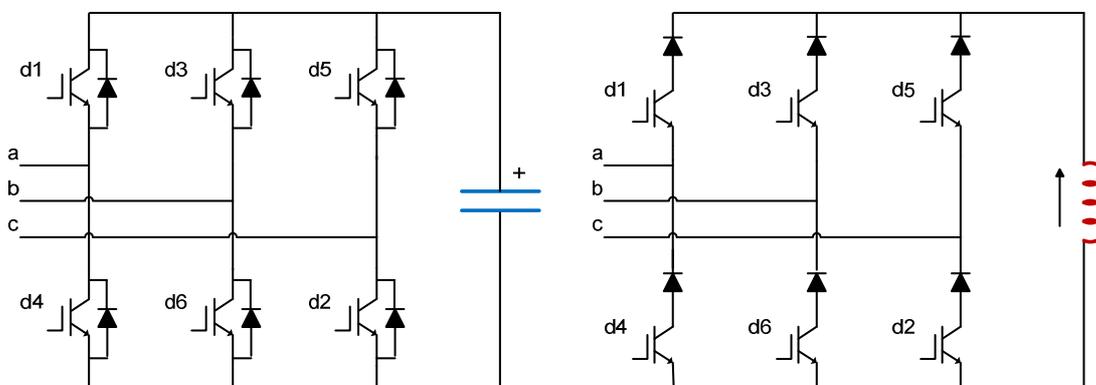


Figura 4.7 Conversores tipo Fonte de Tensão (a) e Fonte de Corrente (b)

Os conversores tipo fonte de tensão são mais eficientes, têm um custo menor e são fisicamente menores do que os conversores tipo fonte de corrente [18].

Os conversores PWM devem possuir uma alta frequência de chaveamento para poder reproduzir com fidelidade a corrente de compensação. Em função dessa alta frequência de chaveamento é gerada uma corrente harmônica considerável em torno da

frequência de chaveamento. Se essa frequência for suficientemente alta, é possível filtrar esses harmônicos por meio de um filtro passivo passa alta [8] Figura 4.8.

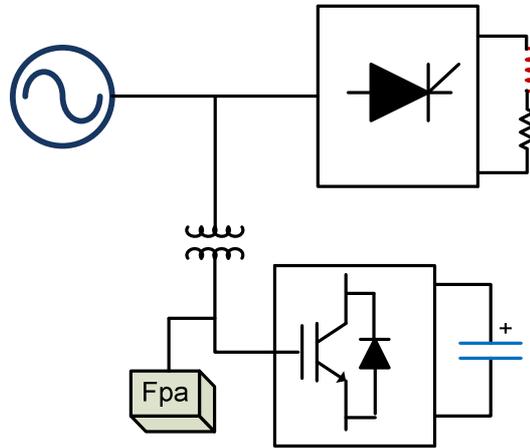


Figura 4.8 Filtro de harmônicos Gerados Pelo Chaveamento

4.4 – FILTROS HÍBRIDOS

Filtros híbridos são formados pela combinação de filtros passivos e filtros ativos. A função dessa combinação é somar a capacidade de filtragem dos dois tipos de filtros, levando a uma filtragem final mais eficiente. Em [19] foi feita uma comparação de desempenho entre o filtro híbrido paralelo e o filtro ativo paralelo puro. Nesse estudo foi concluído que tanto por meio de simulações quanto de análises teóricas que o filtro híbrido é superior ao filtro ativo. O estudo mostrou que o filtro híbrido Paralelo é mais eficiente, possui um *ripple* de chaveamento menor além de necessitar de um capacitor menor no lado CC do inversor PWM.

Conforme discutido nos itens 4.2 e 4.3 deste capítulo, filtros passivos são basicamente aplicados na filtragem harmônica de uma ou mais frequências definidas, enquanto os filtro ativos podem, além da filtragem harmônica, realizar correção de fator de potência, balanceamento de carga, controlar a absorção de corrente harmônica, entre outras possibilidades. O filtro híbrido deve, portanto, explorar a boa capacidade de

filtragem harmônica do filtro passivo com a controlabilidade de corrente proporcionada pelo filtro ativo.

Considerando apenas filtros conectados em paralelo, é possível focar na discussão de duas topologias principais de filtros híbridos, que são discutidas a seguir. O primeiro filtro híbrido é composto de um filtro ativo e um filtro passivo ambos conectados separadamente em paralelo ao sistema, como mostrado na Figura 4.9. Esta topologia permite a operação de cada filtro de forma independente.

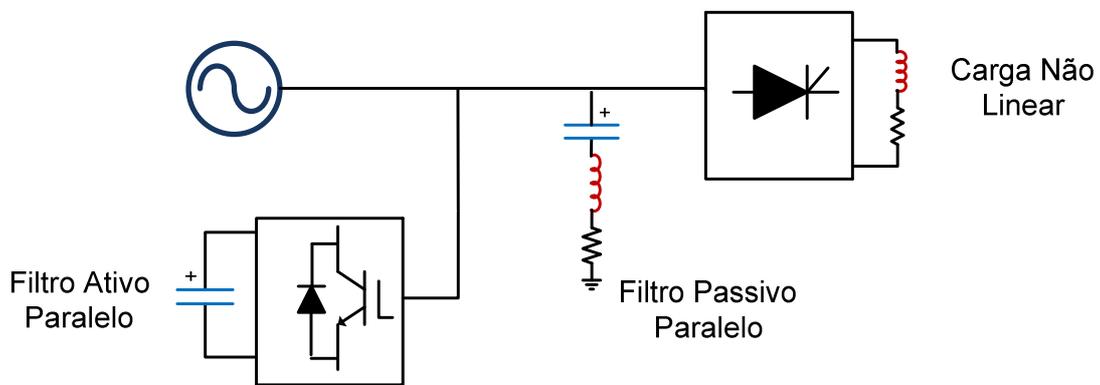


Figura 4.9 Filtro Híbrido

O segundo filtro híbrido é composto por um filtro ativo em série com um filtro passivo, e estes conectados em paralelo à rede elétrica como pode ser visto na Figura 4.10. Como benefício dessa topologia, é possível eliminar o transformador abaixador do filtro passivo desde que se tenha cuidado com a queda de tensão sobre o filtro passivo, como mostrado em [5]. Essa topologia permite, além de diminuir consideravelmente o custo, tornar o filtro híbrido leve e compacto.

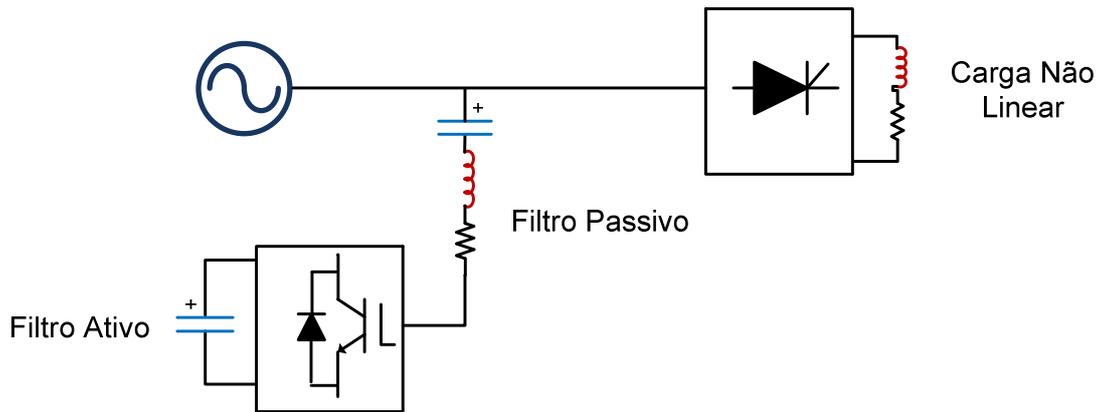


Figura 4.10 Filtro Híbrido

4.5 – CONCLUSÕES PARCIAIS

A proposta deste trabalho consiste em definir uma solução viável para aplicação de filtro híbrido em um sistema de alta tensão. Via de regra, a aplicação de um transformador abaixador de considerável potência seria mandatário quando da aplicação de filtros ativos em alta tensão uma vez que, atualmente, os dispositivos semicondutores disponíveis possuem características de operação (tensão de bloqueio e corrente de condução) com condições de serem utilizados, a priori, em redes elétricas de baixa tensão [2].

A solução do problema proposto aponta para o filtro híbrido mostrado na Figura 4.10, pois além de permitir a retirada do transformador abaixador, o filtro possui controlabilidade da corrente de compensação além de permitir compensação do fator de potência do sistema.

5 – ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO FILTRO HÍBRIDO

5.1 – INTRODUÇÃO

O problema de sobrecarga harmônica que motivou este trabalho é formado por um sistema de alta tensão, que será discriminado mais à frente, constituído por barras, linhas de transmissão aéreas e subterrâneas, transformadores, elementos de compensação reativa e filtros passivos para atenuação harmônica. As barras de alta tensão que compõem esse sistema geralmente são conectadas a múltiplos circuitos de transmissão, o que dificultaria um sistema de medição baseado na leitura de corrente.

A característica da sobrecarga harmônica em sistemas de potência, como o mencionado acima, não segue um padrão fixo de comportamento. Ela varia dependendo do horário, do dia da semana e dos meses do ano, sendo que o único padrão estabelecido é seu aumento médio no tempo em função do aumento das cargas não lineares introduzidas tanto no sistema residencial como pelas indústrias [4]. Portanto um sistema que possa se adaptar dinamicamente à carga harmônica seria uma escolha mais indicada.

A aplicação de um filtro passivo em um sistema grande e altamente malhado, como o sistema em questão, pode gerar o efeito indesejado de sobrecarga de corrente harmônica em função de cargas harmônicas vizinhas, que podem passar a ser drenadas involuntariamente pelo filtro como discutido no capítulo 3.2. Portanto é necessário, também, controlabilidade da compensação realizada pelo filtro, a fim de evitar sobrecarga no mesmo.

A partir destes pressupostos, podemos considerar que a solução para o problema descrito depende de um sistema baseado em medição de tensão, que possa variar dinamicamente a carga compensada de acordo com as necessidades do sistema e também limitar a corrente drenada.

Um ponto importante a ser discutido é a questão prática da solução que está sendo proposta. No nível de tensão em que funcionam as barras do sistema descrito acima, a aplicação de dispositivos eletrônicos seria proibitiva ou, no caso de arranjos de componentes em série, altamente dispendioso e complicado. A solução de utilização de

um transformador abaixador é uma solução possível, mas também recairia no problema do custo elevado [16].

A solução proposta neste trabalho é um filtro híbrido conectado em paralelo à rede elétrica, constituído por um filtro passivo em série com um filtro ativo.

Nessa configuração, o filtro passivo seria responsável por abaixar a tensão terminal da rede a um nível aceitável de funcionamento do filtro ativo, bem como por servir de caminho de baixa impedância ao harmônico que se deseja filtrar. O filtro ativo seria responsável pela regulação dinâmica da corrente a ser compensada.

O objetivo deste capítulo é demonstrar todos os passos da criação da lógica de controle utilizada no filtro híbrido descrito, destacando os métodos de cálculo e todo o embasamento teórico utilizado.

5.2 – ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O sistema utilizado para projetar e simular o filtro foi um sistema de 88kV constituído por uma fonte, uma carga indutiva trifásica balanceada e uma injeção harmônica trifásica, como visto na Figura 5.1. Como o algoritmo é baseado em tensão, não é necessário que a carga esteja à jusante do filtro.

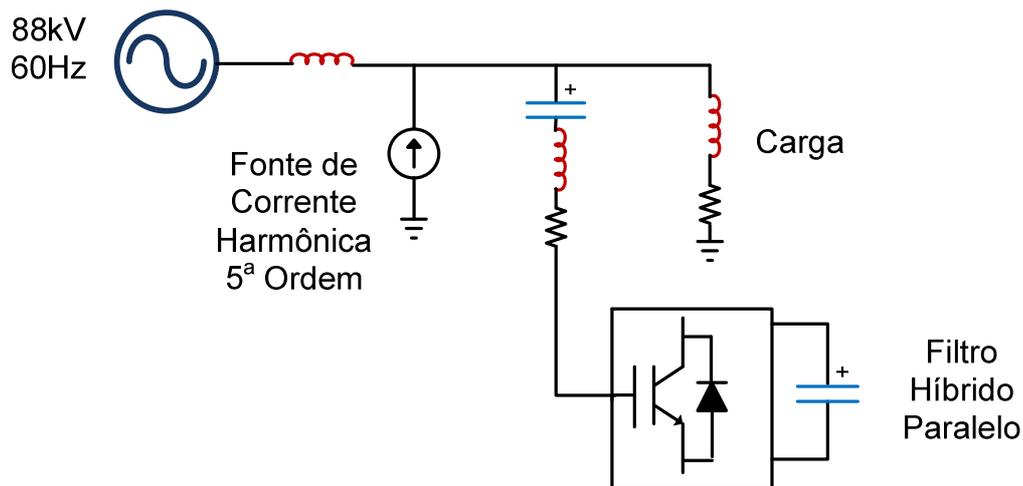


Figura 5.1 Sistema Utilizado no Projeto do Filtro

O filtro híbrido possui, basicamente, quatro estratégias atuando paralelamente: A de detecção da componente harmônica que se deseja filtrar, a de chaveamento do conversor, a de compensação da potência do capacitor e a de injeção de corrente de frequência fundamental, cujo objetivo é gerar a queda de tensão necessária no filtro passivo para permitir o pleno funcionamento do filtro ativo.

Dessas estratégias descritas, apenas a de injeção de corrente de frequência fundamental não é dinâmica, ou seja, não possui a capacidade de se adaptar em função das variações no sistema.

5.2.1 – ESTRATÉGIA DE DETECÇÃO DE COMPONENTE HARMÔNICA

A estratégia de detecção da componente harmônica pode ser dividida em várias etapas. O processo começa com a detecção da frequência e ângulo de fase da tensão de sequência positiva fundamental. Isso é possível através da utilização de um PLL – *Phase Locked Loop*. Esse sinais são, então, multiplicados pelo harmônico desejado e, através de um gerador de senos, são calculadas as componentes harmônicas em termos de α e β , como mostrado na Figura 5.2.

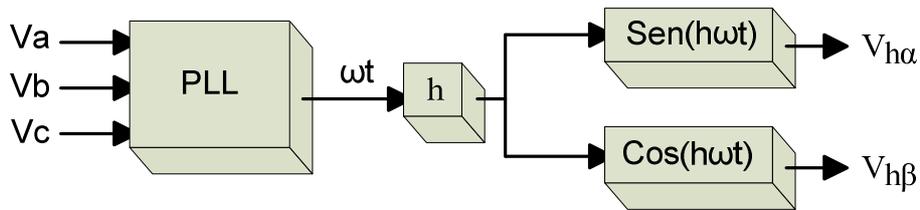


Figura 5.2 Cálculo da Referência Harmônica

É possível verificar na Figura 5.3, as formas de onda características de ωt , para uma frequência fundamental de 60 hertz, e de $Vh\alpha$ e $Vh\beta$ referentes ao 5º harmônico. Essas formas de onda, bem como todas as simulações realizadas neste capítulo, foram simuladas no software PSCAD.

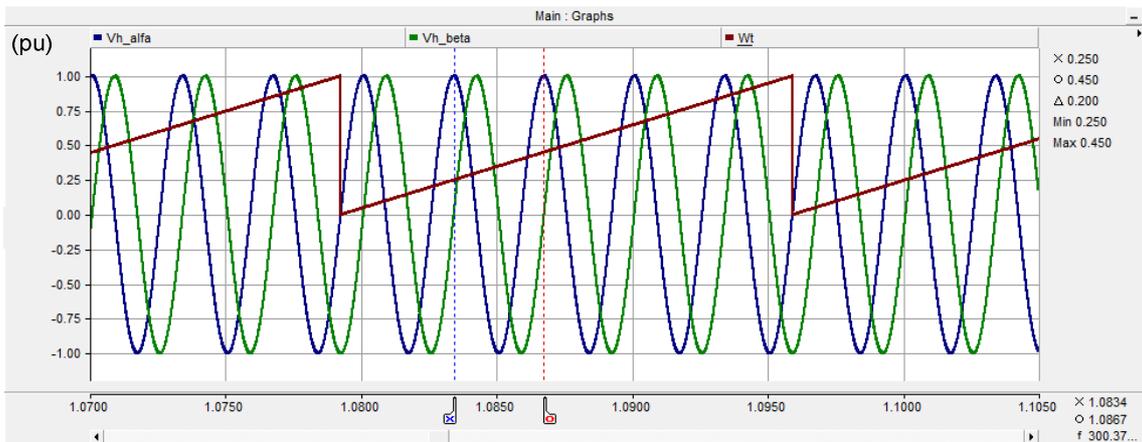


Figura 5.3 Formas de Onda de ωt , $Vh\alpha$ e $Vh\beta$

Utilizando a teoria de potência instantânea, seria necessária a medição dos valores das correntes para calcular p e q harmônicos, como demonstrado no capítulo 2. A estratégia utilizada para o cálculo da componente harmônica é uma modificação das equações originais da teoria da potência instantânea [20].

Os valores de tensão das fases em termos de a, b e c são, então, transformados para termos de α e β (através da transformada de Clarke, descrita no capítulo 2) para manter todas as variáveis no mesmo sistema de referência. É importante ressaltar que esses valores de tensão medidos do sistema possuem tanto a componente fundamental quanto a componente harmônica, como pode ser visto na Figura 5.4.

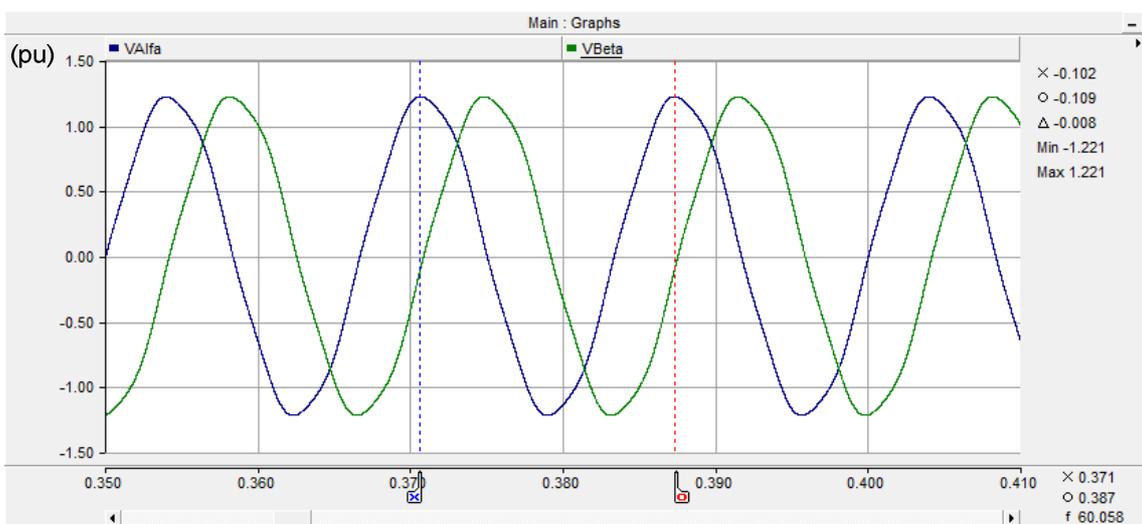


Figura 5.4 Formas de onda de $V\alpha$ e $V\beta$

A partir dos valores de $V_{h\alpha}$ e $V_{h\beta}$, combinados com os valores de tensão em termos de α e β medidos do sistema, é possível calcular um valor médios das componentes harmônicas \bar{p}_h e \bar{q}_h utilizando um filtro passa baixa.

Uma vez calculados os valores de \bar{p}_h e \bar{q}_h , um controlador PI – Proporcional Integral pode ser aplicado para determinar, dinamicamente, o ângulo de fase e a magnitude da componente harmônica a ser compensada no sistema, como demonstrado na Figura 5.4.

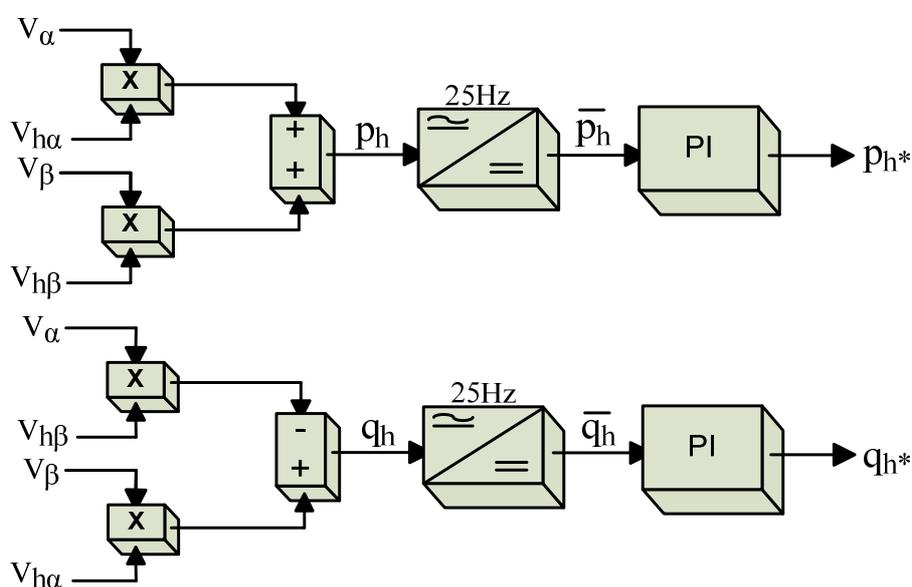


Figura 5.4 Cálculo da Componente Harmônica

O controlador proporcional integral é responsável pelo ajuste dinâmico da componente harmônica, como já foi dito. A resposta ótima do controlador, e conseqüentemente uma rápida convergência da sua resposta quando da variação do parâmetro controlado, depende dos ajustes de seu ganho proporcional e da constante de tempo integral. Sua resposta varia de acordo com o sistema ao qual está aplicado, portanto é possível destacar que cada sistema possui um ajuste ótimo. Os ajustes do PI aplicado ao controle descrito acima foram feitos através de testes experimentais, cujas respostas podem ser verificadas na Figura 5.5.

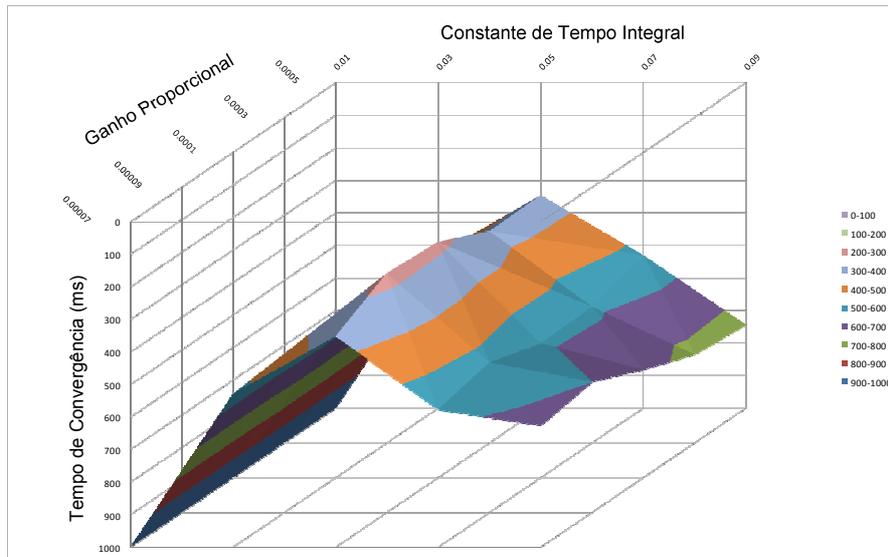


Figura 5.5 Respostas dos Ajustes do Controlador PI

Para os valores de ganho proporcional de 0.00009 e da constante de tempo integral de 0.05 o sistema obteve um tempo de convergência de aproximadamente 300ms. Isso pode ser verificado através dos valores da componente harmônica calculada, conforme verificado na Figura 5.6.

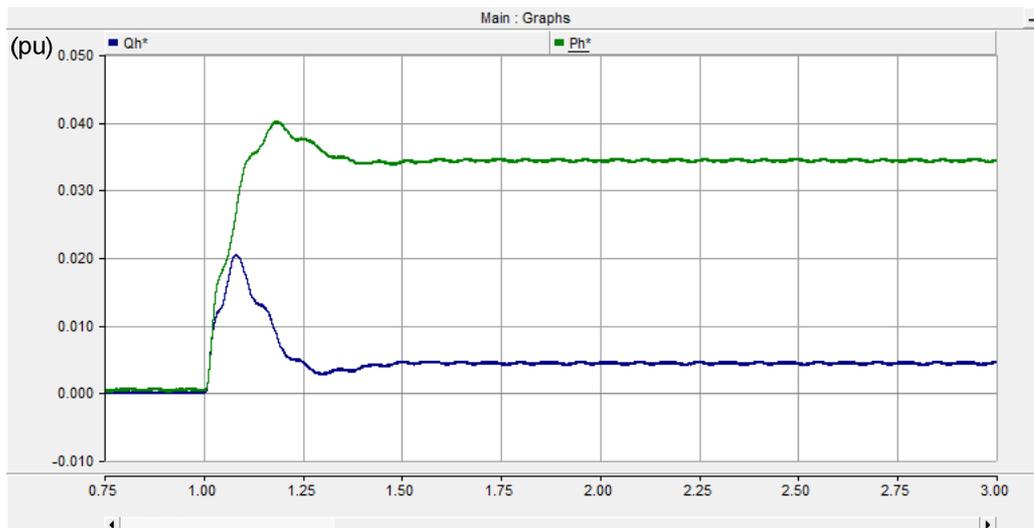


Figura 5.6 Componentes Harmônicas Calculadas

A última parte da lógica de detecção da componente harmônica é o cálculo da corrente de compensação. Como já foi dito, o processo se baseia numa modificação das equações originais da teoria de potência instantânea.

As correntes de compensação podem ser calculadas através da relação entre as componentes harmônicas calculadas (p_h^* e q_h^*) e os valores medidos de tensão em termos de α e β que, após serem multiplicadas por um ganho (G), podem ser definidas como as correntes de compensação harmônica [20]. O modelo utilizado está descrito na Figura 5.7.

No caso do filtro híbrido estipulado, as correntes de compensação harmônica são apenas uma parte das correntes que devem ser reproduzidas pelo conversor e injetadas nas três fases do sistema.

Ao valor dessas correntes de compensação calculadas é preciso adicionar mais duas parcelas de compensação, uma referente à corrente de frequência fundamental (I_{fp}), que será responsável pela queda de tensão necessária para permitir o funcionamento do conversor, e uma referente à corrente responsável pelo controle de tensão do capacitor do lado CC do conversor (I_c). Esses controles serão discutidos a seguir.

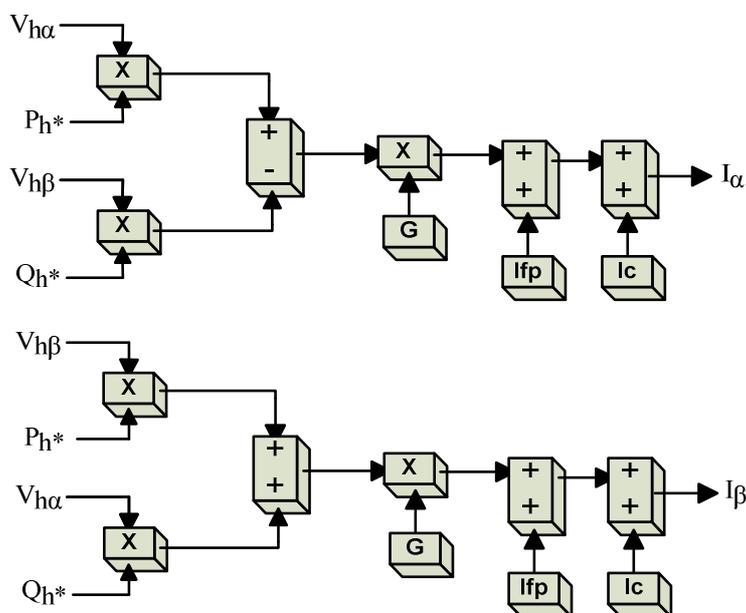


Figura 5.7 Cálculo das Correntes de Compensação

O cálculo do ganho (G) aplicado às correntes calculadas foi obtido de forma experimental. Utilizando um ganho nulo, ou seja, com valor igual a um, os controladores levaram um tempo considerável para corrigir o erro, em torno de nove segundos. Então, a partir da razão entre o valor final e o valor inicial da corrente de compensação calculada com ganho nulo, é possível obter um valor de ganho otimizado. Quando aplicamos esse ganho à resposta obtida da saída do algoritmo de cálculo das correntes de compensação, o tempo de convergência dos controladores foi reduzido para aproximadamente trezentos milissegundos, como pode ser observado nas Figuras 5.8 e 5.9.

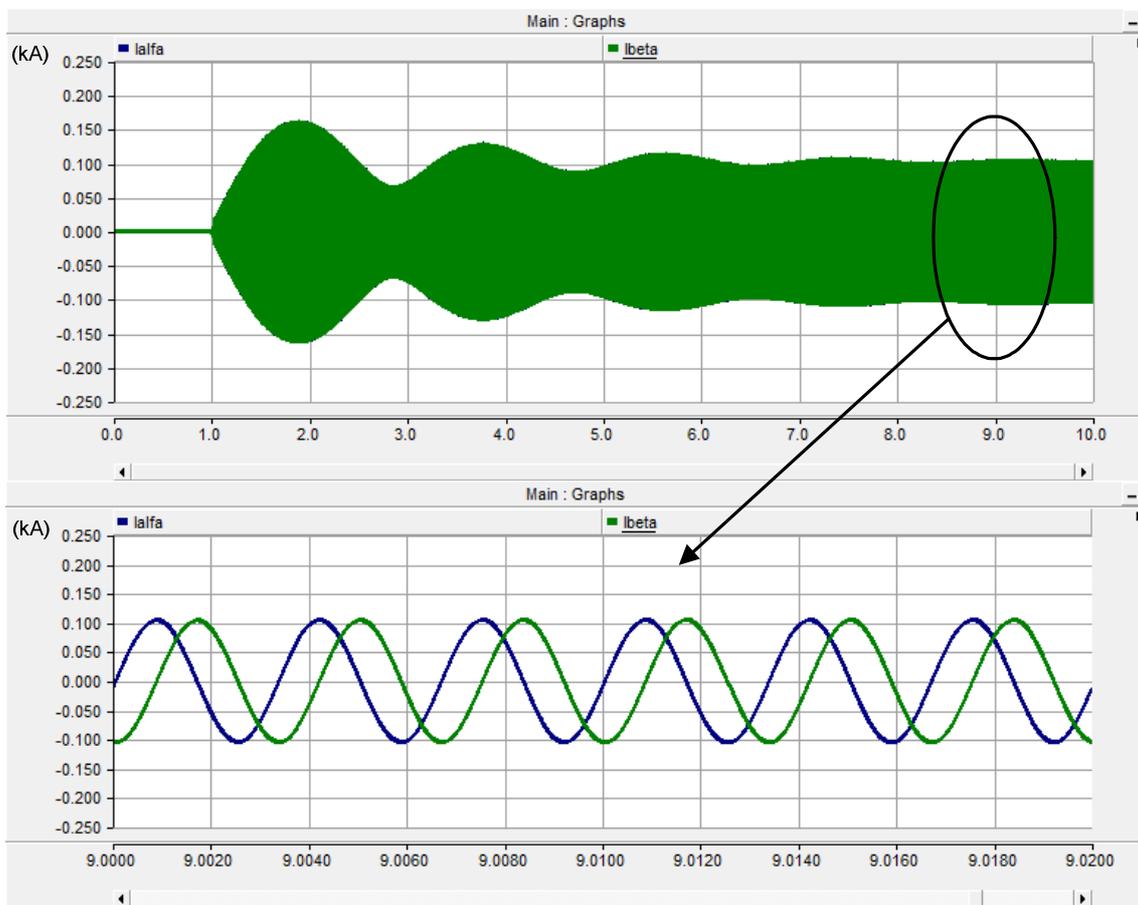


Figura 5.8 Cálculo das Correntes de Compensação com Ganho Nulo

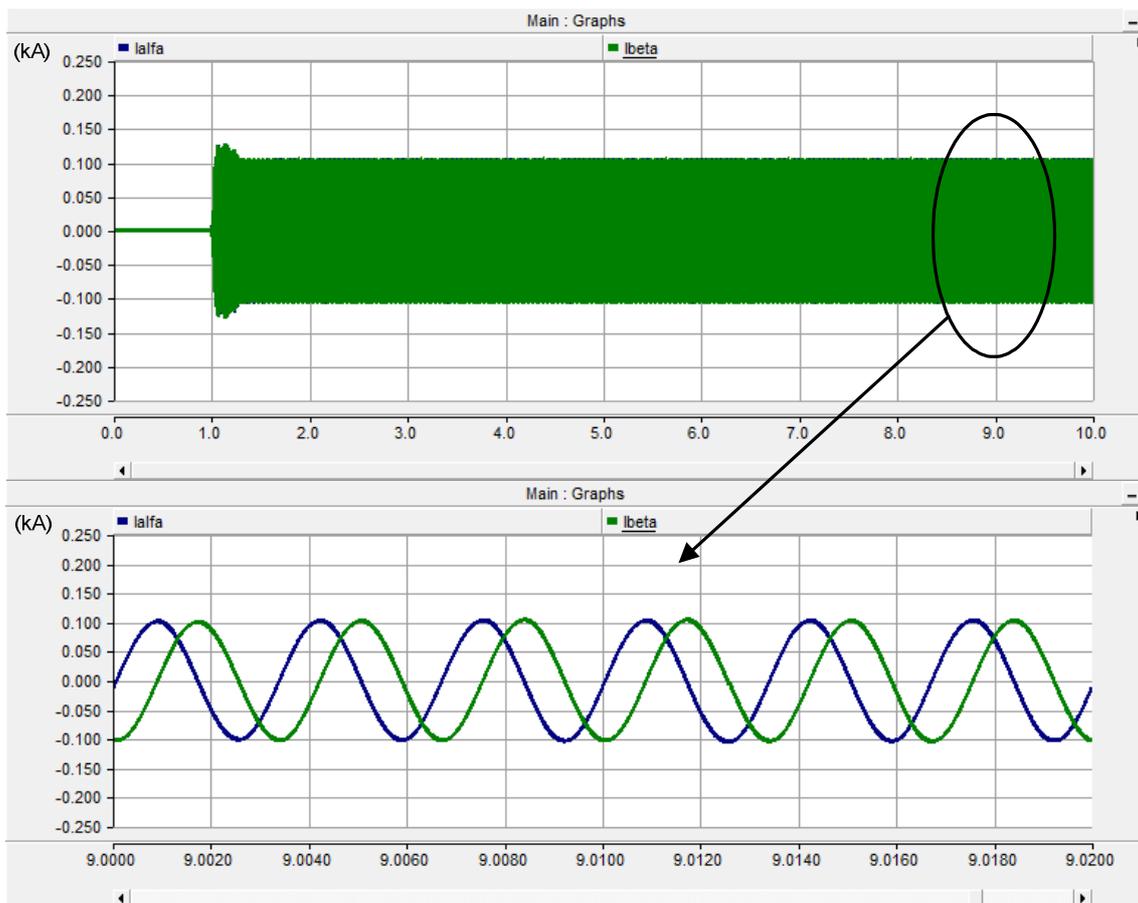


Figura 5.9 Cálculo das Correntes de Compensação com Ganho Calculado

5.2.2 – ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA INJEÇÃO DE CORRENTE FUNDAMENTAL

Conforme verificado na Figura 5.1, o filtro híbrido definido é composto por um filtro passivo RLC sintonizado no 5º harmônico em série com o filtro ativo. Como solução para o problema proposto, que é aplicar o filtro híbrido diretamente à tensão de 88kV, o objetivo dessa configuração é fazer com que a queda de potencial no filtro passivo seja maximizada, tornando a operação do conversor possível em termos práticos.

A queda de tensão, porém, não é a única benesse dessa configuração escolhida, pois se a corrente produzida pelo conversor na frequência fundamental estiver adiantada de noventa graus da tensão do sistema, o filtro híbrido passa a fazer

compensação de fator de potência, melhorando o perfil de tensão do sistema e, conseqüentemente, uma possível sobrecarga nas linhas de transmissão adjacentes.

Como relatado, a corrente que vai realizar a queda de tensão necessária sobre o filtro passivo deve estar na frequência fundamental. Isso se faz necessário em função do filtro ser uma baixa impedância para a frequência harmônica filtrada, o que demandaria correntes altíssimas para prover a queda de tensão necessária. Uma opção seria injetar corrente em outras frequências, diferente da fundamental ou da frequência de sintonia do filtro. Essa solução não é plausível, uma vez que causaria uma distorção harmônica no sistema na frequência definida.

A lógica de injeção de corrente fundamental aplicada no filtro híbrido descrito não é dinâmica. Ela se baseia no valor da impedância de frequência fundamental do filtro passivo sintonizado. Uma vez que a impedância é fixa e conhecida, bem como o montante da queda de tensão desejada, é uma questão de calcular o valor da corrente em função destes parâmetros e adicionar o sinal à corrente que será compensada pelo conversor.

Uma vez definida o valor da corrente necessária, é preciso multiplicá-la pelo sinal de tensão fundamental, adiantado de noventa graus, para reproduzir a forma de onda da corrente com a magnitude necessária para realizar a queda de tensão desejada. A comparação entre a forma de onda da corrente de compensação obtida no eixo α e a forma de onda da tensão de referência no eixo α pode ser observada na Figura 5.10.

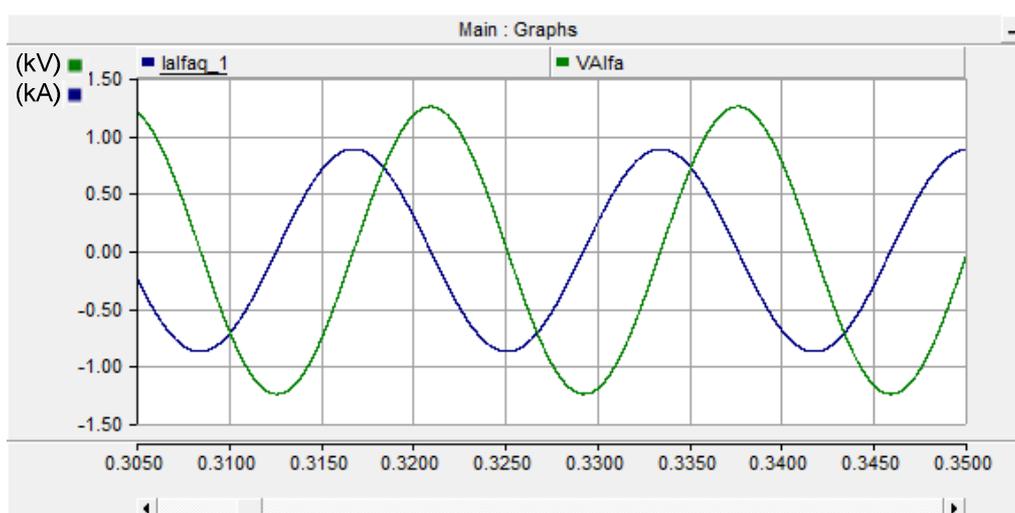


Figura 5.10 Comparação Entre Corrente Calculada e Tensão no Eixo α

O modelo utilizado para calcular a corrente de compensação descrita pode ser observado na Figura 5.11.

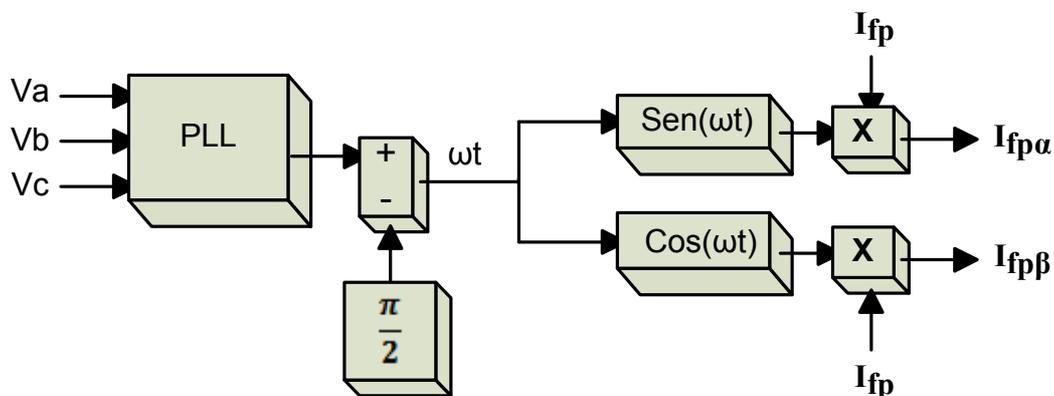


Figura 5.11 Lógica de Cálculo da Corrente de Compensação

Um ponto importante que deve ser levando em conta no dimensionamento do filtro passivo é o valor da impedância na frequência fundamental, uma vez que a magnitude da corrente produzida no sistema descrito é diretamente proporcional a esse parâmetro.

O dimensionamento da queda de tensão sobre o filtro passivo foi feita de forma a dar uma margem de segurança significativa a variações de tensão no barramento de conexão do filtro, de forma a evitar que a tensão no terminal do filtro ativo fique maior do que a tensão nos terminais do capacitor (link CC). Caso isso ocorresse, o conversor perderia controlabilidade. Isso é importante ser mencionado uma vez que o sistema proposto não adapta a injeção de corrente de frequência fundamental a variações de tensão no barramento.

5.2.3 – ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO DO LADO CC

A função do conversor é gerar uma corrente de compensação definida. Essa corrente é gerada através da transferência controlada de corrente entre as fases do sistema. Como descrito no capítulo 2 esse tipo de compensação, baseado na teoria da potência instantânea, não necessita de nenhuma fonte de energia externa para funcionar,

apenas a troca de energia entre as fases permite todo o processo de compensação descrito até agora.

O capacitor aplicado aos terminais do conversor tem a função apenas de manter uma tensão mínima para o chaveamento dos dispositivos eletrônicos. Na média, a energia absorvida ou entregue ao sistema pelo capacitor é nula, mas é preciso definir uma lógica de controle para manter a tensão constante no capacitor durante uma variação da corrente compensada. O capacitor em questão é bem pequeno se comparado às grandezas envolvidas.

O cálculo do dimensionamento do capacitor, como descrito em [21], depende do valor definido do UCC – Unidade de Constante de Capacitância, que na teoria significa o tempo necessário para descarregar o capacitor, ou seja, considerando o capacitor completamente carregado, ele se manteria com energia suficiente para realizar o trabalho durante o tempo de um UCC.

A relação entre o valor do UCC e o capacitor pode ser obtida através da fórmula:

$$UCC = \frac{CV^2}{2S} \quad (4.1)$$

Sendo que:

$$S = V_{ff-RMS} \cdot I_{Filtro} \cdot \sqrt{3} \quad (4.2)$$

A lógica de compensação da energia do capacitor busca, basicamente, enviar energia ao capacitor, caso a tensão terminal diminua, ou retirar energia do capacitor, caso a tensão terminal aumente. Essa corrente de compensação do capacitor pode ser calculada através da diferença entre a tensão filtrada verificada no capacitor e uma referência estipulada. O erro obtido passa por um controlador PI e então, para obter as referências nos eixos α e β , é multiplicado pelas referências de tensão fundamental em α e β advindas do PLL. A lógica de cálculo da corrente de compensação do capacitor descrita pode ser observada na Figura 5.11.

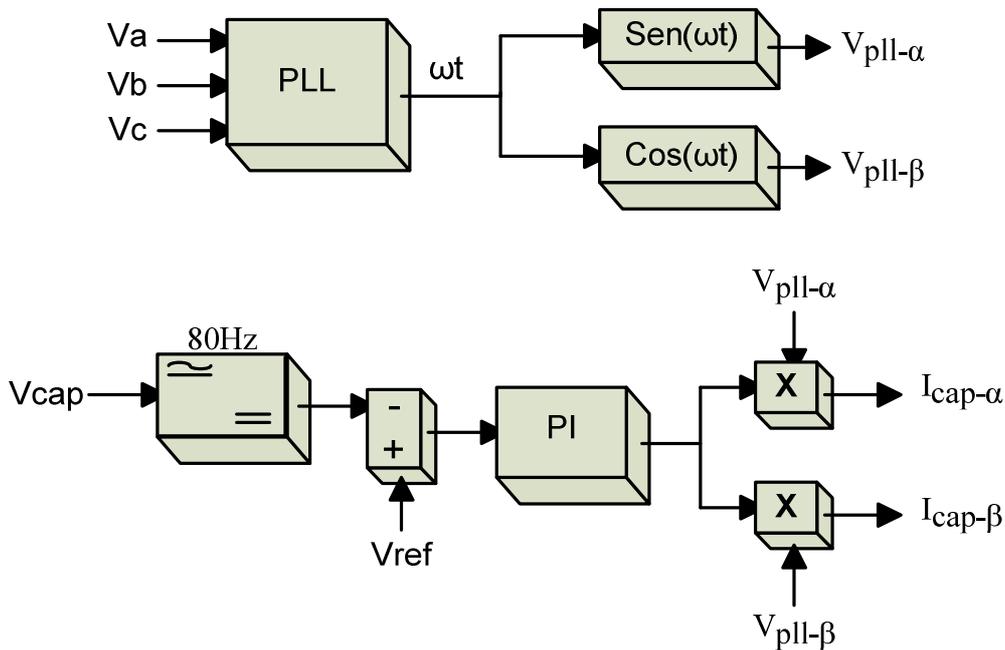


Figura 5.11 Lógica de Cálculo da Corrente de Compensação do Capacitor

Dada uma referência fixa para o capacitor de 1.2kV, é possível observar na Figura 5.12 a resposta da lógica utilizada. O gráfico deixa claro que quando a tensão no capacitor fica acima da referência, a corrente de compensação será negativa (saída do PI). Quando a tensão no capacitor fica abaixo da referência a corrente de compensação será positiva. Esses sinais da corrente de compensação estão referenciados ao sentido de corrente definida no capacitor.

O gráfico da Figura 5.12 foi obtido durante o início do chaveamento de corrente harmônica de 5ª ordem e mostra o *overshoot* de tensão gerado pela entrada de corrente harmônica no filtro que, associada à tensão harmônica presente, gera uma potência injetada no capacitor. É importante manter essa tensão sempre controlada dentro de valores mínimos e máximos definidos.

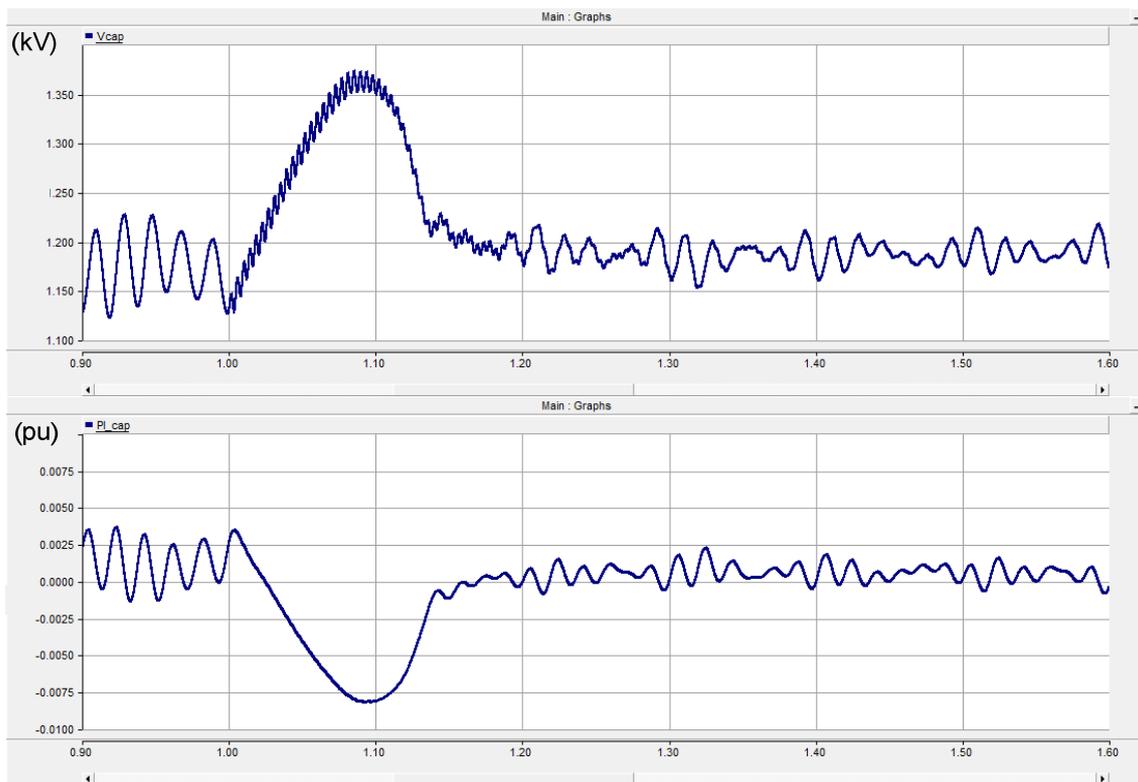


Figura 5.12 Gráficos de Tensão e Potência de Compensação no Capacitor

Se o valor da tensão no capacitor ficar mais baixo do que a tensão de pico entre fases no terminal do conversor, não vai haver tensão mínima de condução nas chaves, e o conversor vai perder controlabilidade. Por isso, como será mostrado mais à frente, o dimensionamento da tensão terminal do filtro, por fase, é de 400V, gerando uma tensão máxima de aproximadamente 1kV sobre a chave do conversor. Como essa tensão é menor que o 1.2kV nos terminais do capacitor, a condição de tensão mínima de chaveamento é atendida.

Outro ponto importante é evitar sobretensões no terminal do capacitor, pois mesmo por curtos períodos elas podem danificar as chaves do conversor. A medida adotada para solucionar esse problema foi gerar um curto trifásico nos terminais do filtro ativo, como mostrado na Figura 5.14. Desta forma a tensão sobre o capacitor e, portanto, nos terminais do conversor é zero.

A lógica funciona através da comparação entre a tensão do capacitor e uma tensão de referência. Quando a tensão no capacitor fica maior do que a tensão de

referência e o filtro ainda não começou a funcionar, a lógica manda um sinal de disparo para as chaves G1, G3 e G5 como mostrado na Figura 5.13. Quando o filtro começa a funcionar, ele desbloqueia essa lógica, permitindo que o conversor funcione.

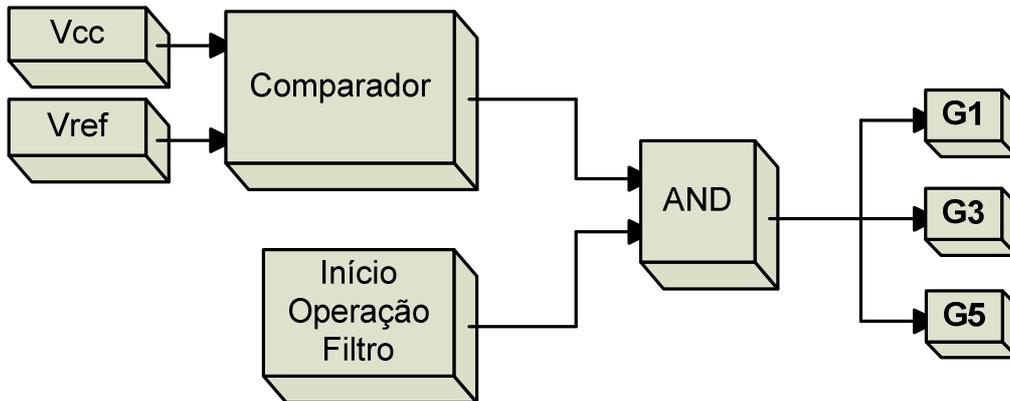


Figura 5.13 Lógica de Proteção de Sobretensão no Capacitor

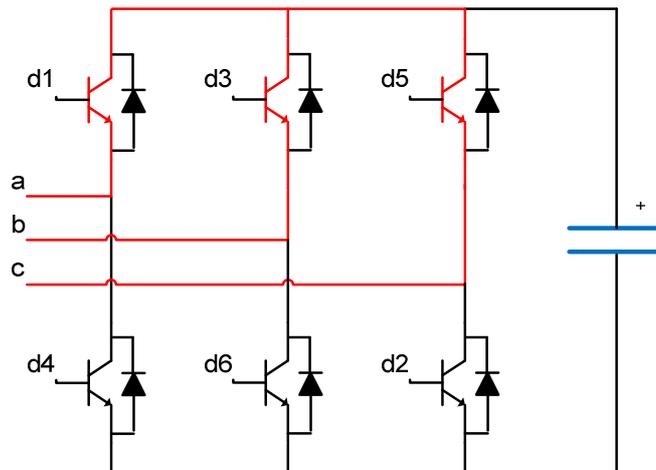


Figura 5.14 Esquema de Atuação da Proteção de Sobretensão

Esse esquema de proteção não pode ficar atuado direto, uma vez que quando ela está ativa o capacitor não pode ser carregado. Toda a dinâmica da proteção pode ser observada na Figura 5.15.

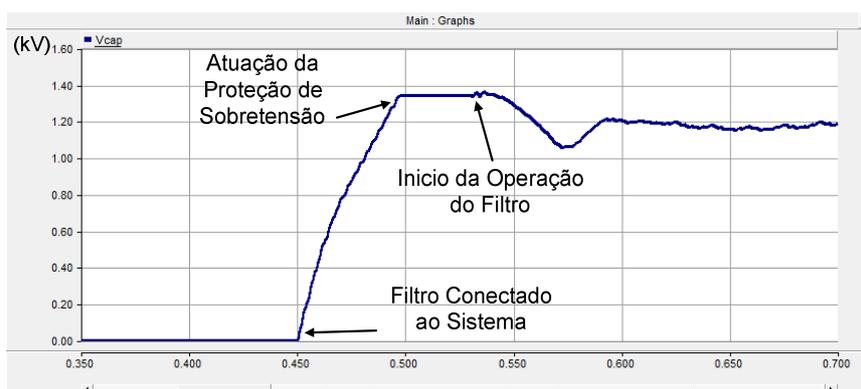


Figura 5.15 Lógica de Proteção de Sobretensão no Capacitor

5.2.4 – LÓGICA DE CHAVEAMENTO DO CONVERSOR

Uma vez que todas as componentes da corrente de compensação já foram calculadas é possível gerar a corrente de compensação monofásica a partir da soma destes três sinais. Essa corrente é reproduzida pelo conversor através do disparo das chaves, que vão forçar a circulação de corrente entre as fases do sistema.

O conversor utilizado é formado por uma ponte de seis chaves conectadas a um capacitor, como mostrado na Figura 5.16. Como já comentado anteriormente, a função desse capacitor é apenas manter uma tensão mínima de chaveamento necessária sobre as chaves.

A referência utilizada para fazer a comparação com o valor calculado da corrente de compensação é a própria corrente medida no cabo de conexão do filtro com o sistema. A partir de um processo de comparação direta entre as magnitudes dessas correntes é possível extrair os pulsos de acionamento das chaves. Para manter a frequência dos pulsos a um patamar máximo aceitável, ou seja, passível de ser reproduzida pelas chaves, é possível adicionar uma referência de amostragem com frequência fixa na saída dos dois sinais de corrente.

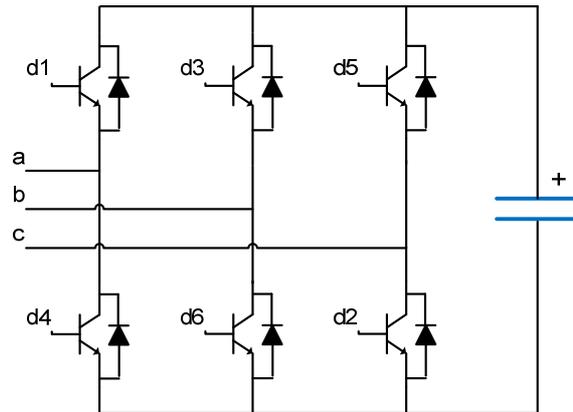


Figura 5.16 Topologia do Conversor Utilizado

Essa lógica de disparo descrita pode ser verificada na Figura 5.17, na qual está especificado o esquema de disparo das chaves conectadas à fase A. Essa lógica considera o sentido medição de corrente $I_{a_{med}}$ do sistema para o filtro.

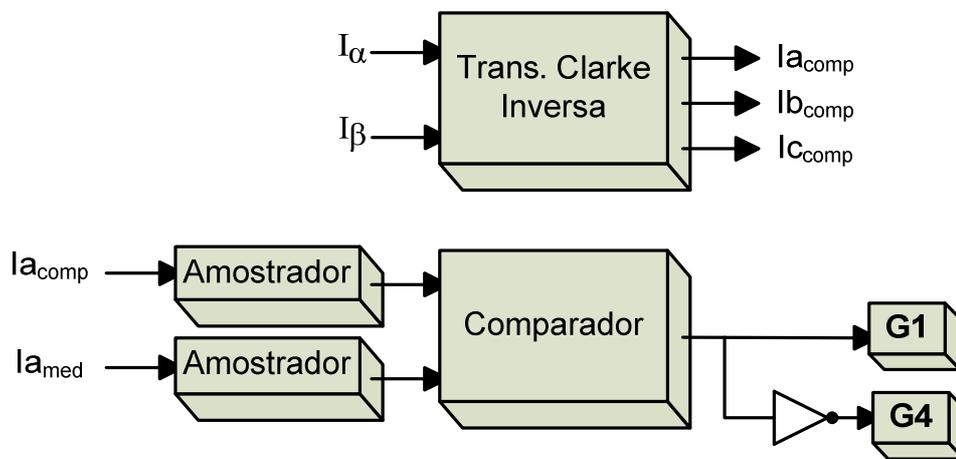


Figura 5.17 Lógica de Disparo da Fase A

A lógica de disparo, bem como o chaveamento realizado pelo conversor, obteve um bom desempenho na reprodução da corrente de compensação calculada, como pode ser visto na Figura 5.18.

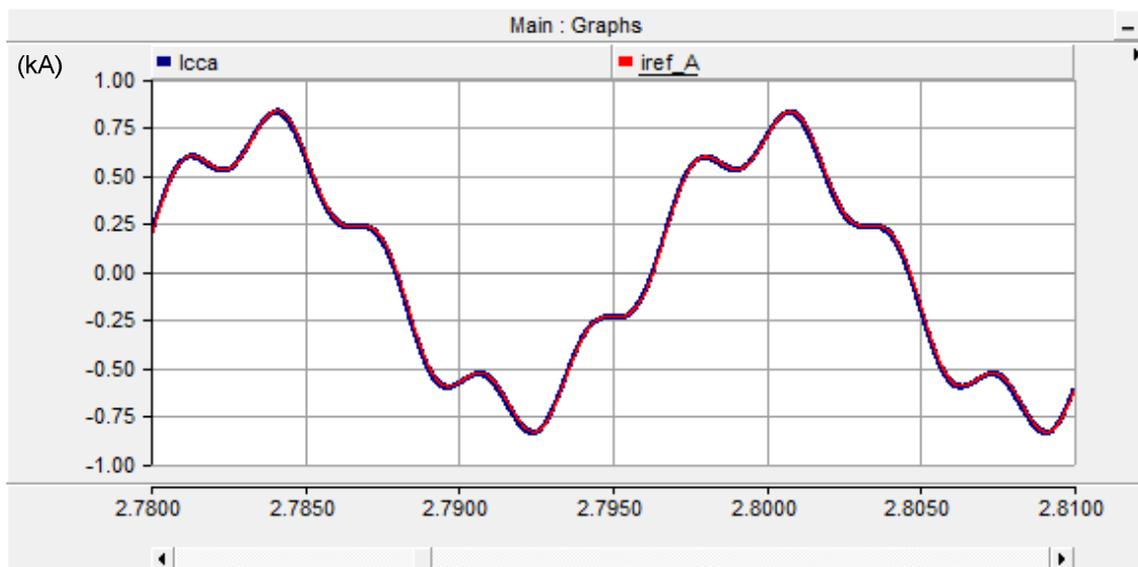


Figura 5.18 Comparação entre a Corrente Calculada pela Lógica de Compensação e Corrente Reproduzida pelo Conversor

5.3 – RESPOSTA DO FILTRO E CONCLUSÕES PARCIAIS

A resposta do filtro híbrido quando acoplado ao sistema teste mencionado foi muito promissora. Para verificar sua eficácia quanto ao acompanhamento das variações de corrente harmônica de 5ª ordem foi realizado um teste mais amplo, que consistiu em variar essa corrente harmônica de 40A a 120A por fase, variando em patamares de 20A. As correntes de compensação harmônica calculadas pelo filtro podem ser observadas na Figura 5.19.

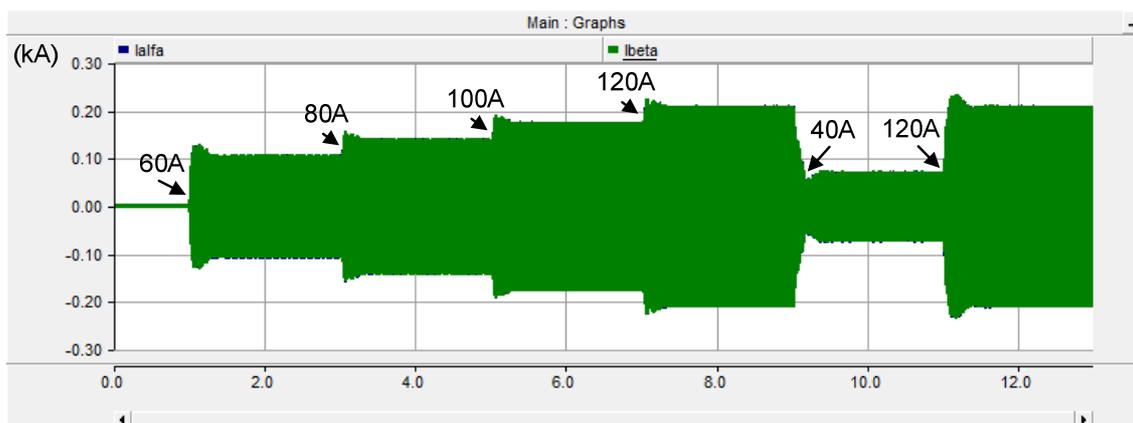


Figura 5.19 Resposta do Filtro Híbrido à Variação de Corrente Harmônica de 5ª Ordem Injetada no Sistema

O tempo de convergência dos controles dos algoritmos se manteve em torno de 300ms para todas as correntes harmônicas de 5ª ordem injetadas e as correntes de compensação calculadas tiveram resposta semelhante ao observado no item 5.2.1.

Os pontos importantes verificados nos resultados observados do filtro híbrido proposto foram:

- A queda de tensão no filtro passivo se manteve dentro dos patamares esperados, levando a uma tensão máxima no terminal no filtro ativo de 1kV.
- A corrente de compensação harmônica calculada através da medição de tensão na barra foi reproduzida sem dificuldades pelo conversor.
- O tempo que o filtro levou para calcular a corrente harmônica foi menor do que 300ms, suficientemente rápido para a aplicação em sistemas de potência.
- A tensão harmônica foi praticamente anulada após a entrada em operação do filtro.
- A tensão do capacitor se manteve estável e a lógica de proteção atuou como esperado.

6 – FILTRO HÍBRIDO CONECTADO A UMA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO

6.1 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO HÍBRIDO

Um dos objetivos desse trabalho é oferecer, além de uma solução teórica otimizada ao problema identificado, uma aplicação prática, que possa ser desenvolvida e comercializada em valores de custo competitivos às soluções disponíveis atualmente.

O primeiro passo está no dimensionamento do filtro passivo. Os valores da capacitância, da reatância e da resistência devem ter a característica de baixa impedância para a 5ª harmônica e uma alta impedância na frequência fundamental. A função dessa relação é maximizar o caminho para as correntes de 5ª harmônica e evitar altas correntes de frequência fundamental para realizar a queda de tensão necessária no filtro passivo, como já foi explicado no capítulo 4.

O filtro passivo foi, então, dimensionado de forma a ter o menor capacitor possível, a fim de diminuir o custo do conversor. Todos os passos deste dimensionamento foram definidos no capítulo 4, bem como as fórmulas e os valores característicos do fator de qualidade. A partir disso, foram dimensionados os seguintes valores dos parâmetros do filtro:

$$C = 25\mu F, L = 11.3mH \text{ e } R = 0.0053\Omega \quad (5.1)$$

E com a função de transferência deste filtro passivo definida por:

$$Z = \frac{s^2LC + sRC + 1}{sC} \quad (5.2)$$

É possível então, com a função de transferência e os valores dos parâmetros do filtro passivo, calcular o Diagrama de Bode e assim verificar graficamente as características do filtro passivo dimensionado.

Com essa configuração, a impedância do filtro na frequência harmônica de 5ª ordem é apenas o valor da resistência aplicada no filtro (0.0053Ω) e a impedância na frequência fundamental calculada foi de 103Ω , como pode ser observado na Figura 6.3.

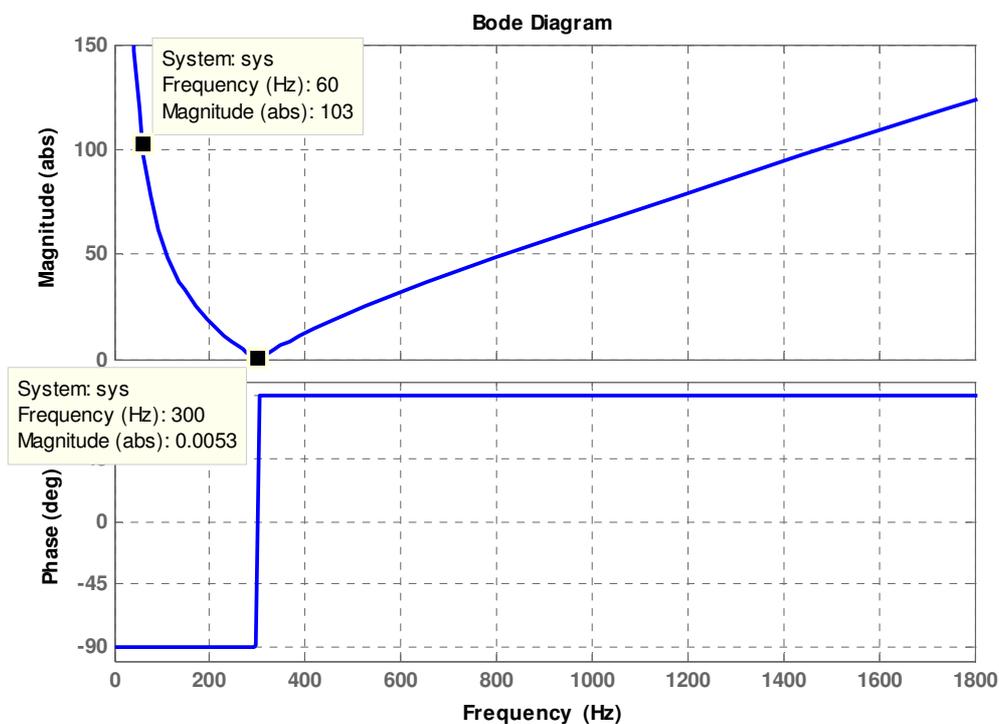


Figura 6.3 Diagrama de Bode – Impedância do Filtro Passivo

A partir destes valores encontrados, é possível definir alguns parâmetros importantes do filtro. Para uma tensão de terminal de 88kV RMS entre fases, e querendo maximizar a queda de tensão sobre o filtro passivo, foi definida uma queda de tensão sobre o filtro passivo de forma que apenas 400V por fase chegassem à extremidade do filtro ativo. Isso significa uma corrente de 489,38A (RMS) em frequência fundamental que precisará ser drenada por fase para manter essa tensão terminal. Isso significa um montante total de 75.18Mvar.

Nos estudos realizados em [7] e [16], foi definida uma corrente de 5ª ordem harmônica de 80A na SE Bandeirantes, gerada principalmente pela amplificação dos cabos subterrâneos como já discutido. Isso significa a necessidade de mais 12.19Mvar de compensação do filtro. A corrente drenada para compensar a variação de tensão do

capacitor pode ser desconsiderada para esse cálculo, uma vez que a mesma é da ordem de menos de 2A.

A partir destes valores calculados, seria necessário um filtro ativo que pudesse suportar uma corrente de 569,38A. A partir de uma pesquisa realizada em [22], foi definido o conversor mostrado na Tabela 6.1 como conversor modelo a ser utilizado. Seriam necessários quatro conversores em paralelo para suprir, com margem de segurança, a compensação do sistema citado. Isso significa uma capacidade aproximadamente quatro vezes maior do que a necessária.

Tabela 6.1 Conversor Modelo

Modelo	Tensão	Corrente	Tipo de Chave	Numero de Chaves
SKiiP 603 GD172-3DUW V3	1700V	600A	IGBT	6

As simulações mostraram que uma capacitância de $9400\mu F$ pode suportar sem dificuldades uma tensão de 1.2kV entre os terminais do conversor. Uma tensão de 400V por fase, como descrito, representa um tensão máxima entre as chaves que compõem o conversor de 979.79V, ou seja, aproximadamente 1kV. Portanto o dimensionamento para um conversor de 1.7kV atende as necessidades do filtro.

6.2 – MODELO SISTÊMICO UTILIZADO

A resposta do filtro quando aplicado ao sistema teste, utilizado em seu desenvolvimento, foi muito promissora como pôde ser observado no capítulo 5. Para verificar se sua resposta seria adequada quando aplicado ao sistema real estudado, ao qual foi projetado para funcionar, foi necessário observar seu comportamento em um sistema simulado que reproduzisse o sistema de potência ao redor da SE 345kV Ibiúna.

O sistema utilizado foi o mesmo desenvolvido em [16], e é composto por todos os barramentos, linhas de transmissão e equipamentos participantes da campanha de medição [4,7]. O ponto de operação utilizado, que define os valores de tensão, fluxo de potência e carregamento, entre outros parâmetros, foi calculado a partir do caso de estudo do ONS, disponível em www.ons.org.br. Os valores de injeção harmônica

geradas nas subestações com cabos subterrâneos foram calculados em [16] e estão descritos na Tabela 6.2.

Subestação	Injeção Harmônica (A)
Bandeirante - 88kV	80
Centro - 88kV	65
Norte - 88kV	42
Miguel Reale - 88kV	25
Anhanguera - 88kV	22

Tabela 6.2 Injeção Harmônica de 5ª Ordem

O Filtro ativo, como já foi dito, foi conectado à barra de 88kV da SE Bandeirantes, como mostrado na Figura 6.4.

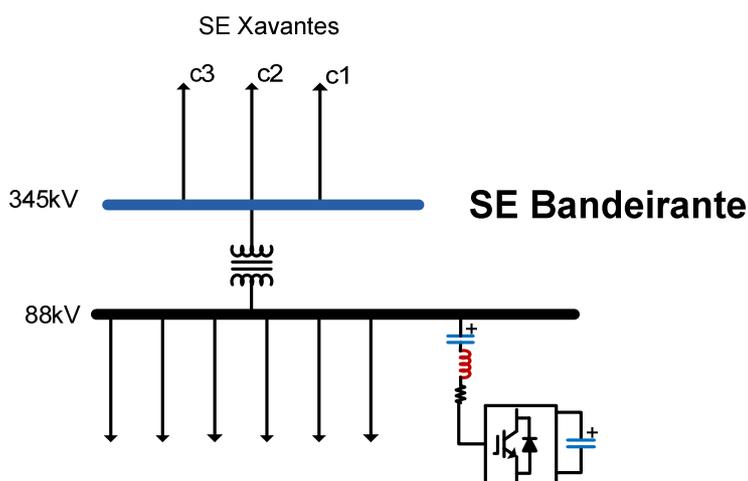


Figura 6.4 Conexão do Filtro Híbrido na SE Bandeirantes

6.3 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A simulação desse projeto foi realizada no software PSCAD. Todo o sistema teste, formado pela subestação 345kV Ibiúna e por todas as subestações no seu entorno definidos em [4,7] foram utilizados para observar a resposta do filtro híbrido frente a um sistema o mais próximo possível do real. Os valores da componente

harmônica de 5ª ordem injetados bem como o ponto de operação do sistema utilizado, explicados no item 5.4, foram parametrizados na simulação. O filtro híbrido utilizado foi configurado respeitando todos os parâmetros definidos no item 5.3. O sistema foi simulado com um passo de integração de dois microssegundos ($2\mu s$) para obter uma resposta fidedigna.

6.3.1 – DINÂMICA DO FILTRO HÍBRIDO

O comportamento do filtro após sua aplicação no novo sistema precisa ser analisado, uma vez que sua resposta pode mudar em função dos sistemas envolvidos serem não-lineares.

O primeiro ajuste necessário foi feito no ganho da corrente de compensação harmônica. Com o ganho calculado utilizado no sistema modelo (item 5.2.1), o tempo de convergência do sistema foi de aproximadamente dois segundos, como pode ser verificado pela Figura 6.5, que contém os valores de potência ativa e reativa harmônicas calculadas através da lógica de compensação harmônica.

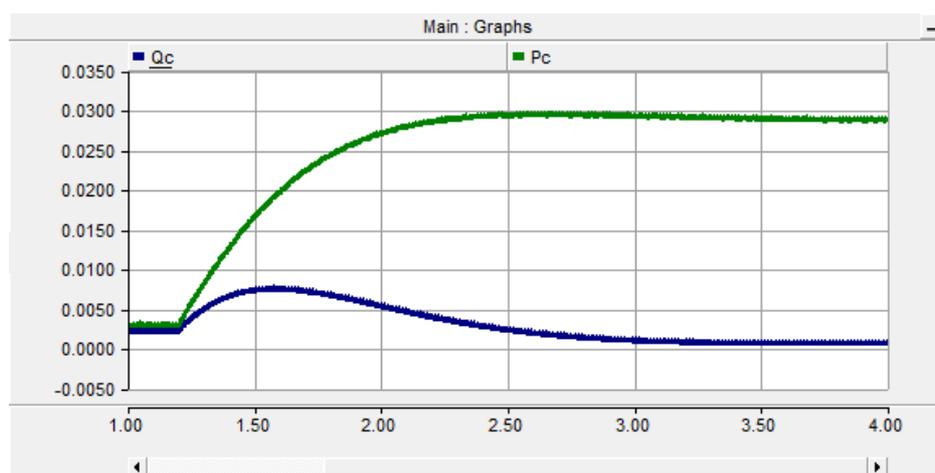


Figura 6.5 Potências Ativa e Reativa Calculadas com Ganho igual a 5

Utilizando o mesmo sistema definido no capítulo 4, foi calculado um ganho ótimo de 34 para a lógica de compensação harmônica. O sistema levou menos de

300ms para encontrar as correntes de compensação harmônicas, como pode ser verificado na Figura 6.6.

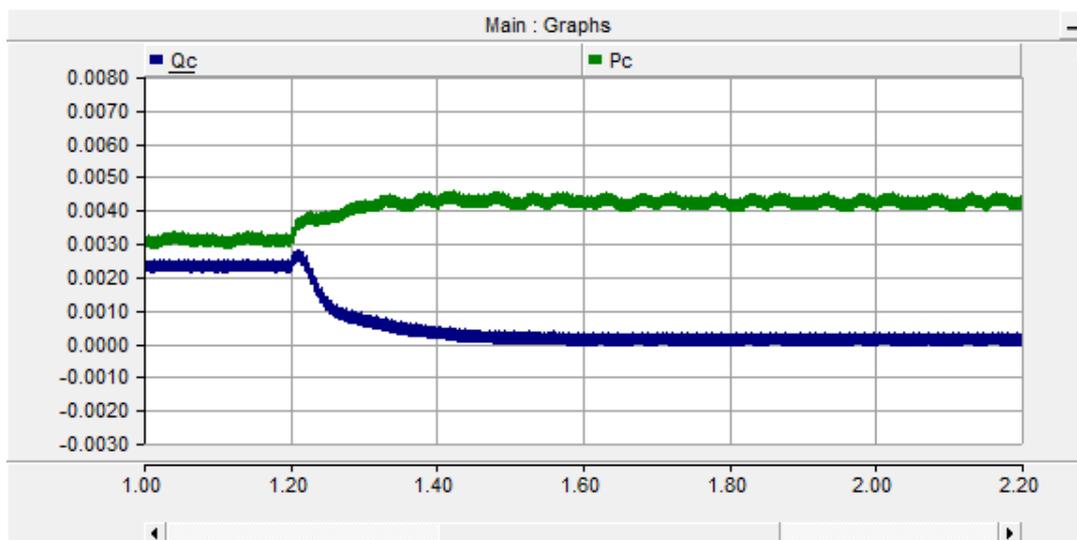


Figura 6.6 Potências Ativa e Reativa Calculadas com Ganho igual a 34

Outro componente ajustado foi o ganho do controlador PI aplicado à lógica de cálculo das componentes harmônicas. O mesmo processo descrito no item 5.2.1 foi utilizado, sendo que os valores ótimos obtidos foram 0.0005 para o ganho proporcional e 0.05 para a constante de tempo integral, como pode ser observado na Figura 6.7.

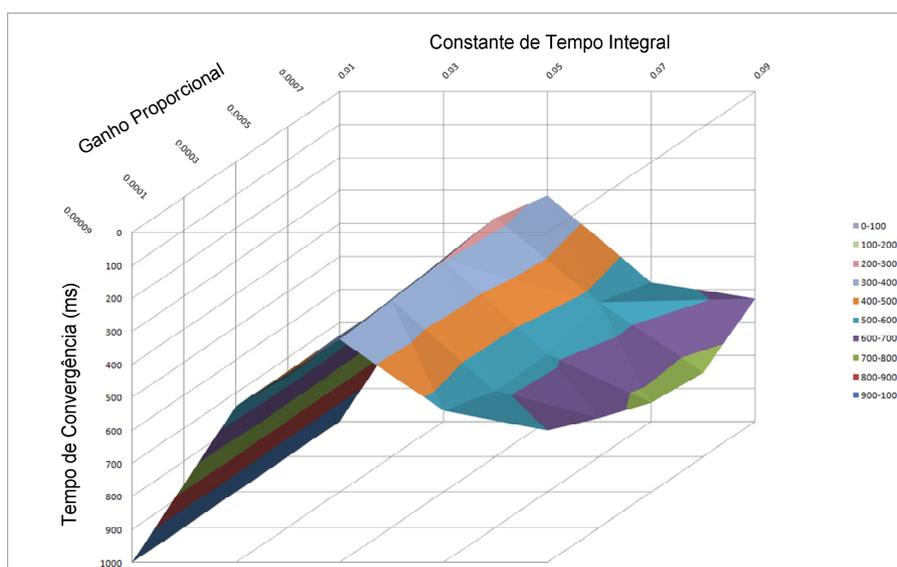


Figura 6.7 Respostas dos Ajustes do Controlador PI

A lógica de controle de tensão no capacitor permaneceu com a mesma resposta, não sendo necessária qualquer modificação.

A lógica de injeção da corrente de frequência fundamental não é dinâmica, como descrito no item 5.2.2. Ela deve ser ajustada manualmente em função dos parâmetros de tensão do barramento, definindo assim a corrente para realizar a queda de tensão necessária sobre o filtro passivo.

6.3.2 – AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO SISTEMA

O sistema utilizado nesta simulação, diferente do sistema utilizado para desenvolver o filtro híbrido, não está operando nas condições normais. A sobrecarga nas linhas de transmissão e nos transformadores, bem como o excesso de corrente harmônica, afetam as tensões nas barras do sistema.

Como o objetivo da aplicação do filtro no setor de 88kV da SE Bandeirantes é reduzir o carregamento dos filtros ZRC e ZRN, pertencentes ao setor de 345kV da SE Ibiúna, é importante mostrar, aproximadamente, as condições iniciais de tensão nas barras pertencentes ao corredor que interliga a SE Bandeirantes à SE Ibiúna, bem como o carregamento dos filtros ZRC e ZRN. Essas informações estão descritas na Tabela 6.3.

Algumas variações menos significativas foram percebidas nas outras subestações do sistema, mas para efeito de avaliação serão mostradas apenas as variáveis do corredor descrito na Tabela 6.3.

Equipamento	Condição Inicial
Bandeirante 88kV	78.7kV
Bandeirante 345kV	312.9kV
Xavantes 345kV	313.24kV
Interlagos 345kV	313.75kV
Ibiúna 345kV	315.86kV
Filtro ZRC - Fase A	88.42A
Filtro ZRN - Fase A	88.42A

Tabela 6.3 Condições Iniciais do Sistema

Essas condições de baixa tensão podem influenciar na resposta das lógicas de compensação utilizadas no filtro híbrido, como será mostrado mais a frente.

6.3.3 – RESULTADOS OBTIDOS

A resposta do filtro no sistema completo foi semelhante à resposta obtida no sistema teste, apresentado no Capítulo 5. As tensões em todas as barras que compõem o corredor que interliga a SE Bandeirantes (88kV) à SE Ibiúna (345kV) obtiveram um aumento em seu perfil de tensão. Isso ocorreu devido à injeção de Mvar produzida pela injeção de corrente fundamental, responsável por realizar a queda de tensão necessária à operação do filtro ativo. Foram injetados na barra de 88kV da SE Bandeirantes 65.2Mvar. Essa diferença em relação ao valor calculado recai sobre o baixo perfil de tensão verificado no sistema e, conseqüentemente, na barra onde se conecta o filtro. Esse valor de injeção de potência reativa pode ser verificado na Figura 6.8.

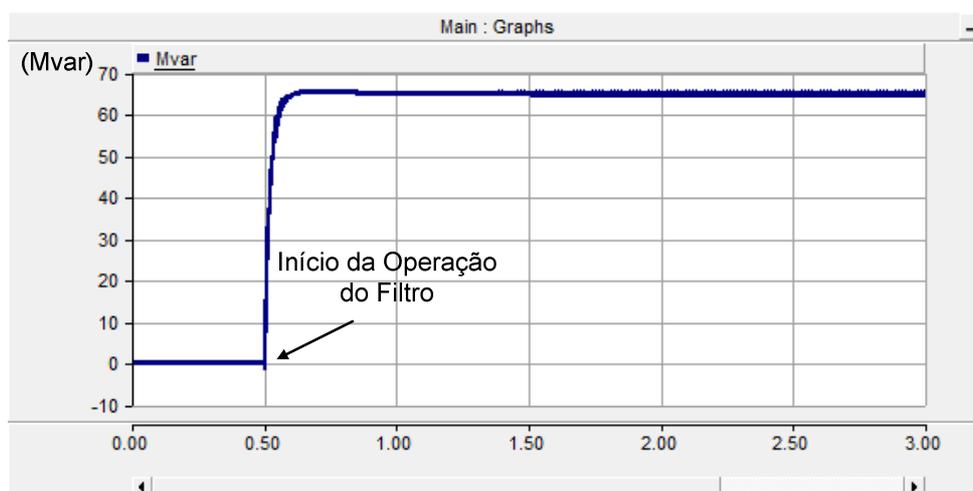


Figura 6.8 Mvar Injetado na Barra 88kV da SE Bandeirantes

Como já foi dito, essa injeção melhorou o perfil de tensão de todo o corredor que interliga a SE Bandeirantes à SE Ibiúna. Isso pode ser verificado nos gráficos a seguir.

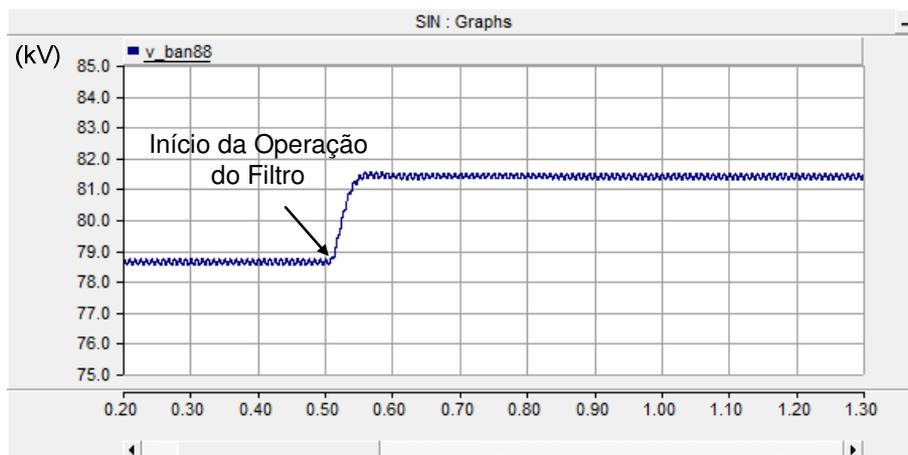


Figura 6.9 Tensão na Barra 88kV da SE Bandeirantes

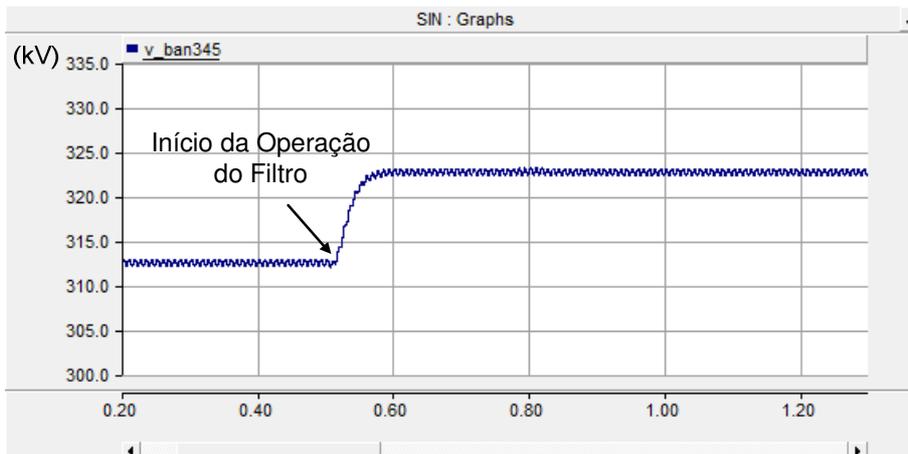


Figura 6.10 Tensão na Barra 345kV da SE Bandeirantes

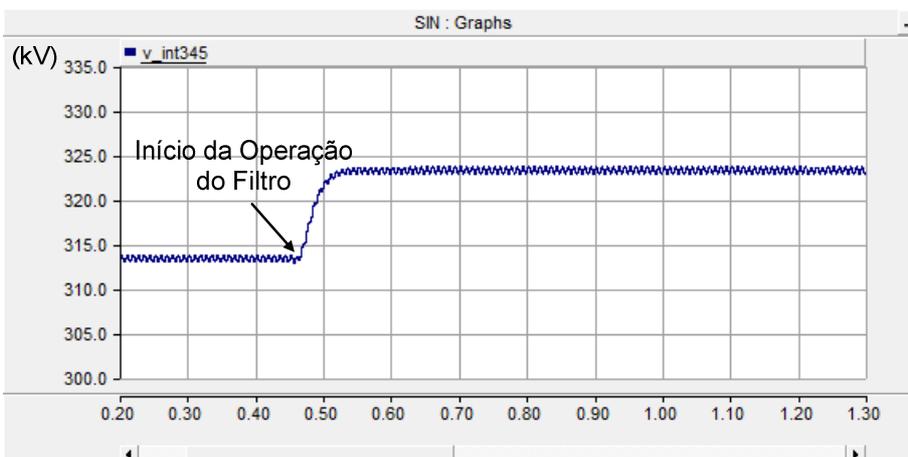


Figura 6.11 Tensão na Barra 345kV da SE Interlagos

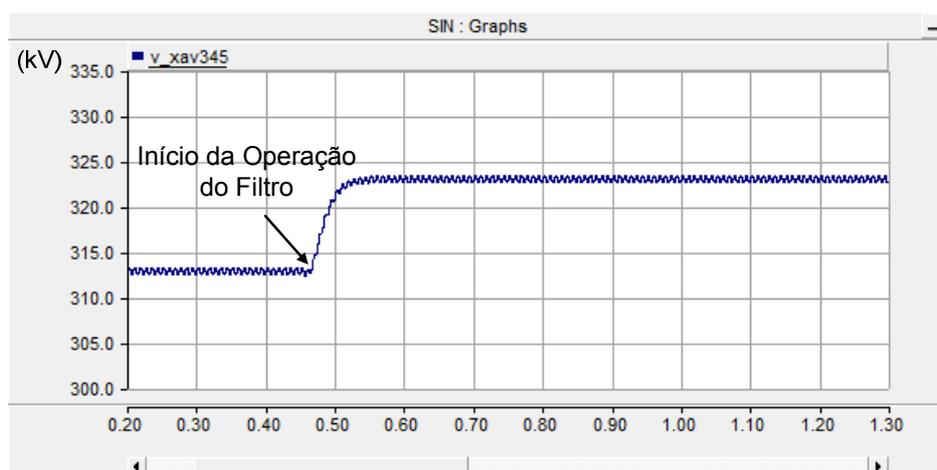


Figura 6.12 Tensão na Barra 345kV da SE Xavantes

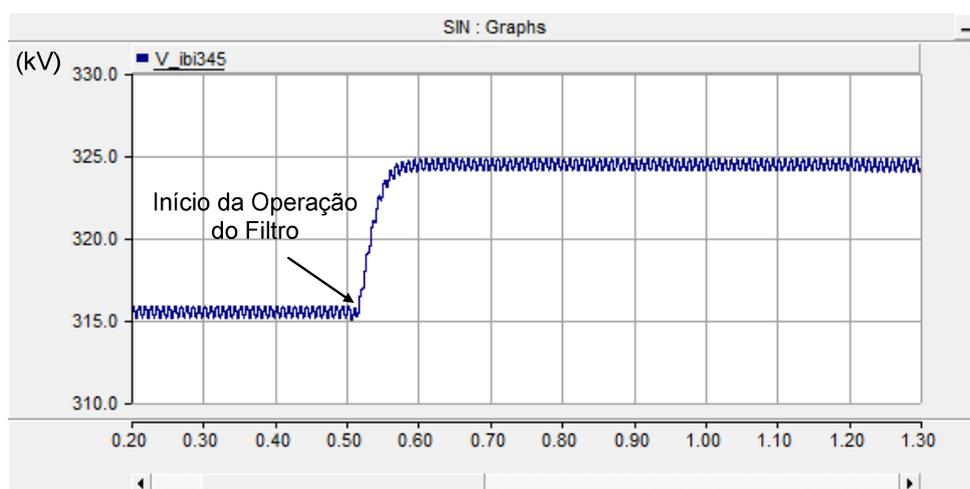


Figura 6.13 Tensão na Barra 345kV da SE Ibiúna

Pode ser observado nas Figuras 5.9 – 5.13 que ocorreu um aumento significativo no perfil de tensão de toda a área. A SE Bandeirantes (88kV) obteve uma elevação de aproximadamente 3kV e a SE Ibiúna (345kV) de aproximadamente 10kV.

Esse aumento do perfil de tensão ocorreu devido ao alívio na sobrecarga das linhas de transmissão que interligam as subestações citadas causadas pela compensação reativa mencionada.

Após a entrada da lógica de compensação harmônica do filtro híbrido, foi possível notar que o filtro calculou através da tensão e passou a compensar em torno de

105A de corrente harmônica de 5ª ordem por fase na barra da SE Bandeirantes 88kV, como pode ser verificado na Figura 6.14.

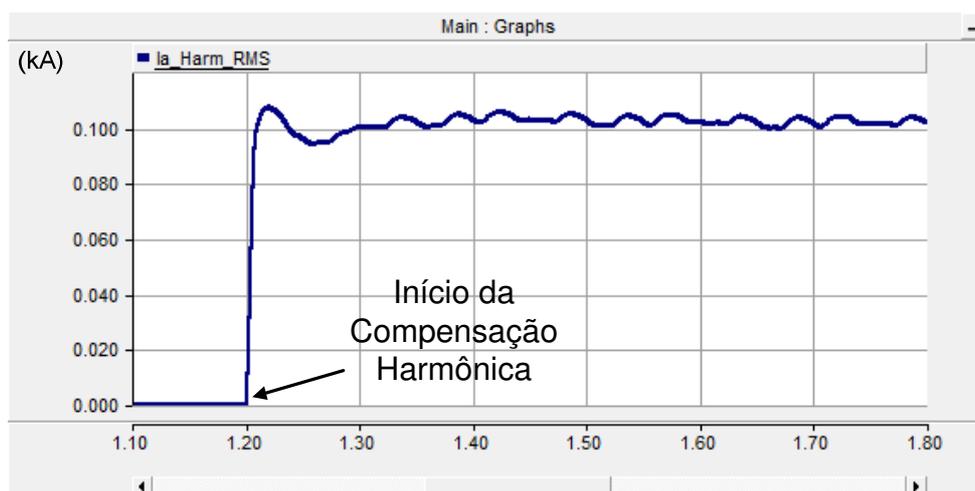


Figura 6.14 Corrente de 5ª Ordem Harmônica Absorvida Pelo Filtro Híbrido

O efeito dessa absorção de corrente harmônica refletiu diretamente na corrente harmônica que fluía da SE Bandeirantes 88kV para a distribuição. Foi verificada uma redução de aproximadamente 1.5A de corrente de 5ª ordem harmônica por fase, como pode ser visto na Figura 6.15.

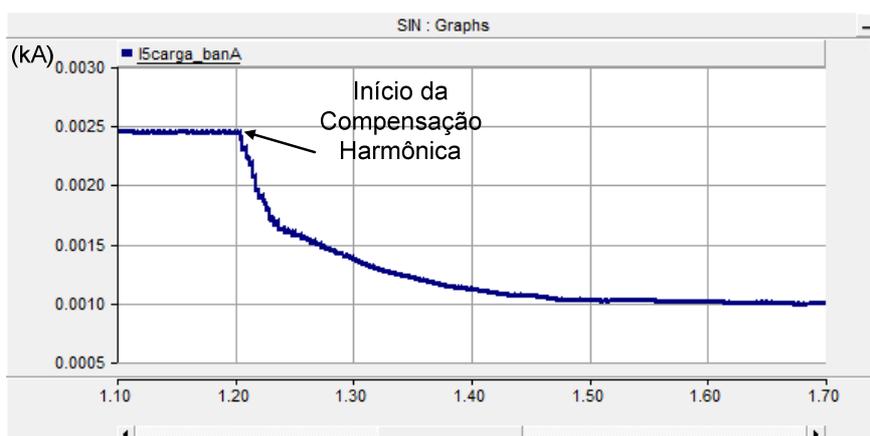


Figura 6.15 Corrente de 5ª Ordem Harmônica na Carga Conectada à SE Bandeirantes

O efeito causado pelo filtro híbrido nas linhas de transmissão que interligam a SE Bandeirantes à SE Ibiúna foi de um aumento do carregamento, em função do escoamento de corrente de 5ª ordem harmônica proveniente de outras fontes, em direção à SE Bandeirantes 88kV. Foi registrado um acréscimo de corrente de aproximadamente 7A por fase na LT Xavantes/Bandeirantes e aproximadamente 4A por fase tanto na LT Interlagos/Xavantes quanto na LT Ibiúna/Interlagos. Essas variações podem ser observadas nos gráficos a seguir.

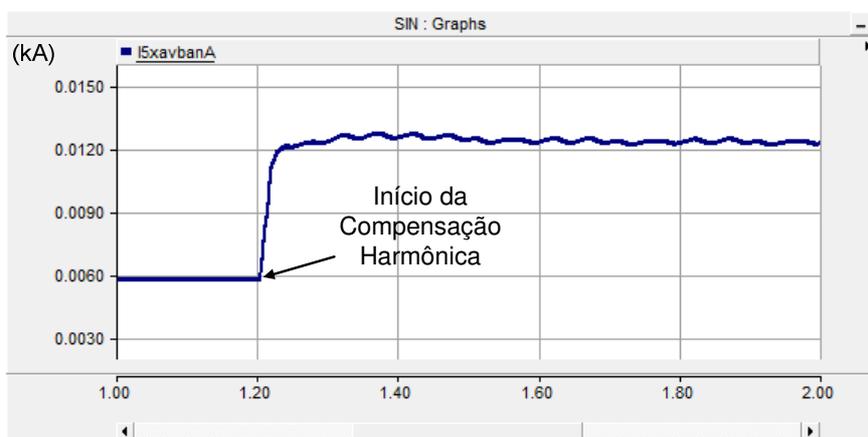


Figura 6.16 Corrente de 5ª Ordem Harmônica na LT 345kV Xavantes/Bandeirantes

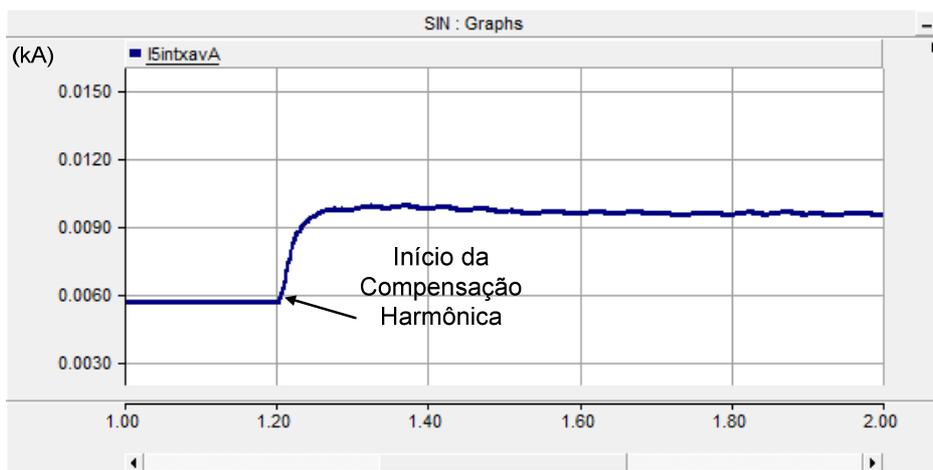


Figura 6.17 Corrente de 5ª Ordem Harmônica na LT 345kV Interlagos/Xavantes

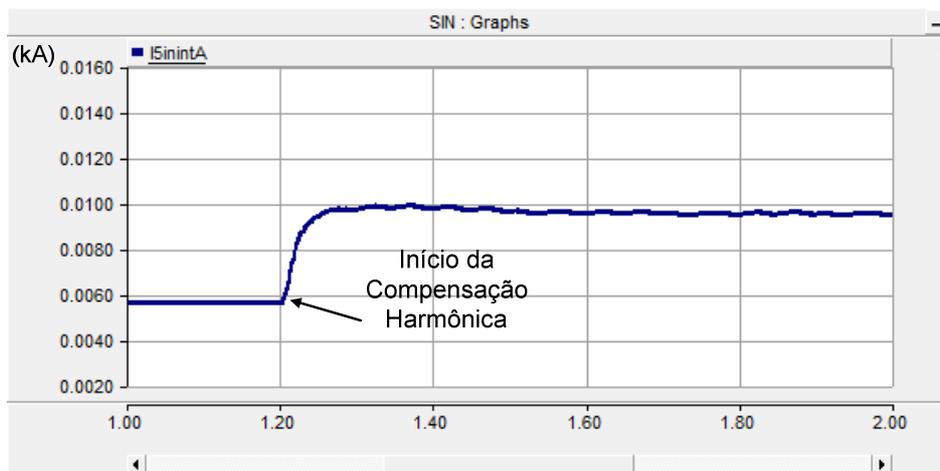


Figura 6.18 Corrente de 5ª Ordem Harmônica na LT 345kV Ibiúna/Interlagos

O filtro híbrido teve um efeito direto no carregamento dos filtros de 3ª e 5ª ordem harmônica ZRC e ZRN da SE Ibiúna. O filtro sofreu um alívio no carregamento de aproximadamente 8.5A por fase, como pode ser visto na Figura 6.19. Isso representa, para o ponto de operação observado neste caso, um alívio de 50% no carregamento de corrente de 5ª ordem harmônica por fase nos filtros ZRC e ZRN da SE Ibiúna.

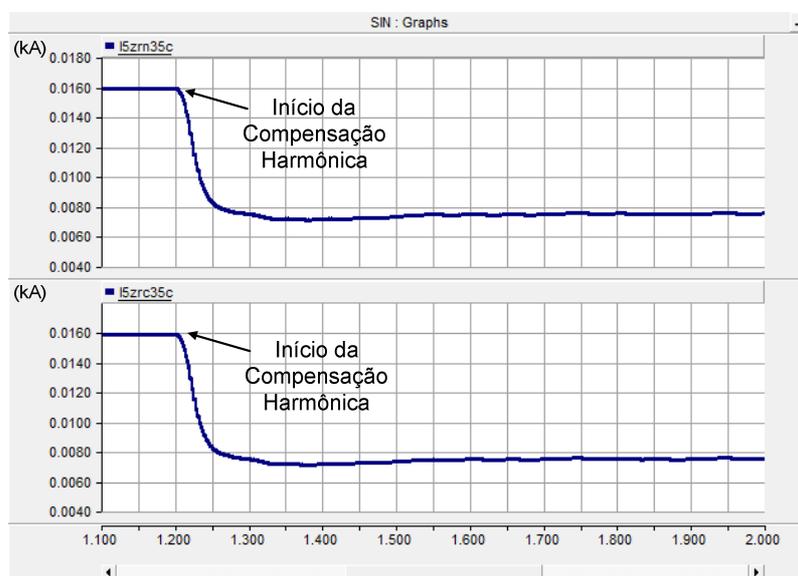


Figura 6.19 Corrente de 5ª Ordem Harmônica nos Filtros ZRC e ZRN

O alívio no carregamento dos filtros ZRC e ZRN podem ser observados, também, na forma de onda da corrente absorvida por eles, como pode ser verificado na Figura 6.20.

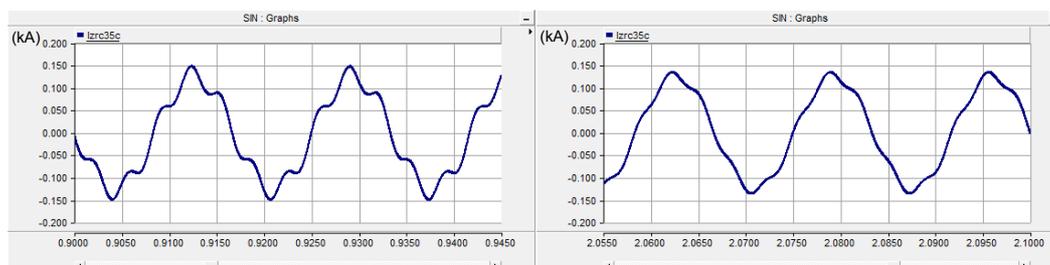


Figura 6.20 Corrente na Fase C dos Filtros ZRC e ZRN da SE Ibiúna 345kV Antes e Depois da Atuação do Filtro Híbrido

A distorção harmônica total verificada na corrente dos filtros ZRC e ZRN passou de 18.2% para 8.3%.

6.4 – CONCLUSÕES PARCIAIS

O filtro híbrido cumpriu o objetivo esperado mesmo quando submetido a um modelo reproduzindo condições sistêmicas reais. Suas lógicas de compensação tiveram o mesmo comportamento observado no sistema ideal, utilizado nos testes. A lógica de compensação do capacitor do conversor bem como seu sistema de proteção atuaram corretamente. A sobre tensão observada no capacitor no momento do início da compensação harmônica atingiu apenas 1.32kV, como pode ser observado na Figura 6.21.

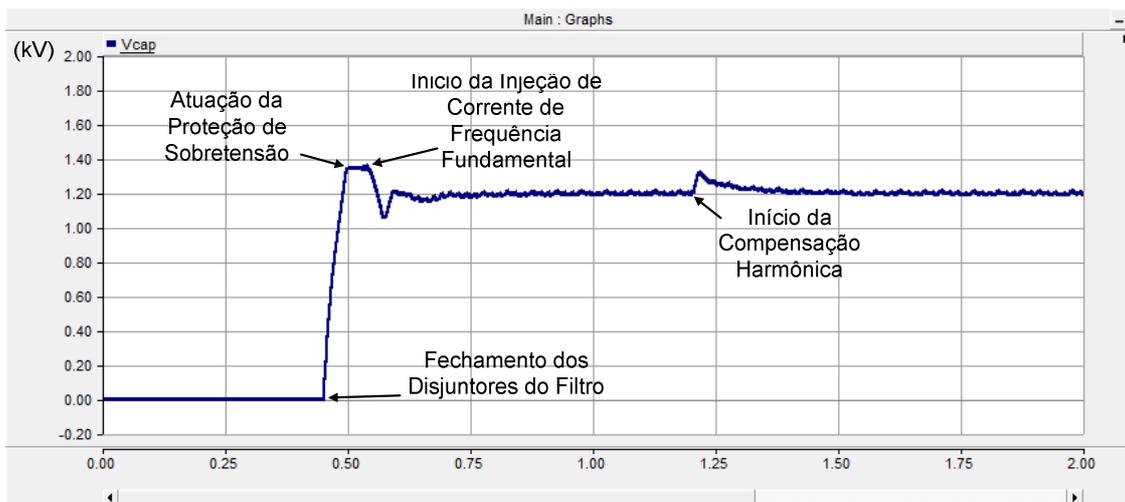


Figura 6.21 Tensão no Capacitor do Conversor

A lógica de controle de tensão do filtro ativo, baseada na injeção de corrente em frequência fundamental funcionou corretamente. A tensão verificada nos terminais do filtro ativo foi de , após a queda obtida no filtro passivo, foi menor do que o calculado em função da baixa tensão na barra de 88kV da SE Bandeirantes. Isso se deu em função da lógica utilizada para regulação da queda de tensão por injeção de corrente harmônica ser estática, ou seja, ela não se adapta à tensão da barra. As formas de onda da tensão sobre o filtro passivo e da tensão aplicada ao filtro ativo podem ser observadas nos gráficos a seguir.

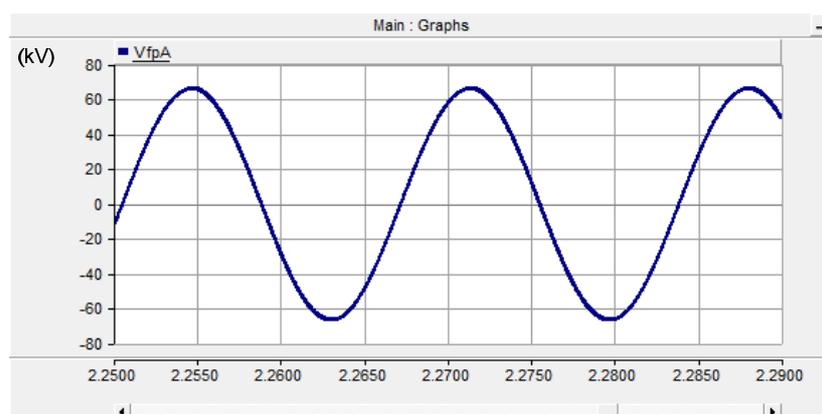


Figura 6.22 Tensão no Filtro Passivo

É possível observar na Figura 6.22 que a queda de tensão no filtro passivo é quase todo o valor de tensão, em frequência fundamental, medido na barra da SE Bandeirantes 88kV. Não se verifica componente de 5ª ordem harmônica nessa tensão pelo fato do filtro passivo ser um caminho de baixa impedância para essa componente.

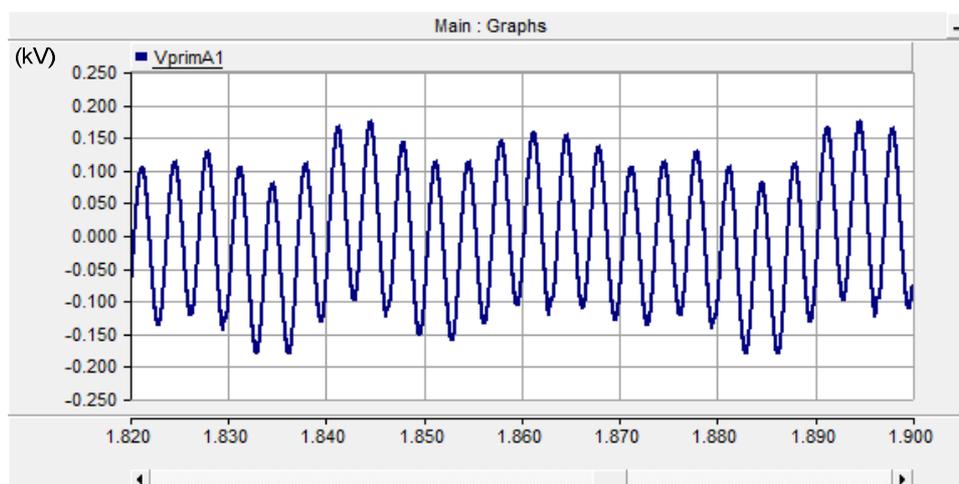


Figura 6.23 Tensão no Filtro Ativo

É possível observar na Figura 6.23 que a tensão verificada na conexão do filtro ativo tem uma grande componente de 5ª ordem harmônica e uma pequena componente de frequência fundamental, como esperado.

Não foi observado nenhum surto de corrente no filtro híbrido, como pode ser observado na Figura 6.24. O maior pico de corrente observado por fase foi de 1.2kA, muito abaixo do máximo dimensionado para o filtro, como descrito no item 6.1. Isso garante a segurança na energização do filtro, evitando assim que os dispositivos eletrônicos sejam submetidos a correntes superiores à sua capacidade, o que poderia danificar os mesmos.

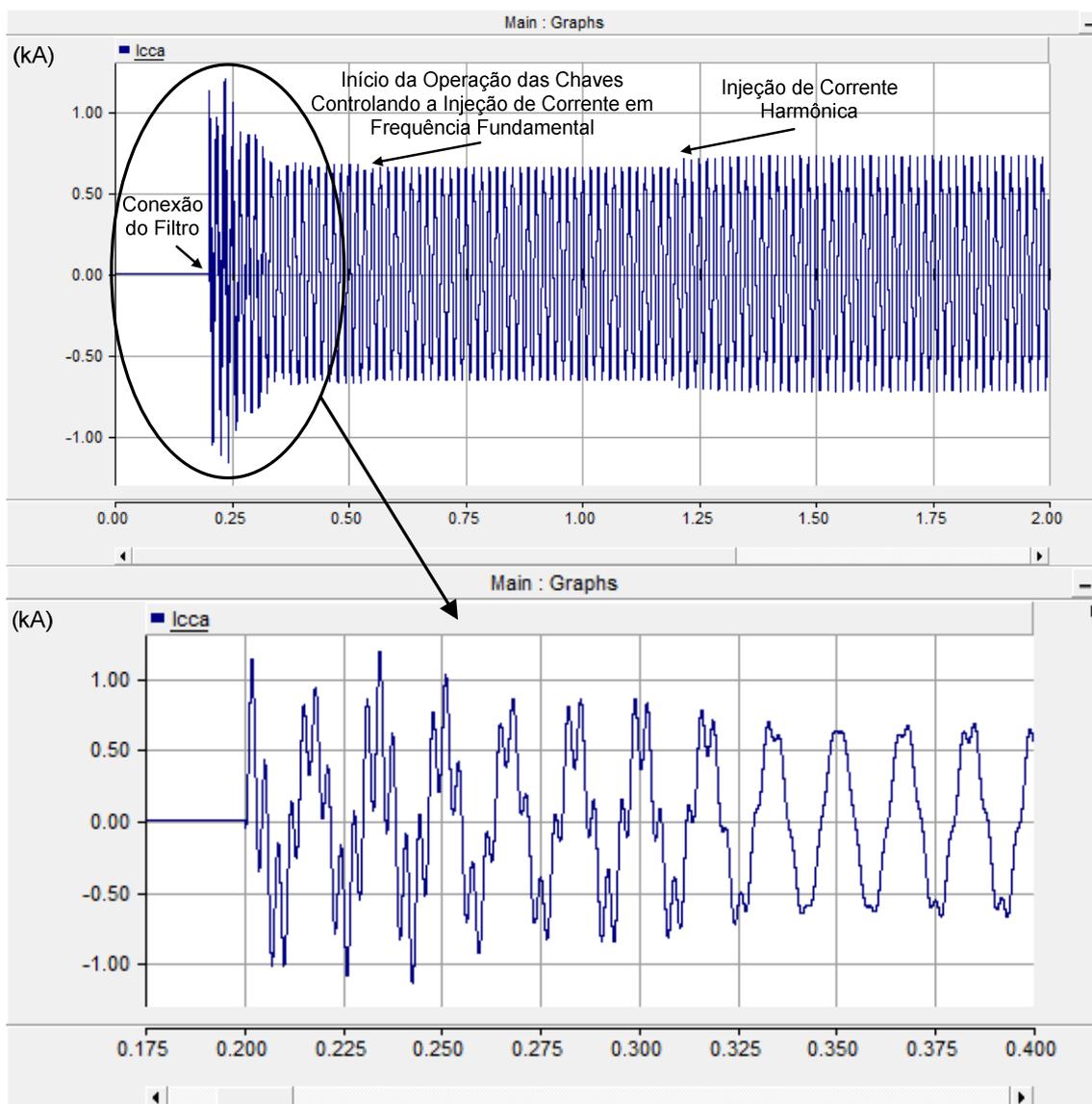


Figura 6.24 Corrente na Fase A do Filtro Híbrido

7 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados vários aspectos do desenvolvimento e aplicação de filtros em sistemas de potência. Como a motivação do trabalho partiu da necessidade real de solução do problema de sobrecarga de corrente harmônica nos filtros da subestação de 345kV da SE Ibiúna. Um dos objetivos era viabilizar não apenas uma proposta de solução do problema identificado, mas uma proposta de equipamento capaz de ser comercialmente reproduzido e aplicado em um sistema de alta tensão, como o proposto. Uma preocupação constante nos cálculos dos componentes do filtro foi o dimensionamento de seus componentes (resistência, reatância e indutância do filtro passivo e o capacitor do filtro ativo).

Após a análise do problema identificado pela campanha de medição de harmônicas no sistema de transmissão em torno da SE Ibiúna para avaliação das sobrecargas nos filtros harmônicos de 3ª e 5ª ordens [4,7] os três cabos subterrâneos, de comprimento de 6 quilômetros, que conectam a SE Bandeirantes 345kV com a SE Xavantes 345kV foram identificados como sendo os maiores responsáveis pelo efeito de amplificação de corrente harmônica de 5ª ordem. Para tentar minimizar esse efeito foi decidido conectar o filtro híbrido o mais próximo possível da fonte de harmônicos. Foi escolhido, então, o setor de 88kV da SE Bandeirantes, para minimizar as dificuldades físicas de dimensionamento impostas pela alta tensão e, conseqüentemente, o custo dos componentes do equipamento.

O filtro híbrido utilizado foi um filtro passivo em série com um filtro ativo, ambos conectados em paralelo ao sistema. Essa topologia, com a adequação dos algoritmos de controle, permitiu que a queda de tensão necessária para aplicação de um conversor convencional fosse obtida através de uma lógica de injeção de corrente de frequência fundamental no filtro passivo. Como ele foi dimensionado para ter uma alta impedância na frequência fundamental, foi possível obter uma queda de tensão com valores de corrente plausíveis para o nível de potência do filtro em questão. Com essa topologia foi desnecessária a utilização de um transformador elevador, diminuindo o custo da aplicação deste filtro em alta tensão.

Uma vez determinado o filtro, a próxima dificuldade observada foi a viabilidade da estratégia utilizada para o cálculo da componente harmônica. A subestação de Bandeirantes possui um total de 19 circuitos de conexão, entre os setores de 345kV e 88kV, o que tornaria dispendiosa, além de insegura em função do erro associado a múltiplas medições, a utilização de uma estratégia baseada na medição de correntes nos circuitos de conexão da barra. A solução adotada foi uma estratégia de cálculo de componente harmônica baseada na medição de tensão da barra e uma estratégia de chaveamento baseada na comparação entre a corrente calculada e a corrente medida apenas na conexão do filtro com o barramento.

Foi necessária, também, uma estratégia de proteção para a tensão do capacitor conectado aos terminais do conversor, uma vez que variações na componente harmônica calculada ou o transitório da entrada em operação do filtro refletiam em variações de chaveamento que poderiam causar sobretensões com a capacidade de danificar as chaves do conversor.

Com o filtro definido e seus controles ajustados, foi necessário simular sua aplicação em um sistema que reproduzisse a dinâmica do sistema real, composto por todas as barras, linhas de transmissão, transformadores, filtros e componentes de compensação reativa disponíveis, bem como os efeitos de amplificação harmônica observados nos cabos subterrâneos. Esse sistema já havia sido desenvolvido em ambiente de simulação, realizada no programa PSCAD, para desenvolvimento da tese de dissertação mencionada em [16], e foi cedida pelo autor.

A resposta observada do filtro híbrido no ambiente de simulação do sistema completo citado foi muito semelhante à resposta obtida no sistema de desenvolvimento. Foram necessárias apenas algumas alterações nos ganhos utilizados nas lógicas de controle e nos controladores PI utilizados.

Um efeito benéfico gerado pela injeção de corrente em frequência fundamental, necessária ao funcionamento do filtro, foi a de compensação de fator de potência na barra de conexão. Essa corrente injetada foi calculada de forma a estar noventa graus adiantada da tensão de referência da barra, em função da característica do filtro. Dessa forma uma corrente capacitiva foi injetada na rede, melhorando todo o perfil de tensão da região.

Como resultado da aplicação do filtro híbrido no sistema completo, foram verificados os seguintes pontos positivos:

- O filtro híbrido conseguiu reduzir significativamente a componente harmônica de 5ª ordem na tensão do barramento de 88kV da SE Bandeirantes.
- A corrente harmônica de 5ª ordem que fluía para as linhas de alimentação da distribuição, conectadas à SE Bandeirantes, diminuiu 1.5A por fase (aproximadamente 60%).
- A corrente harmônica de 5ª ordem amplificada pelos cabos subterrâneos foi praticamente toda contida pelo filtro, evitando assim sua propagação para o resto do sistema.
- As correntes de 5ª ordem harmônicas verificadas nas linhas de transmissão do corredor Bandeirantes/Xavantes/Interlagos/Ibiúna aumentaram no sentido de escoamento para a SE Bandeirantes, indicando que ocorreu a drenagem dessa corrente de vários pontos do sistema.
- O perfil de tensão foi elevado em todas as barras do sistema, devido à compensação de fator de potência realizado.
- A corrente harmônica de 5ª ordem observada nos filtros ZRC e ZRN na SE Ibiúna diminuiu de 16A para aproximadamente 7A por fase, indicando uma relação direta com a compensação realizada pelo filtro híbrido na SE Bandeirantes.

É possível considerar, então, que a aplicação de um filtro híbrido na SE Bandeirantes respondeu de forma satisfatória à solução do problema de sobrecarga harmônica verificada nos filtros de 3ª e 5ª ordem da SE Ibiúna, gerando inclusive efeitos positivos de compensação de energia reativa no sistema que foi refletido numa melhora do perfil de tensão em toda a área.

7.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do trabalho foram observadas algumas possibilidades de escolhas de topologias, estratégias de controle e sistemas de proteção para aplicação em filtros híbridos, abrangendo tópicos não abordados neste trabalho. Foi observado também a possibilidade de melhorias no modelo do filtro híbrido apresentado que não foram abordados neste trabalho por limitação de tempo.

Como melhoria do filtro híbrido, com relação à compensação de componentes harmônicas, seria possível dimensionar o filtro passivo para ser um filtro de sintonia dupla. Neste caso seriam necessárias duas estratégias de controle de correntes harmônicas em paralelo e permitiria ao filtro híbrido realizar a compensação de duas componentes harmônicas simultaneamente, sem comprometer a questão da compensação de reativo. A mesma lógica pode ser aplicada para um filtro passa alta.

Outra questão interessante a ser estudada seria uma estratégia de controle que permitisse limitar a corrente harmônica absorvida pelo conjunto do filtro híbrido. Tal estratégia teria função de evitar sobrecargas e, conseqüentemente, a saída de operação do filtro.

Uma possibilidade de melhoria do filtro híbrido apresentado neste trabalho seria um controle dinâmico da tensão no barramento, realizado pela lógica de injeção de corrente em frequência fundamental. A corrente calculada por essa lógica é dimensionada através de uma tensão de referência no barramento em que se conecta o filtro. Caso seja dimensionado um sistema adaptativo para essa lógica, seria possível regular a tensão do barramento e, conseqüentemente, variar o montante de M_{var} injetado pelo filtro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Akagi, H., “Modern Active Filters and Traditional Passive Filters”, **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, vol. 54, no. 3, 2006.
- [2] - Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., 2002, **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**, 3 ed., John Wiley & Sons Inc.
- [3] - Fujita, H., Yamasaki, T., Akagi, H., “A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 15, pp. 215-222, March 2000.
- [4] – ONS, **Resultados Relacionados à Campanha de Medição de Harmônicas no Sistema de Transmissão em Torno da SE Ibiúna para Avaliação das Sobrecargas Harmônicas nos Filtros de 3ª e 5ª Ordem Harmônicas**, Nov. 2007.
- [5] - Inzunza, R., Akagi, H., “A 6.6-kV Transformerless Shunt Hybrid Active Filter for Installation on a Power Distribution System”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 20, pp. 893-900, July 2005.
- [6] – Procedimentos de Rede do ONS, **IO-ON.ECC do Submódulo 10.22**, rev. 18 de 23 de Nov. 2009, Disponível em: www.ons.org.br, Acesso em: Mar. 2011.
- [7] – ONS, **Resultados Complementares Relacionados à Campanha de Medição de Harmônicas no Sistema de Transmissão em Torno da SE Ibiúna para Avaliação das Sobrecargas Harmônicas nos Filtros de 3ª e 5ª Ordens Harmônicas**, Mar. 2008.
- [8] - Akagi, H., Watanabe, E.H., Aredes, M., 2007, **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**, 1 ed., Wiley & Sons Inc.
- [9] - Watanabe, E.H., Stephan, R. M., Aredes, M., “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems With Generic Load”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, April, 1993.
- [10] - E.B. Makram, E.V. Subramaniam, A.A. Girgis, and R. Catoe, “Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data”, **IEEE Transactions on Industrial Applications**, vol. 29, no. 6, pp. 1176-1183, 1993.
- [11] - Simon Ostroznik, Primož Bajec, Peter Zajec, “A Study of a Hybrid Filter”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 57, no. 3, pp. 935-942, March, 2010.
- [12] - Kusko, A., “Design of Power Harmonic Filters”, **Power Quality Proceedings**, Paris, Nov. 1990.

- [13] – Upadhye, S.D., Atre, Y.R., “Determination of the Design Parameters of Passive Harmonic Filters Using Nonlinear Optimization”, **IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**, May, 1998.
- [14] - Kimbark, E. W., 1971, **Direct Current Transmission**, vol. 1, Wiley-Interscience.
- [15] – Turkay, B., “Harmonic Filter Design and Power Factor Correction in a Cement Factory”, **IEEE Power Tech Proceedings**, vol. 1, 4 pp, September, 2001.
- [16] - Lage, Fernando Ramos, 2009, **Um Filtro Ativo Para Atenuar Propagação Harmônica na Rede de Transmissão**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [17] – Routimo, M., Salo, M., Tuusa, H., “Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 22, pp. 636-643, March 2007.
- [18] - Zhang, Z., Kuang, J., Wang, X., Ooi, B.T., “Force commutated HVDC and SVC based on phase-shifted multi-converter modules”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 8, pp. 712-718, April 1993.
- [19] - Akagi, H., Srianthumrong, S., Tamai, Y., “Comparisons in Circuit Configuration and Filtering Performance Between Hybrid and Pure Shunt Active Filters”, **IAS Industry Applications Conference**, vol. 2, pp. 1195-1202, October 2003.
- [20] - Monteiro, L.F.C., Encarnação, L.F., Aredes, M., “A Novel Selective Control Algorithm for the Shunt Active Filter”, **International Power Electronics Conference - IPEC** , pp. 2288-2293, June 2010.
- [21] - Fujita, H., Watanabe, Y., Akagi, H., “Transient Analysis of a Unified Power Flow Controller and its Application to Design of the DC-link Capacitor”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 16, pp. 735-740, September 2001.
- [22] – SEMIKRON, Disponível em: www.semikron.com, Acesso em: Mar. 2011.