



**COPPE/UFRJ**

UM FILTRO ATIVO PARA ATENUAR PROPAGAÇÃO HARMÔNICA NA  
REDE DE TRANSMISSÃO

Fernando Ramos Lage

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  
Outubro de 2009

UM FILTRO ATIVO PARA ATENUAR PROPAGAÇÃO HARMÔNICA NA  
REDE DE TRANSMISSÃO

Fernando Ramos Lage

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

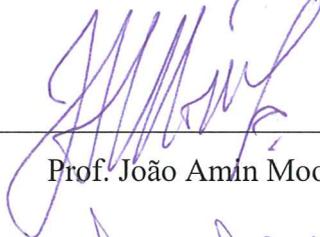
Aprovada por:



Prof. Mauricio Aredes, Dr.-Ing.



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



Prof. João Amin Moor Neto, D.Sc.



Prof. Fernando Pinhabel Marafão, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2009

Lage, Fernando Ramos

Um Filtro Ativo Para Atenuar Propagação Harmônica na Rede de Transmissão / Fernando Ramos Lage. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

IX, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Mauricio Aredes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 107-110.

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

DEDICATÓRIA  
A Deus e a meus pais.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa e minhas filhas.

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 ATIVO PARA ATENUAR PROPAGAÇÃO HARMÔNICA NA REDE DE TRANSMISSÃO

Fernando Ramos Lage

Outubro / 2009

Orientador: Mauricio Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

A adequada modelagem da rede elétrica e os resultados apresentadas pelo simulador PSCAD<sup>4.2</sup> proporcionaram o apontamento de uma possível solução para um problema grave de sobrecarga harmônica, cuja causa principal é de origem sistêmica, ou seja, com diversas origens. O fluxo da corrente harmônica é difícil de ser analisado, pois o mesmo é também dependente da topologia da rede elétrica.

A compreensão do fluxo da corrente do quinto harmônico na rede elétrica tornou possível determinar o lugar apropriado à conexão de um filtro ativo paralelo. Este filtro funciona como uma fonte de tensão com corrente controlada, cuja estratégia de controle foi definida a partir da teoria da potência instantânea, com a detecção somente da tensão da barra na qual o filtro ativo é conectado.

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

AN ACTIVE FILTER TO REDUCE HARMONIC PROPAGATION  
THROUGH TRANSMISSION SYSTEM

Fernando Ramos Lage

October / 2009

Advisor: Mauricio Aredes

Department: Electrical Engineering

The correct modeling of the electric power system and the results presented for simulator PSCAD4.2 has provided a possible solution for a serious problem of harmonic overload, whose main cause is in the system origin, in other words, from multiple origins. The analysis of the harmonic current flow is complex, because it depends on the electric system topology.

The understanding of the flow of the fifth harmonic current in the power system turned possible to determine a suitable place for the shunt active filter's connection. This shunt active filter is operates as the a voltage source with controlled current, whose strategy of control was defined from the instantaneous power theory with only the voltage detected in the bus which the active filter is connected.

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.1.1. Sobrecarga Harmônica.....	4
1.1.2. Efeito da Ressonância.....	7
1.1.3. Efeito da Amplificação do 5º Harmônico na Rede Elétrica.....	8
1.2. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	11
1.3. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	12
1.4. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	13
<b>2- ASPECTOS GERAIS DE COMPENSADORES UTILIZADOS PARA A FILTRAGEM DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTE .....</b>	<b>15</b>
2.1. FILTROS PASSIVOS.....	15
2.1.1. Projeto do Filtro Passivo.....	17
2.2. FILTRO ATIVO PARALELO.....	19
2.3. FILTROS HÍBRIDOS.....	21
2.3.1. Filtro Passivo Paralelo com Filtro Ativo.....	21
2.3.2. Filtro Passivo Paralelo e Filtro Ativo Série.....	23
2.3.3. Filtro Ativo e Passivo Paralelo.....	24
2.3.4. Filtro Ativo em Série com Equipamento de Correção de Fator de Potência.....	25
2.4. CONCLUSÕES PARCIAIS .....	25
<b>3- POSSÍVEIS ALGORÍTMOS DE CONTROLE DEFINIDOS A PARTIR DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA.....</b>	<b>28</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	28
3.2. BASE DA TEORIA $P-Q$ .....	29
3.3. APLICAÇÃO DA TEORIA $P-Q$ NA ESTRATÉGIA DE CONTROLE POTÊNCIA CONSTANTE .....	31
3.4. APLICAÇÃO DA TEORIA $P-Q$ NA ESTRATÉGIA DE CONTROLE CORRENTE SENOIDAL. ....	33
3.5. PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA TEORIA $P-Q$ PARA COMPENSAÇÃO SELETIVA DE HARMÔNICO 34	
3.5.1. Resultados de Simulação da Estratégia Utilizada.....	36
3.6. CONCLUSÕES PARCIAIS .....	39
<b>4- MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA.....</b>	<b>41</b>
4.1. OBJETIVO.....	41
4.2. MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS DA REDE DE SIMULAÇÃO.....	41
4.3. SIMULADOR UTILIZADO.....	49
4.4. ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO MODELO DE CABOS DO PSCAD <sup>TM</sup> .....	50
4.4.1. Análise Teórica do Modelo de Cabos Subterrâneos .....	51
4.4.2. Resultados Teóricos .....	52
4.4.3. Resultados de Simulação dos Cabos .....	53
4.4.4. Comparação dos Métodos Teóricos e de Simulação.....	56
<b>5- RESULTADOS OBTIDOS COM A CAMPANHA DE MEDIÇÃO E COM A REDE DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>58</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	58
5.2. OBJETIVO.....	58
5.3. CAMPANHA DE MEDIÇÃO .....	59
5.4. RESULTADOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO .....	61
5.4.1. Medições no Filtro Passivo ZRC da SE Ibiúna.....	62
5.4.2. Medições na LT 345 kV Guarulhos / Ibiúna.....	62
5.4.3. Medições na LT 345 kV Ibiúna / Tijuco Preto.....	64
5.4.4. Medições na LT 345 kV Interlagos / Ibiúna.....	65
5.4.5. Medições na LT 345 kV Interlagos / Xavantes.....	66
5.4.6. Medições na LT 345 kV Interlagos / Embu-guaçu .....	68
5.4.7. Medições na LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes .....	69

5.4.8.	<i>Conclusões Parciais</i> .....	70
5.5.	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES NA REDE ELÉTRICA .....	71
5.5.1.	<i>Objetivo</i> .....	71
5.5.2.	<i>Hipóteses Consideradas</i> .....	71
5.5.3.	<i>Ajuste do Fluxo de Potência e das Tensões nas Barras</i> .....	72
5.5.4.	<i>Ajuste da Fonte de Corrente de 5ª Harmônica</i> .....	75
5.5.5.	<i>Correntes Harmônicas ao Longo da Rede de Simulação</i> .....	77
5.5.6.	<i>Bloqueio das Fontes de 5ª Harmônica</i> .....	83
5.5.7.	<i>Conclusões Parciais</i> .....	85
<b>6-</b>	<b>CÁLCULOS RELATIVOS AO FILTRO ATIVO E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	<b>87</b>
6.1.	OBJETIVO.....	87
6.2.	CÁLCULO DO CAPACITOR DO ELO CC .....	87
6.2.1.	<i>Cálculo do Ganho G</i> .....	88
6.2.2.	<i>Cálculo do Capacitor Atenuador de Ripple</i> .....	89
6.2.3.	<i>Resultados de Simulação, Utilizando Inversor com Chaveamento PWM</i> .....	89
6.2.4.	<i>Controle da Tensão de Detecção</i> .....	91
6.2.5.	<i>Resultados após adição do controle de P5 e Q5</i> .....	93
6.2.6.	<i>Controle da Tensão no Capacitor do link CC</i> .....	94
6.3.	CONEXÃO AO SISTEMA ELÉTRICO CONSIDERADO .....	97
6.4.	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	100
<b>7-</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	<b>101</b>
7.1.	PERSPECTIVAS FUTURAS .....	105

# 1- INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, o desenvolvimento dos dispositivos semicondutores de potência proporcionou um aumento do número de equipamentos elétricos e eletrônicos que aplicam a tecnologia de conversão de energia baseada no uso de semicondutores, sejam estes controlados ou não controlados. Este avanço deu-se tanto em âmbito residencial quanto no industrial e comercial e foi determinante para a deteriorização da qualidade da energia elétrica ofertada pelas concessionárias locais.

A qualidade da energia elétrica é medida, entre outros parâmetros, pela frequência (60 Hz no Brasil) do sistema elétrico, cuja operação em regime normal deve oscilar entre  $\pm 0,04$  Hz e pelos níveis de tensão que, em regime normal, deve operar entre  $\pm 5\%$  da tensão nominal [1].

Além das grandezas mencionadas (amplitude da tensão e variação da frequência), a norma européia EN 50106 [2] determina parâmetros mínimos de qualidade de energia para os fenômenos de variação de tensão (*sag* e *swell*) de curta duração, cintilação luminosa (flickers), harmônicos e interharmônicos, interrupção e surtos. A Figura 1.1 ilustra tais fenômenos (fonte: [www.engecom.com.br](http://www.engecom.com.br)).

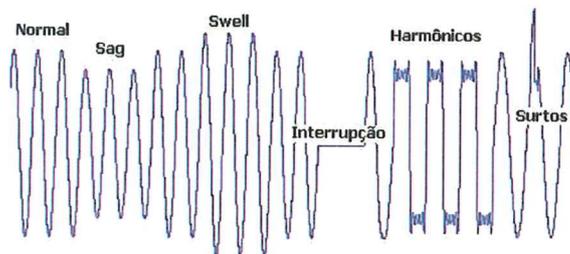


Figura 1.1 Forma de onda da tensão contendo os problemas de qualidade de energia mencionados.

Além dos problemas de qualidade de energia associados às tensões, há também problemas relacionados com o conteúdo harmônico contido nas correntes, o que resulta de distorções nas tensões do sistema. Em particular, na subestação de Ibiúna, a componente harmônica de 5º ordem contida nas correntes do sistema vêm causando problemas tanto em distorções nas tensões da rede elétrica quanto no sobrecarregamento dos filtros passivos contidos nesta subestação. Originalmente, estes filtros passivos foram projetados somente para a componente harmônica de 5ª ordem das correntes produzidas pela estação conversora, que está presente nesta subestação. Na subseção 1.1

(Identificação do problema) segue uma explanação deste problema, razão pela qual foi motivada a realização deste trabalho.

## 1.1. Identificação do Problema

Conforme mencionado anteriormente, é observado na rede elétrica da região metropolitana de São Paulo, que abrange a SE de Ibiúna, um elevado carregamento da corrente harmônica de 5ª ordem. Esta observação é possível devido à presença dos filtros passivos na SE Ibiúna, necessidade imposta pela estação conversora presente na subestação [3]. É importante comentar a rede elétrica em questão corresponde ao maior centro de carga da América Latina.

Uma série de equipamentos que utilizam a conversão de energia baseada no uso de semicondutores, sejam estes controlados ou não-controlados, tanto no segmento industrial, quanto no comercial e residencial, ocasionam injeção de correntes harmônicas na rede elétrica. Promovem distorções de corrente ao longo do sistema elétrico, sendo observado essencialmente na SE Ibiúna, onde estão localizados os filtros passivos sintonizados de 3ª e 5ª ordem de correntes harmônicas. As cargas encontradas em instalações que provocam injeção de correntes harmônicas na rede são:

✓ **Dispositivos a arco:**

Dispositivos a arco ou cargas a arco, como o forno a arco;  
Máquinas de solda;

✓ **Equipamentos de Eletrônica de Potência:**

Conversores estáticos CA/CC/CA;  
Sistemas CCAT Convencionais e CCC;  
Sistemas Ponto a Ponto e “*Back-to-Back*”;  
Reatores Controlados a Tiristores (RCT);  
Retificadores Industriais;

Os benefícios provenientes da tecnologia dos semicondutores [4] estão relacionados à redução de custo de produção, redução de peso e volume dos equipamentos presentes na indústria, redução de consumo energético, melhoria em desempenho. Porém a legislação brasileira vigente que regulamenta a fabricação e operação dos equipamentos “poluidores” e a conexão de indústrias à rede de

concessionárias distribuidoras de energia elétrica não consideram a qualidade da energia elétrica.

A presença de corrente com componentes harmônicas no sistema elétrico [5]-[6] resulta em problemas tais como interferências eletromagnéticas, disparos indevidos de relés, ruídos audíveis, aquecimento de motores, além de injeção de correntes harmônicas na rede elétrica e deformação da tensão.

O índice da distorção harmônica da corrente ( $DHT_I$ ) pode ser mensurado com base no equacionamento descrito em seguida:

$$DHT_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (1.1)$$

Onde,  $I_n$  corresponde à componente harmônica de corrente de ordem “ $n$ ”. A norma IEEE 519, de 1992 [7], ilustrada na Tabela 1.1, indica o índice de distorção de corrente máximo permitido, além da máxima intensidade de cada componente em diferentes faixas de frequência em porcentagem da fundamental.

Tabela 1.1 Amplitude máxima de harmônicas segundo norma IEEE 519.

$I_{SC}/I_L$	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	THD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20< $I_{SC}/I_L$ <50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
100< $I_{SC}/I_L$ <100	10,0	4,5	4,0	,5	0,7	12,0
100< $I_{SC}/I_L$ <1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
1000< $I_{SC}/I_L$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Algumas observações devem ser feitas sobre esta norma:

- As harmônicas pares são limitadas a 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior;
- Não é prevista a presença de corrente com componente contínua;
- O fator  $I_{SC}/I_L$  é determinado pela relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente máxima do sistema (plena carga – corrente fundamental).

Em relação ao sistema elétrico brasileiro, apenas para conexões de novos agentes na rede básica existe uma norma constante nos Procedimentos de Rede [1] do ONS homologado pela ANEEL. O Procedimento de Rede do ONS indica o nível máximo de tensão harmônica conforme ilustrado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 Valores de máximos de tensão constantes no Procedimento de Rede do ONS.

V<69 kV				V>69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)
3,5, 7	5			3,5, 7	2		
		2, 4, 6	2			2, 4, 6	1
9, 11, 13	3			9, 11, 13	1,5		
		>8	1			>8	0,5
15 a 25	2			15 a 25	1		
>27	1			>27	0,5		
DHT = 6%				DHT = 3%			

### 1.1.1. Sobrecarga Harmônica

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado pela predominância da matriz energética hidráulica, sendo a usina hidrelétrica de Itaipu responsável pelo suprimento de mais de 14 GW, o que corresponde a 21% da demanda nacional. A Figura 1.2 apresenta um diagrama unifilar simplificado do Sistema Interligado Nacional (SIN), horizonte 2009 [9].

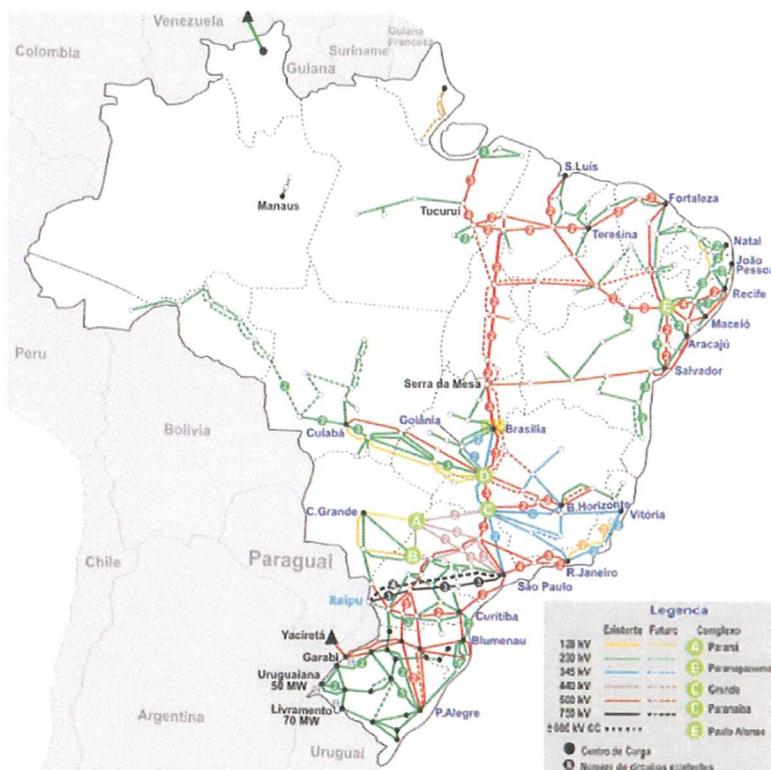


Figura 1.2 Diagrama geo-elétrico do SIN.

A energia demandada flui através do sistema de 765 kV que interliga os estados do Paraná e São Paulo e do Elo de Corrente Contínua composto de 2 bipólos de  $\pm 600$  kV. A conversão CA/CC/CA é realizada por meio de oito retificadores e oito inversores que utilizam válvulas tiristoras com controle de ângulo de disparo. Tais válvulas são compostas por pontes a tiristores de 12 pulsos e, juntamente com os transformadores de acoplamento, sistemas de resfriamento complexo, sistema de controle, formam um sistema que contém filtros no lado CC e no lado CA sintonizados para filtrar os harmônicos característicos e os não característicos [8] gerados pelos conversores.

O Elo de Corrente Contínua, o qual iniciou a operação em 1984, foi projetado, conforme mencionado anteriormente, com filtros passivos sintonizados nas frequências harmônicas característicos e não característicos. Podem ser entendidas como frequências não característicos aquelas que são formadas em função da diferença de reatância dos transformadores de acoplamento, pelo desequilíbrio de tensão entre as fases e pelo disparo assimétrico das válvulas tiristoras. Para filtrar as componentes harmônicas de corrente foram instalados, inicialmente, dois filtros de dupla sintonia para 3° e 5° harmônica. O projeto considerou a diferença da reatância entre os enrolamentos dos transformadores de mesmo tipo de conexão igual a 1 %, ou diferença da reatância entre os enrolamentos dos transformadores de diferente tipo de conexão igual a 2 %, o desequilíbrio de tensão CA ( $V_1/V_2$ ) igual a 0,5 % e  $3,35\mu\text{s}$  na assimetria do ângulo de disparo das válvulas tiristoras [1].

Originalmente, os dois filtros passivos de dupla sintonia da SE Ibiúna denominados ZRC e ZRN foram instalados de tal modo que apenas uma unidade fosse capaz de operar na sua capacidade nominal, correspondente a  $I_{\text{rms}} = 105$  A. Mesmo em condições extremas consideradas pelo projeto original, o filtro remanescente permaneceria como reserva fria, visando atender a manutenção ou desligamentos intempestivos do banco principal.

Porém ao longo dos 10 últimos anos vem sendo observado acréscimo considerável da componente harmônica de corrente [10], principalmente a de 5ª ordem nos dois filtros passivos (ZRC e ZRN) que passaram a operar, praticamente, ao longo de toda a sua existência, ligados, atendendo a demanda crescente de filtragem. Os números

contidos na Figura 1.3 representam entrada de novas obras indicando o crescimento do sistema elétrico e da demanda de energia. As barras indicam o número de ocorrências de sobrecarga harmônica ao longo dos anos.

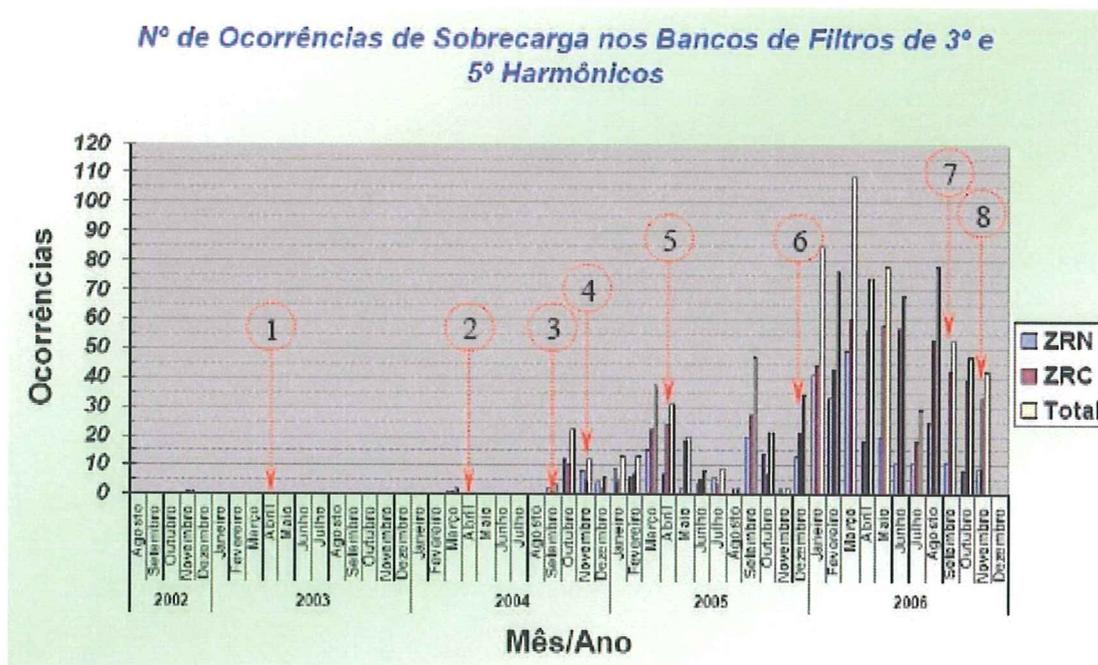


Figura 1.3 Sobrecarga nos filtros e datas de ocorrências relevantes [10].

As ocorrências destacadas na Figura 1.3 estão destacadas em seguida:

- 1 – Abril/2003 liberada para operação comercial a LT 500 kV Ibiúna / Bateias (interligação Sul / Sudeste – circuito duplo 93 km);
- 2 – Abril/2004 liberada para operação comercial o segundo circuito da Interligação Norte / Sudeste;
- 3 – Julho/2004 liberada para operação comercial o terceiro circuito da LT 345 kV Baixada / Tijuco Preto;
- 4 – Novembro /2004 liberada para operação comercial o segundo circuito da LT Cachoeira Paulista / Tijuco Preto;
- 5 – Abril /2005 conexão do consumidor livre Gerdau a rede básica de 440 kV
- 6 – Dezembro/2005 ampliação da fábrica Gerdau;
- 7 – Setembro/2006 conexão do consumidor livre CBA (Companhia Brasileira de Alumínio) a rede básica de 440 kV;
- 8 – Novembro/2006 instalados os novos bancos de filtros de dupla sintonia na SE Ibiúna.

Ainda sim, mesmo durante operação contínua, várias ocorrências de sobrecarga foram registradas, ocasionando por diversas vezes, queima do elemento indutivo dos filtros, indisponibilizando os filtros passivos para operação, limitando a ser

gerada em Itaipu para o SIN consideravelmente. Em [9] é possível consultar os limites de potência impostos a geração da usina de Itaipu em função da indisponibilidade dos filtros de dupla sintonia de 3° e 5° harmônico.

O perfil do 5° harmônico no SIN, cuja medição foi realizada nos bancos de filtros da SE Ibiúna, está mostrada na Figura 1.4. As variáveis que influenciam neste perfil, ao longo das 24 horas de um dia, ainda não estão definidas, embora seja sabido que os ângulos referentes às correntes medidas das linhas de transmissão que chegam a SE Ibiúna, descritos em [11], variam ao longo das 24 horas e o somatório vetorial dessas correntes é que definem o carregamento harmônico nos filtros.

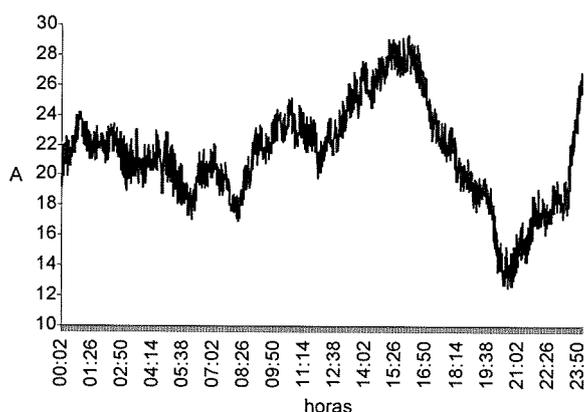


Figura 1.4 Perfil característico da componente de 5° harmônico da corrente drenada pelos filtros passivos da SE de Ibiúna.

A única relação comprovada é a redução acentuada da componente de 5° harmônico no período de ponta de carga que compreende o intervalo de 17h às 22h (tarifa horo-sazonal – THS – Resolução ANEEL nº 456). Neste período, as indústrias localizadas na grande São Paulo reduzem sua produção em função da tarifa diferenciada. A localização dos filtros passivos da SE Ibiúna representa um ponto de ressonância para a componente de 5° harmônico.

### 1.1.2. Efeito da Ressonância

Propagação harmônica, como resultado de combinação entre a indutância da linha de transmissão e os capacitores para correção de fator de potência, tem feito das tensões harmônicas uma séria preocupação no sistema de distribuição e em indústrias [15]-[16]. Medições atuais mostram que propagação harmônica ocorre frequentemente em sistema de distribuição em 6,6 kV sob condições de carga leve no período noturno

[17]-[18]. Adicionalmente, tem sido apontado, em casos particulares, que a componente de 5º harmônica de tensão na barra terminal é ampliada em 3,5 vezes em relação à outra extremidade com linha de transmissão de 17 km tendo 245 kVAr de capacitores conectados [17].

As referências acima mencionadas basearam a idéia de estudos em sistema de extra-alta tensão podendo este sistema ter o mesmo tipo de problema, principalmente, considerando o sistema elétrico brasileiro, mais precisamente na região da grande São Paulo, o qual contém inúmeras linhas de transmissão de 500, 345, 230, 138, e 88 kV curtas, longas e médias, cabos subterrâneos de 345 kV, 230 kV e 88 kV. Além disso, há bancos de capacitores conectados nessas barras que são utilizados para controle do perfil de tensão das barras de controle [9], ou para atendimento a carga, ou mesmo para correção de fator de potência. O sistema em questão abrange uma carga predominantemente industrial com demanda de, aproximadamente, 10.000 MW. A magnitude das correntes harmônicas que fluem neste sistema é considerável, e existem em função de centenas de consumidores industriais e residenciais. A injeção de correntes harmônicas provenientes desses consumidores isoladamente não traduz qualquer problema para o sistema, porém o somatório das pequenas cargas destes inúmeros consumidores preocupa a todos, principalmente a empresa Furnas Centrais Elétricas, proprietária de filtros de 3º e 5º harmônicos, o que se torna mais grave considerando a hipótese de amplificação do 5º harmônico, devido a ressonância na rede de transmissão.

### 1.1.3. Efeito da Amplificação do 5º Harmônico na Rede Elétrica

Para analisar o conceito do efeito da amplificação harmônica através de um sistema de transmissão é tomada como exemplo uma impedância equivalente de curto circuito de uma barra do sistema elétrico brasileiro, que é calculada por meio do simulador ANAFAS® (CEPEL).

A partir deste valor obtido pelo simulador, conecta-se em paralelo a esta impedância elementos armazenadores de energia, tais como capacitores e reatores, calculando através da equação (1.2) [9], as respostas a frequência do sistema.

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + \frac{1}{j\omega C}}; \quad (1.2)$$

Sendo que R representa a resistência equivalente do sistema, L a indutância equivalente do sistema e C, a capacitância variável dos elementos conectados em paralelo à indutância L. A Tabela 1.3 indica os valores das impedâncias equivalentes da barra escolhida (Tijuco Preto – barra 155 no ANAFAS).

Tabela 1.3 Impedâncias equivalentes de curto-circuito

BARRA 155	Z Seq. Positiva (%)		Z Seq. Zero (%)	
	R	X	R	X
	0,127	1,504	3,480	6,051

A Figura 1.5 mostra a resposta à frequência, realizada no MATLAB, da impedância equivalente vista da barra 155 que tem corrente de curto circuito de 9,6 kA e o quanto esta impedância varia em relação à frequência e em função do número de elementos conectados em paralelo. A escolha da variação da capacitância foi tal que representasse a potência nominal dos bancos de capacitores instalados na SE Tijuco Preto à tensão nominal de 345 kV, que é igual a 200 Mvar por banco.

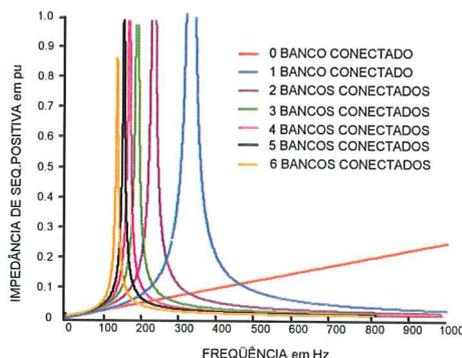


Figura 1.5 Resposta à frequência da impedância equivalente.

Uma vez observado o deslocamento do ponto de ressonância à medida que se conecta um capacitor paralelo na barra 155, avalia-se melhor a variação da impedância equivalente em função da capacitância, fixando a frequência em 300 Hz. A Figura 1.6 apresenta a variação da impedância de sequência zero em função da capacitância na barra 155.

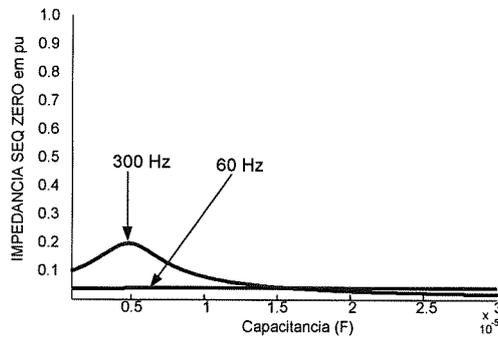


Figura 1.6 Variação da impedância de sequência zero equivalente.

Na Figura 1.7 pode-se constatar que, para a harmônica de 5<sup>a</sup> ordem, a impedância equivalente se comporta de forma variável e indica a dependência do arranjo de conexões de capacitores paralelo no sistema elétrico. Isso reforça a idéia de maior ou menor drenagem de corrente harmônica de 5<sup>a</sup> ordem de filtros passivos que, eventualmente, possam estar conectados na barra em questão. No estudo, apresentado na Figura 1.7 o intervalo que compreende a capacitância de 5  $\mu$ F a 10  $\mu$ F, que corresponde a aproximadamente de 1 a 2 bancos de capacitores paralelos de 200 Mvar conectados, indica a maior impedância na barra 155 para o 5<sup>o</sup> harmônico.

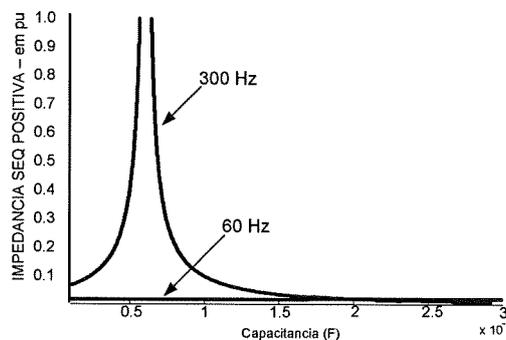


Figura 1.7 Variação da impedância de sequência positiva equivalente em função da capacitância.

É válido concluir que, a utilização de bancos de capacitores paralelos na rede elétrica, seja para correção de fator de potência, seja para controle de tensão, pode ocasionar o deslocamento do ponto de ressonância para o 5<sup>o</sup> harmônico. Essa ressonância pode ter sua localização alterada em função da quantidade e do arranjo dos bancos de capacitores. Esta conclusão servirá de referência para a continuação deste trabalho.

## 1.2. Motivação do Trabalho

Este trabalho foi motivado pelo problema sistêmico de sobrecarga harmônica nos filtros da SE Ibiúna e pela urgência de alternativas que sirvam de auxílio para a solução definitiva deste problema.

O desligamento de linhas de transmissão de 500 kV e 345 kV ainda é solução adotada para controle do carregamento harmônico nos filtros passivos da SE Ibiúna [11]-[35]. Esta alteração de topologia não é uma situação desejável no SIN (Sistema Interligado Nacional). A Figura 1.8 mostra a estatística do número de desligamento de linhas de transmissão. Estes desligamentos não programados submetem a rede elétrica a condições de risco. Por isso alguns limites de geração e fluxo são determinados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) visando reduzir estes riscos.

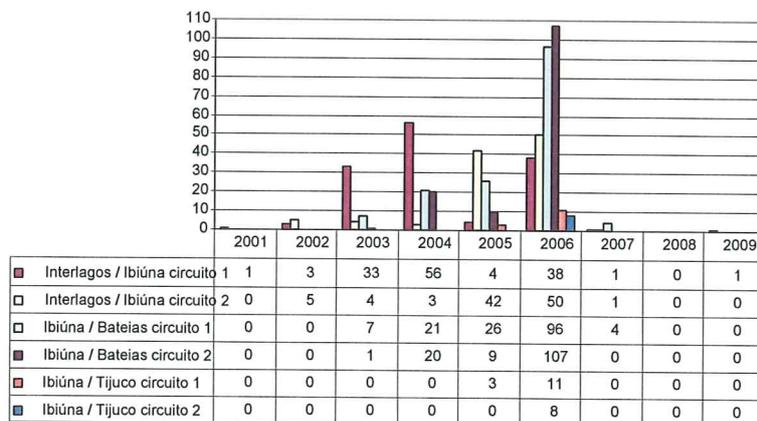


Figura 1.8 Estatística de desligamento de linhas de transmissão.

Há 2 anos foram instalados na SE Ibiúna e liberados para operação mais dois bancos de filtros passivos de sintonia de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem, visando elevar a capacidade de filtragem desta instalação. Porém, embora em menor quantidade, ainda são observadas ocorrências de sobrecarga nos filtros mais antigos. A Figura 1.9 mostra a configuração atual do setor de filtros na SE Ibiúna.

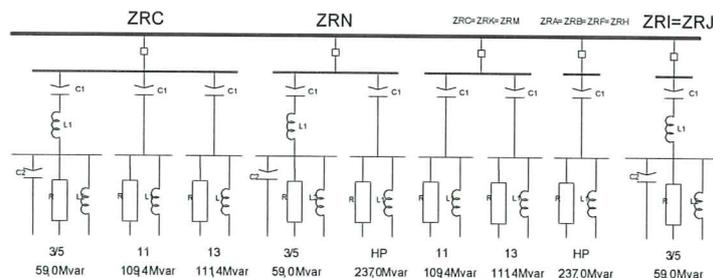


Figura 1.9 Configuração atual do setor de filtros na SE Ibiúna.

As campanhas de medição [11] as quais são mencionadas ao longo deste trabalho, também foram fatores de motivação. Os resultados destas campanhas evidenciaram o problema da propagação harmônica. Embora não conclusivo, possibilitou alternativas de solução baseadas nas medições realizadas.

Este trabalho objetiva apontar as possíveis alternativas para amenizar o problema de sobrecorrente nos filtros passivos com a utilização da eletrônica de potência, mais precisamente, com a utilização de filtro ativo paralelo.

Contudo, devido à malha da rede elétrica em questão, é inviável elaborar um algoritmo de controle para o filtro ativo paralelo com base nas correntes do sistema, uma vez que seria necessário fazer medições em diversos pontos do sistema. Desse modo, uma das motivações deste trabalho consiste em elaborar um algoritmo de controle, que permita drenar correntes harmônicas, com base nas tensões do sistema, além das medições necessárias para controlar o conversor de potência que consistem na tensão do lado CC e nas correntes produzidas pelo conversor.

### **1.3. Objetivos e Contribuições do Trabalho**

Uma vez identificado o problema foi vislumbrada a possibilidade de estudos mais aprofundados com os seguintes objetivos:

- Pesquisar e identificar as principais origens da componente harmônica de corrente de 5ª ordem que é realizado com auxílio da campanha de medição de harmônicos, em parceria entre ONS e USP, cujos resultados estão contidos no relatório produzido pelo ONS [11] e são apresentados em parte neste trabalho;
- Pesquisar e identificar os principais fluxos da corrente de 5º harmônico na rede elétrica;
- Pesquisar e identificar as principais causas de ressonância ocasionada pelo arranjo de indutâncias e capacitâncias presentes no sistema elétrico e a amplificação ou atenuação da componente harmônica de corrente de 5ª ordem ao longo do sistema de transmissão, considerando as linhas aéreas e os cabos subterrâneos;

- Pesquisar e identificar um ou mais pontos de conexão de um filtro ativo paralelo com a finalidade de bloquear o 5º harmônico naquele ponto, de tal modo que a corrente drenada pelos filtros passivos da SE Ibiúna seja reduzida.

Como contribuição, este trabalho faz uma abordagem sobre um tema, ainda sem uma literatura específica, de ocorrência de sobrecarga harmônica em equipamentos da rede de transmissão. Pesquisa a amplificação da corrente harmônica de 5ª ordem através da rede elétrica. Propõe uma solução de utilização de um filtro ativo e uma estrutura de controle adaptada às condições requeridas de filtragem seletiva com detecção apenas da tensão da barra a qual o filtro ativo paralelo está conectado.

As referências [12]-[13] indicam o estágio atual de pesquisa e desenvolvimento em arranjos e controle de filtros híbridos. Baseado nestas referências é pertinente afirmar que a estrutura de controle apresentada nesta dissertação se constitui em uma nova forma de abordagem da estratégia de controle de filtro ativo, baseado na teoria da potência instantânea.

#### **1.4. Estruturação da Dissertação**

O presente trabalho está estruturado em 7 Capítulos. A seguir um breve comentário acerca do conteúdo presente nos Capítulos restantes.

O Capítulo 2 conceitua os aspectos gerais dos compensadores utilizados para a filtragem dos componentes harmônicos de corrente. São descritos os filtros passivos, os filtros ativos, e os filtros híbridos. É mostrada uma análise comparativa entre os filtros ativos e indicado o motivo da escolha do filtro ativo apresentado neste trabalho.

O Capítulo 3 disserta sobre os possíveis algoritmos utilizados nos controles dos filtros ativos e híbridos definidos a partir da potência ativa instantânea. Apresenta também o algoritmo utilizado no controle do filtro ativo deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta as ocorrências de sobrecarga harmônica nos filtros da SE Ibiúna e detalha o sistema elétrico utilizado na simulação, chamado de rede de simulação, mostrando a modelagem de todos os equipamentos utilizados, o simulador PSCAD<sup>TM</sup>, versão 4.2, características do modelo no simulador. Procura validar o modelo de cabos subterrâneos utilizado no simulador, através de comparação com modelagens matemáticas tradicionais.

O Capítulo 5 apresenta resultados da campanha de medição de harmônicos realizada no sistema elétrico brasileiro. Estes resultados são utilizados como insumos e parâmetros para a rede de simulação. Apresenta também os registros dos resultados de simulações na rede elétrica. Conclui estabelecendo, baseado nos resultados obtidos, um ponto ótimo de localização de um filtro ativo, visando permitir que o filtro passivo trabalhe sempre em condições normais de carregamento.

O Capítulo 6, após determinado ponto ideal de conexão de um filtro ativo baseado nas simulações do capítulo 4, tem como objetivo apresentar os cálculos realizados, apresentar a estratégia de controle do filtro ativo e os resultados de simulações.

O Capítulo 7 encerra o trabalho, apresentando as conclusões finais e projeções para pesquisa e desenvolvimento futuros.

## 2- ASPECTOS GERAIS DE COMPENSADORES UTILIZADOS PARA A FILTRAGEM DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTE

Este Capítulo tem o objetivo de apresentar características gerais de alguns compensadores utilizados para a filtragem de componentes harmônicas de corrente. Os compensadores em questão consistem nos filtros passivos, nos filtros ativos e nos filtros híbridos. Em relação aos filtros passivos estão descritos aspectos relevantes dos elementos, comportamento e elaboração de um projeto. Em relação aos filtros ativos e híbridos são mostradas as suas possíveis topologias seguido do princípio de funcionamento destes compensadores.

### 2.1. Filtros Passivos

Os filtros passivos são utilizados, basicamente, para drenar componentes harmônicas de corrente nas indústrias. Porém apresentam desvantagens, tais como, alta sensibilidade dos elementos L-C [19], perda de sintonia e risco de operação em sobrecarga, devido à presença de correntes harmônicas na rede elétrica que não foram previstas para o dimensionamento do filtro passivo.

A metodologia usual para projetar filtros passivos em instalações elétricas [19] está representada na Figura 2.1, a qual ilustra a resposta em frequência tanto de um filtro ideal quanto de um filtro real. Pode-se observar que a resistência  $R_{SH}$  do conjunto em um filtro real corresponde à impedância do filtro para a frequência sintonizada. No filtro passivo ideal a resistência  $R_{SH}$  não é considerada.

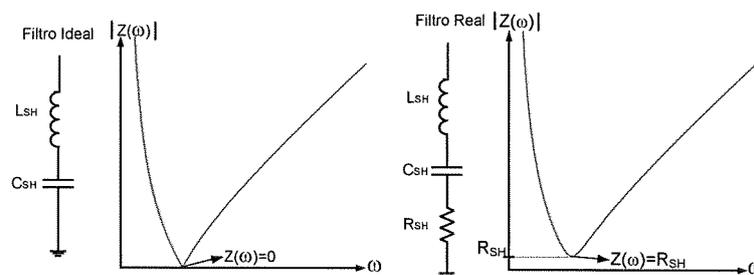


Figura 2.1 Estrutura do filtro passivo sintonizado (ideal e real) e a curva de resposta a frequência.

Conforme ilustrado na Figura 2.1, o filtro passivo ideal caracteriza-se pela associação série de um indutor com um capacitor. Com esta configuração os valores do

indutor e do capacitor são calculados de tal forma que, na frequência de ressonância ( $f_0$ ) do circuito, a impedância do filtro seja nula. Este efeito pode ser observado a partir do equacionamento apresentado em seguida. A impedância do filtro, em função de frequência angular ( $\omega$ ), é dada por:

$$Z_F(\omega) = j\left(\omega.L_{SH} - \frac{1}{\omega.C_{SH}}\right); \quad (2.1)$$

onde:

$L_{SH}$  – Valor da indutância do filtro em Henry (H)

$C_{SH}$  – Valor da capacitância do filtro em Faraday (F)

$j$  – Valor imaginário ( $\sqrt{-1}$ )

$\omega$  – frequência angular em radianos por segundo (rad/s)

$f$  – frequência em Hertz (Hz), que corresponde à  $\omega/(2\pi)$

O módulo da impedância do filtro é dado por:

$$|Z_F(\omega)| = \sqrt{\left(\omega.L_{SH} - \frac{1}{\omega.C_{SH}}\right)^2}. \quad (2.2)$$

Quando o valor do módulo da reatância indutiva for igual ao valor do módulo da reatância capacitiva, determina-se a frequência de ressonância do filtro, ou seja,  $|Z_F(\omega_0)| = 0$ . Nesta condição tem-se:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{SH}.C_{SH}}} \text{ e } f_o = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L_{SH}.C_{SH}}}. \quad (2.3)$$

Na prática, os capacitores e indutores não apresentam comportamento ideal, existindo sempre uma resistência associada ao conjunto. Como a configuração do circuito apresenta uma associação série dos elementos, a resistência equivalente do mesmo circuito também apresenta associação em série das resistências dos dois componentes. Portanto, o equacionamento do circuito, considerando a presença da resistência equivalente é dado por:

$$Z_F(\omega) = R_{SH} + j\left(\omega.L_{SH} - \frac{1}{\omega.C_{SH}}\right); \quad (2.4)$$

onde o módulo  $|Z_F(\omega)|$  e a fase ( $\phi$ ) da impedância  $Z_F(\omega)$  são dados por:

$$|Z_F(\omega)| = \sqrt{(R_{SH})^2 + \left(\omega.L_{SH} - \frac{1}{\omega.C_{SH}}\right)^2} \quad e \quad \phi = \arctg \frac{\left(\omega.L_{SH} - \frac{1}{\omega.C_{SH}}\right)}{R_{SH}}. \quad (2.5)$$

Substituindo a frequência  $\omega$  por  $\omega_0$  na equação (2.5) o valor da impedância  $Z_F(\omega_0)$  corresponde à resistência  $R_{SH}$ . Nesse sentido, pode-se concluir que quanto menor for a resistência equivalente obtida na configuração dos elementos do filtro passivo paralelo sintonizado, melhor será sua qualidade de resposta em termos de filtragem da corrente harmônica de mesma frequência.

### 2.1.1. Projeto do Filtro Passivo

Nesta subseção é apresentado o projeto do filtro passivo, de acordo com metodologia apresentada em [19]. O projeto do filtro é feito a partir da obtenção das seguintes medidas:

$I_{npico}$  – corrente de pico da harmônica  $n$  ( $n.60$  Hz).

$V_{ef}$  – tensão eficaz da barra de conexão do filtro.

$L_s$  – indutância de dispersão do transformador alimentador.

$R_s$  – resistência dos enrolamentos do transformador alimentador.

Em seguida é mostrada a metodologia para projetar um filtro passivo.

A corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ) é dada por:

$$I_{SC} = \frac{V_{eficaz}}{\sqrt{R_s^2 + (\omega.L_s)^2}}. \quad (2.6)$$

A partir do valor máximo admitido para a componente harmônica de ordem  $n$  ( $I_n$ ), é estabelecido um valor  $K_n$  que esta componente harmônica deve apresentar depois de realizada a filtragem, cuja referência é dada pela norma IEEE 519 [7]:

$$K_n = \frac{I_{npico(percentage)}}{100}. \quad (2.7)$$

O fator de qualidade  $Q$  retrata a relação entre a resistência série do circuito e o valor da indutância. Usualmente, utiliza-se este valor entre 20 e 50 [20] para projetos de filtros passivos. A determinação dos valores das componentes do filtro é dada pelas equações seguintes:

$$R_{SH} = \frac{K_n \cdot I_1}{(I_n^2 - K_n^2 \cdot I_1^2)} \left[ R_s \cdot K_n \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_1)^2 + (n \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_n^2 - (K_n \cdot I_1)^2)} \right]; \quad (2.8)$$

$$L_{SH} = \frac{R_{SH} \cdot Q}{n \cdot \omega}; \quad (2.9)$$

$$C_{SH} = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{SH}}. \quad (2.10)$$

A Figura 2.2 apresenta a resposta à frequência dos filtros com diferentes fatores de qualidade  $Q=20$  e  $Q=50$ .

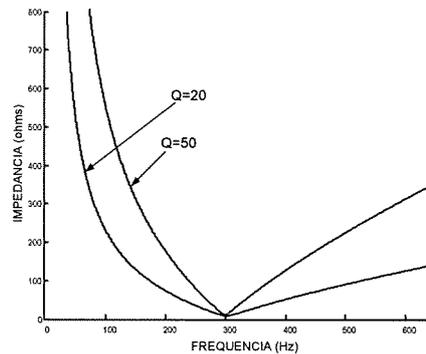


Figura 2.2 Resposta à frequência do filtro projetado para  $Q=20$  e  $Q=50$ .

Na Figura 2.3 é ilustrada a forma de onda da tensão na barra na qual o filtro passivo está conectado para  $Q=50$  e  $Q=20$ , onde se pode observar a melhor qualidade da tensão indicada pela sua forma de onda. O modelo para esta simulação considerou o filtro conectado em uma barra infinita, motivo pelo qual não se observa transitório durante o chaveamento do filtro passivo. A distorção harmônica total (DHT) para  $Q=20$  é igual a 5,51%; para  $Q=50$  igual a 8,40%, resultado que contraria as expectativas, porém pode ser explicado, provavelmente, pela diferença de amortecimento entre os dois sistemas.

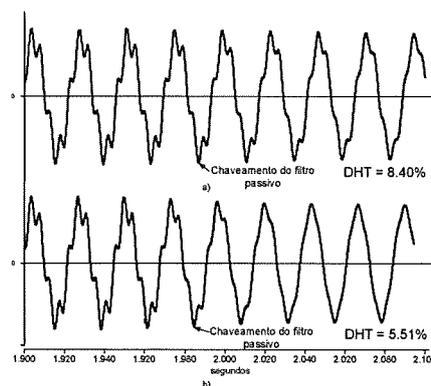


Figura 2.3 Tensão na barra a qual o filtro está conectado para a)  $Q=50$  e b)  $Q=20$ .

Conforme a metodologia apresentada, pode-se verificar a simplicidade para projetar filtros passivos. Além disso, em relação aos filtros ativos e híbridos, o custo de instalação e manutenção de um filtro passivo também é menor. Porém, o risco de perda de sintonia devido à queima dos elementos capacitivos e o risco da ressonância paralela da capacitância com a indutância da rede elétrica [20] podem trazer consequências danosas à rede elétrica. Nesse sentido, o filtro ativo paralelo passa a ser uma alternativa para compensação de componentes harmônicas de correntes, os quais são apresentados em sequência.

## 2.2. Filtro Ativo Paralelo

Nesta subseção é apresentado filtro ativo paralelo, cujo um dos objetivos é compensar as componentes harmônicas de corrente consumidas por uma carga não linear. Contudo, ao contrário dos filtros passivos, o filtro ativo tem a capacidade de realizar a filtragem de modo controlado. Estudos relacionados a filtros ativos vêm sendo realizados há mais de 20 anos [22]-[24]. Basicamente, o filtro ativo paralelo é um equipamento que produz correntes controladas de modo a compensar o conteúdo harmônico contido na corrente consumida pela carga.

Os filtros ativos são compostos por um circuito de potência e um sistema de controle. O circuito de potência é formado pelo transformador de acoplamento, inversor de potência que pode ser do tipo fonte de tensão (utilizado com maior frequência) ou fonte de corrente e, os filtros passivos utilizados para atenuar as componentes harmônicas de frequência elevada contidas nas correntes produzidas pelo inversor. O sistema de controle é composto de circuitos para medição e condicionamento das grandezas elétricas envolvidas (tensões e correntes), e por um microcontrolador do tipo DSP (*Digital Signal Processor*).

Os filtros ativos podem servir a consumidores individuais, visando filtrar as componentes harmônicas produzidas em suas instalações ou a concessionária de energia elétrica, em subestações ou alimentadores. É apresentado na Figura 2.4 um exemplo de filtro ativo conectado em paralelo com a rede elétrica. Observa-se que o retificador a tiristor consome uma corrente  $I_L$  com componentes harmônicas. Com o filtro ativo desligado a corrente do sistema ( $I_S$ ) é igual a corrente da carga ( $I_L$ ). Como o filtro ativo

ligado, o conversor de potência passa a produzir uma corrente controlada  $I_C$ , de modo que a corrente  $I_S$  não contenha mais as componentes harmônicas contidas na corrente  $I_L$ .

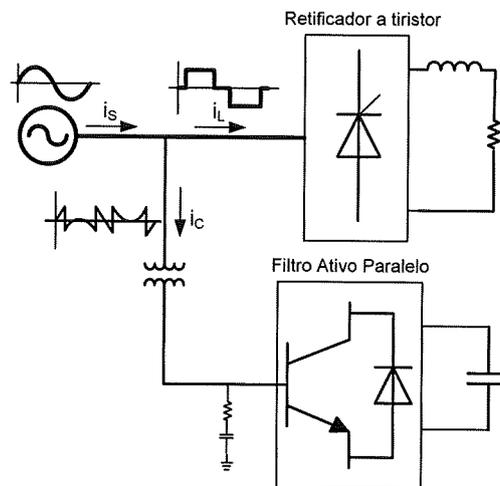


Figura 2.4 Rede elétrica com o filtro ativo paralelo conectado.

A Figura 2.5 apresenta o princípio de compensação da corrente no filtro passivo paralelo. A corrente da carga está dividida na componente fundamental ( $I_{LF}$ ) e harmônica ( $I_{Lh}$ ), e as correntes do filtro ativo e do sistema correspondem a  $I_C$  e  $I_S$ , respectivamente. A impedância da rede elétrica corresponde a  $X_L$  e a impedância da carga está representada por  $Z_L$ . Por fim,  $V_S$  corresponde à tensão do sistema e  $V_L$  a tensão da carga.

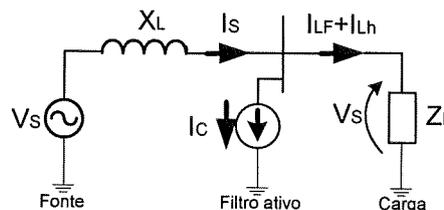


Figura 2.5 Princípio da compensação de corrente pelo filtro ativo.

Considerando para o filtro ativo desligado, as correntes da carga e do sistema podem ser correlacionadas conforme descrito na equação (2.11)

$$I_S = I_{LF} + I_{LH}; \quad (2.11)$$

e, a tensão da fonte pode ser descrita por:

$$V_S = X_L (I_{LF} + I_{LH}) + Z_L (I_{LF} + I_{LH}) \quad (2.12)$$

Com o filtro ativo paralelo desligado a corrente  $I_{LH}$  passando através de  $X_L$  provoca queda de tensão  $V_{Sh}$ . Analogamente a corrente  $I_{LH}$  através da impedância  $Z_L$  ocasiona a queda de tensão  $V_{Sh}$ . A tensão  $V_S$  será composta pela equação:

$$V_S = (V_{SF} + V_{SH}) + (V_{SF} + V_{SH}), \quad (2.13)$$

sendo  $V_{SF}$  e  $V_{SH}$  as quedas de tensão provocadas pela corrente fundamental  $I_{SF}$  e  $I_{LF}$ , respectivamente.

Ao ligar o filtro, a corrente de compensação  $I_C$  produzida pelo filtro ativo paralelo passa a suprir a componente harmônica consumida pela carga e eliminando  $I_{SH}$ . Com isso, a queda de tensão ocasionada por  $I_{SH}$ , que está representada na equação (2.13) por  $V_{SH}$ , não mais existe, tornando  $V_S$  senoidal sem componentes harmônicas de tensão.

Com isso, fica evidenciado que ao filtrar a corrente do sistema, a distorção harmônica contida na tensão  $V_S$  é compensada. Esta estrutura, apesar de ter a capacidade de compensar o conteúdo harmônico de modo controlado, tem limitações quanto a sua aplicabilidade. De fato, a conexão do filtro ativo paralelo na rede elétrica pode ser inviabilizada pela elevada tensão e níveis de potência desta rede. A utilização de filtros híbridos pode ser a solução para este tipo de problema e são apresentadas na próxima seção.

## 2.3. Filtros Híbridos

Os filtros híbridos consistem na combinação de filtros ativos com filtros passivos em diferentes tipos de arranjo série / paralelo [21] para compensação de componentes harmônicas de corrente e compensadores para cargas desequilibradas [25]. Na literatura podem ser observadas propostas de filtragem híbrida [22] para solução isolada de determinado filtro passivo quando o mesmo está submetido à sobrecarga. Esta seção apresenta algumas combinações de filtros ativos e passivos e suas principais características.

### 2.3.1. Filtro Passivo Paralelo com Filtro Ativo

Esta topologia consiste de um filtro ativo conectado em série ao filtro passivo, e tem como uma das finalidades bloquear o excedente da corrente harmônica proveniente da rede externa que flui pelo filtro passivo. Este tipo de arranjo possibilita melhoria do desempenho do filtro passivo quando o mesmo não estiver operando em sobrecarga [26]. A Figura 2.6 mostra de forma esquemática uma possível topologia deste filtro híbrido.

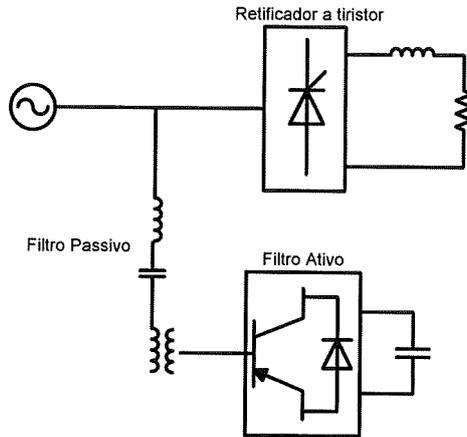


Figura 2.6 Filtro passivo paralelo e filtro ativo.

Em [26] é apresentada uma proposta de um filtro híbrido para solução de sobrecarga harmônica que flui pelos filtros passivos da SE Ibiúna. Neste caso, o filtro ativo trabalha em duas distintas situações. Quando o filtro passivo drena corrente ( $I_{Fh}$ ) com valor abaixo da nominal, o filtro ativo se comporta como uma resistência negativa, gerando tensão em oposição de fase com a corrente detectada. Isto elimina a resistência ( $R_F$ ) do filtro passivo e melhora seu fator de qualidade. Ao contrário, quando o filtro passivo drena corrente ( $I_{Fh}$ ) com valor acima da nominal, o filtro ativo produz uma tensão proporcional em fase com a corrente de 5ª harmônica detectada ( $V_F$ ), aumentando a resistência ( $R_F$ ) do filtro passivo. Um esquema simplificado é mostrado na Figura 2.7.

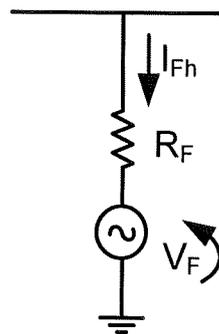


Figura 2.7 Modelo do filtro híbrido.

As vantagens desta topologia são:

- A tensão do lado CC do conversor pode ser reduzida;
- Menor potência do filtro ativo;
- Possibilidade de conexão do filtro em sistemas de média tensão.

### 2.3.2. Filtro Passivo Paralelo e Filtro Ativo Série

A Figura 2.8 mostra outra alternativa de combinação entre um filtro ativo e filtro passivo [27]. Consta de um sistema combinado de um filtro passivo com filtro ativo de baixa potência, o qual é conectado em série com a rede elétrica. O filtro ativo tem como função a isolação ou bloqueio de correntes harmônicas, aumentando o desempenho total do filtro passivo e, com isso, atuando como uma resistência para as componentes harmônicas de corrente que fluem pelo sistema. Como consequência, as componentes harmônicas ficam “confinadas” ao sistema composto pela carga e filtro passivo. O filtro passivo drena a corrente harmônica consumida pela carga, considerando que o filtro ativo melhora as características de filtragem do filtro passivo. Já existe aplicabilidade em filtros passivos, porém há dificuldades de proteção de sobrecorrente do filtro ativo. Conforme descrito em [27], nesta topologia o filtro ativo série tem a capacidade de prover um aumento da estabilidade da rede elétrica ao minimizar possíveis ressonâncias que possam ocorrer entre o filtro passivo com a impedância da rede elétrica.

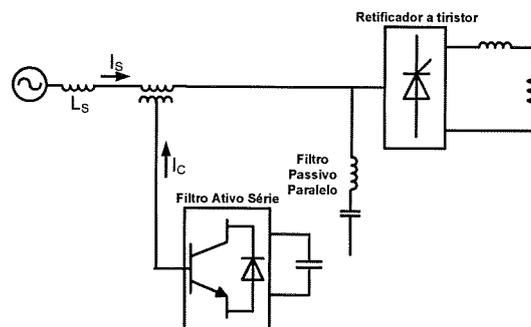


Figura 2.8 Filtro passivo paralelo e filtro ativo série.

A partir de simulações realizadas em [22], exemplifica-se na Figura 2.9 como os filtros passivos podem ocasionar efeito de ressonância com indutância da rede elétrica e amplificar a corrente harmônica através desta rede.

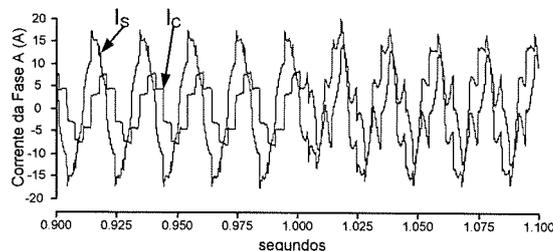


Figura 2.9 Forma de onda da corrente  $I_s$  e  $I_c$ .

Até  $t = 1$  s o filtro ativo está ligado bloqueando parte das componentes harmônicas de corrente consumidas pela carga uma vez que a distorção da corrente é compensada pela corrente  $I_C$ . Em  $t = 1$  s o filtro é desligado e pode-se observar a alteração da forma de onda da corrente  $I_S$  e sua qualidade deteriorada, ocasionada pela ressonância entre o filtro passivo e a indutância da rede elétrica representada por  $L_S$ .

### 2.3.3. Filtro Ativo e Passivo Paralelo

O filtro ativo híbrido mostrado na Figura 2.10 apresenta uma topologia diferente da anterior. O filtro passivo é conectado em paralelo ao filtro ativo. O conjunto filtro passivo / filtro ativo é conectado em paralelo à rede. Esta topologia opera de modo combinado, possibilitando diferentes alternativas para compensação das correntes. Os filtros ativos e passivos podem atuar na compensação da mesma componente harmônica de corrente ou de componentes harmônicas diferentes.

Um exemplo de aplicação poderia ser a compensação da componente harmônica de alta amplitude pelo filtro ativo, até o 13º harmônico. O filtro passivo poderia ser projetado como um filtro do tipo passa-altas, drenando harmônicos de maior ordem, porém de menor amplitude.

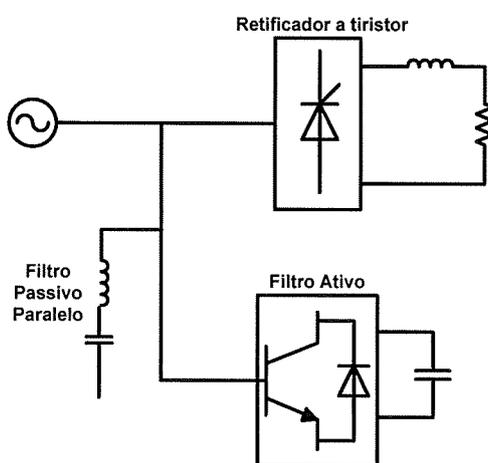


Figura 2.10 Combinação do filtro ativo paralelo e filtro passivo paralelo.

### 2.3.4. Filtro Ativo em Série com Equipamento de Correção de Fator de Potência

A topologia apresentada em [28] representa a combinação de um filtro ativo série e um capacitor paralelo. O capacitor da Figura 2.11 é utilizado para correção de fator de potência.

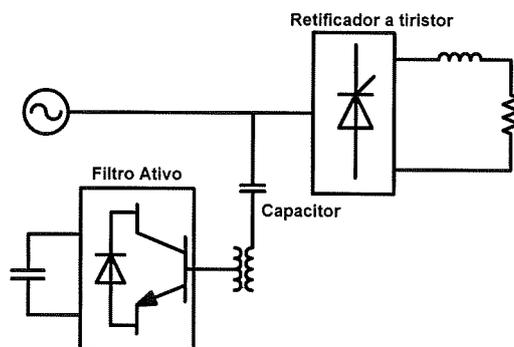


Figura 2.11 Combinação do filtro ativo em série e um capacitor paralelo.

A conexão do enrolamento secundário do transformador ao capacitor cria um filtro sintonizado, cuja frequência harmônica dependerá da indutância do transformador. O filtro ativo é conectado em série ao circuito do capacitor através do enrolamento primário do transformador. A função do filtro é proteger o capacitor da sobrecorrentes harmônicas por ele drenada.

Esta topologia também apresentada em [29] sugere sua utilização para filtragem seletiva de harmônicos, tendo como carga um retificador de 12 pulsos, cujas componentes harmônicas de corrente produzidas de maior amplitude são de 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. Porém componentes harmônicas não características de corrente de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem podem estar presentes decorrentes de ressonâncias séries e paralelas entre o filtro passivo e a rede elétrica. Para esta filtragem é proposto um filtro ativo conectado em paralelo com a carga através de um filtro passivo formado pelo capacitor de correção de fator de potência e o transformador de acoplamento do filtro ativo.

## 2.4. Conclusões Parciais

Em [21], é feita uma análise comparativa da aplicabilidade e das características dos três filtros híbridos apresentados na seção anterior. Esta comparação é simplificada

na Tabela 2.1 e evidencia a diferença entre os filtros ativos em relação aos filtros passivo.

Tabela 2.1 Comparação entre os filtros híbridos

	Filtro ativo série conectado em série com o filtro passivo	Filtro ativo série e filtro passivo em derivação	Filtro ativo em derivação e filtro passivo em derivação
Configuração do sistema	Figura 2.6	Figura 2.8	Figura 2.10
<b>Sistema de potência do filtro ativo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversor PWM fonte de tensão sem retroalimentação de corrente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversor PWM fonte de tensão com retroalimentação de corrente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversor PWM fonte de tensão com retroalimentação de corrente</li> </ul>
<b>Função do filtro ativo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boqueio com compensação de componentes harmônicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boqueio e isolamento de componentes harmônicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boqueio com compensação de componentes harmônicas</li> </ul>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Já existem aplicações de filtro passivo</li> <li>• Facil proteção do filtro ativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Já existem aplicações de filtro passivo</li> <li>• Nenhuma corrente harmônica flui através do filtro ativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicação geral de filtro ativo em derivação</li> <li>• Controle de Potência reativa</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nenhum controle de potência reativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil proteção do filtro ativo contra sobrecorrentes</li> <li>• Nenhum controle de potência reativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compensação parcial no domínio da frequência entre o filtro ativo e o filtro passivo</li> </ul>

O filtro passivo é um equipamento utilizado em sistema de potência para diversas finalidades, como por exemplo, para controle do fator de potência em instalações residenciais, comerciais e industriais, redução de perdas na transmissão e na subtransmissão e para controle de tensão na rede de transmissão. Entretanto, o filtro passivo tem como desvantagem perda de sintonia, elevado transitório no instante que é conectado e pode provocar ressonância com a indutância da rede.

Em [30] é apresentada comparação entre o filtro ativo paralelo e o filtro híbrido. Na experiência foi utilizado um filtro ativo paralelo e um filtro híbrido para funções semelhantes de drenar componentes harmônicas de corrente de uma carga não linear. O filtro híbrido apresentou melhor desempenho. A seguir são apresentadas as características do desempenho do filtro híbrido em relação ao filtro ativo em valores aproximados:

- Tensão no capacitor CC - 7 vezes menor;
- Potência no Inversor - 8 vezes menor;
- Baixo ripple de chaveamento;
- Menor volume;
- Sem controle de potência reativa.

Como observado na seção 2.2.1 comparativamente ao filtro ativo, o projeto de um filtro passivo é mais simples de ser realizado. As variáveis consideradas são poucas,

mas deve-se levar em consideração a potência de curto-circuito na barra a qual será conectado e sua sintonia para que seja uma elevada impedância à frequência de 60 Hz.

Os modelos de filtro híbrido apresentados nesta seção têm como um dos objetivos melhorar o fator de qualidade do filtro passivo. A adição do filtro ativo em paralelo ou em série ao filtro passivo requer cuidados adicionais quanto à proteção e controle do filtro ativo. A utilização de uma configuração híbrida permite que o tamanho do filtro ativo seja reduzido.

A partir de análise e observações feitas pelo Operador Nacional do Sistema [11] é indicada a necessidade de desenvolvimentos de pesquisa na área de eletrônica de potência para minimizar o conteúdo harmônico de correntes que fluem na rede elétrica.

Os filtros passivos de Ibiúna apresentam freqüentes ocorrências de sobrecarga harmônica, mais precisamente harmônica de 5ª ordem, ocasionando desligamentos destes equipamentos. Em função deste problema, a rede elétrica opera em determinados períodos com linhas de transmissão desligadas, visando alterar a impedância oferecida à corrente de 5ª harmônica. Na SE Ibiúna não há mais espaço físico para instalação de filtros passivos assim como não há espaço para instalações de filtros ativos em série aos passivos (filtros híbridos), o que poderia inviabilizar a adoção da topologia mostrada na Figura 2.6.

Este trabalho propõe pesquisa de melhor localização e um estudo de um filtro ativo que para conexão para o bloqueio da componente harmônica de corrente de 5ª ordem. Esta localização deve ser uma barra que concentra cargas não lineares geradoras de correntes de 5ª harmônica. O objetivo é reduzir a corrente que é drenada pelos filtros passivos localizados na SE Ibiúna.

A expectativa é que a solução encontrada seja uma das soluções que atendam a necessidade de filtragem da componente harmônica de corrente e solucione o problema de sobrecarga harmônica nos filtros passivos da SE Ibiúna.

### 3- POSSÍVEIS ALGORÍTMOS DE CONTROLE DEFINIDOS A PARTIR DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA

#### 3.1. Introdução

O algoritmo de controle de um filtro ativo determina a característica de compensação do mesmo. Projeto de um controlador é particularmente complexo se o filtro ativo é condicionado para atuar sobre os harmônicos e desequilíbrios contidos nas tensões e correntes, uma vez que o sistema de controle precisa detectar em tempo real estas componentes.

Em um sistema com componentes harmônicas de tensão ou corrente e/ou desequilíbrio de tensão na frequência fundamental, as seguintes características de compensação são desejadas:

- i.* Drenar potência ativa constante da fonte;
- ii.* Drenar corrente senoidal da fonte;
- iii.* Drenar o mínimo valor rms da corrente que transporta a mesma energia para a carga minimizando as perdas na transmissão. Isto significa que a fonte tem forma de onda de corrente proporcional a tensão correspondente.

Em um sistema trifásico com tensão equilibrada e sem distorção harmônica é possível satisfazer simultaneamente as três condições descritas acima. Contudo em rede elétrica com tensão não senoidal e /ou desequilibrada, o filtro ativo paralelo pode compensar a corrente da carga para garantir somente uma das 3 condições [31].

No projeto de um filtro ativo deve-se escolher a estratégia de controle adequada para cada característica de compensação. Podem ser utilizados algoritmos baseados nas seguintes estratégias de controle:

- Estratégia de controle de potência instantânea constante;
- Estratégia de controle de corrente senoidal;
- Estratégia de controle de modo que o conjunto filtro ativo + carga corresponda a uma resistência;
- Estratégia de controle para drenar componente harmônica de corrente de forma seletiva.

Neste capítulo é abordado o tipo de algoritmo de controle que aplica a teoria da potência instantânea baseada na definição da potência a partir da referência dos eixos  $\alpha\beta$ , chamada Teoria p-q [32]. A utilização desta teoria em conjunto com um circuito de sincronismo no algoritmo de controle dos filtros ativos faz com que o filtro ativo tenha a capacidade de atuar com as estratégias de controle ora mencionadas.

### 3.2. Base da Teoria p-q

A Teoria p-q se baseia na transformação dos eixos abc em  $\alpha\beta$ , conhecida como transformação de Clarke [33], que consiste em uma matriz que transforma tensão e corrente de fase a-b-c em referências estacionárias  $\alpha\beta$ . As equações matriciais (3.1) e (3.2) apresentam a transformação de Clarke  $v_a, v_b, v_c$  para  $v_\alpha, v_\beta, v_0$  e sua transformação inversa. Através de equações similares, correntes instantâneas  $i_a, i_b, i_c$  podem ser transformadas em correntes  $i_\alpha, i_\beta, i_0$  e vice-versa.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

A Figura 3.1 ilustra graficamente a transformada de Clarke e a transformada inversa. Os valores de tensão e corrente nos eixos estacionários a-b-c são transformados nos eixos estacionários  $\alpha$ - $\beta$ . Como podem ser observados, os eixos a-b-c são defasados entre si de  $2\pi/3$ , enquanto os eixos  $\alpha$ - $\beta$  são ortogonais, onde o eixo  $\alpha$  é paralelo ao eixo a.

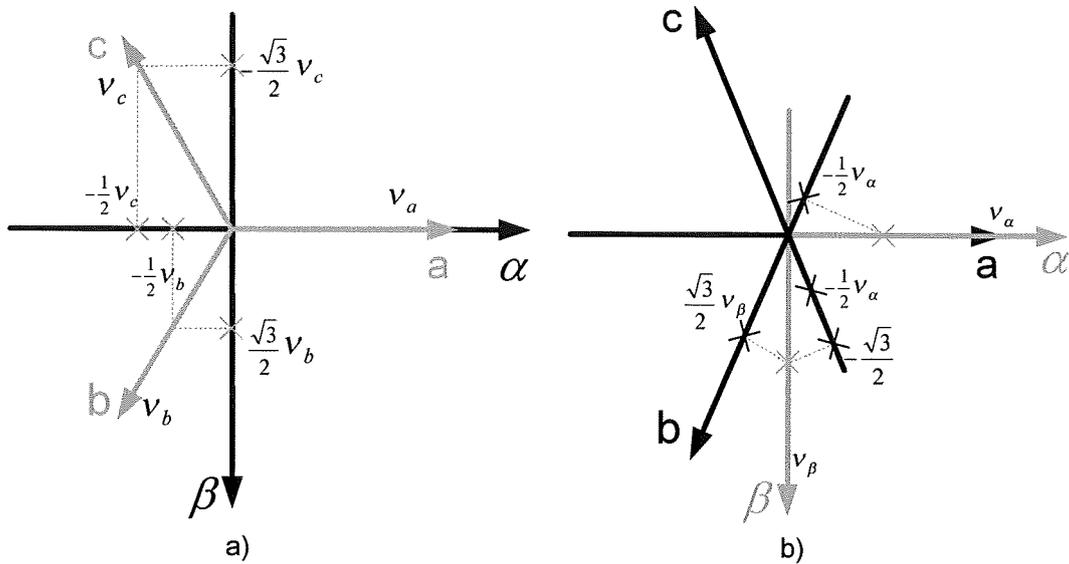


Figura 3.1 (a) Transformação de a-b-c para  $\alpha$ - $\beta$ ; (b) Transformação  $\alpha$ - $\beta$  para a-b-c.

Em [32] é demonstrada, detalhadamente, como são obtidas as equações de tensão e corrente referenciadas aos eixos  $\alpha$ - $\beta$  a partir da potência instantânea convencional (eixos a-b-c). Na sequência, é derivada a equação matricial (3.3) da potência real instantânea ( $p$ ), da potência de sequência zero  $p_0$  e da potência imaginária instantânea ( $q$ ) para sistemas trifásicos a 3 ou 4 fios.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Substituindo a expressão da potência real e imaginária  $p$  e  $q$  da equação (3.3) pela expressão equivalente definida em (3.1) nos eixos a-b-c, pode ser obtida a seguinte equação (3.4) e (3.5)

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c; \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} q &= v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_a - v_b) i_c + (v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b] \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{ab} i_c + v_{bc} i_a + v_{ca} i_b). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Observa-se na equação (3.5) que a potência imaginária é obtida através da multiplicação das tensões compostas e as correntes de linha de modo que estes fasores

na frequência fundamental estejam em quadratura. Para um sistema a três fios pode-se escrever a equação (3.6) a partir da equação (3.3), como função da tensão e da potência real e imaginária  $p$  e  $q$ .

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

### 3.3. Aplicação da Teoria $p$ - $q$ na Estratégia de Controle Potência Constante

Em um sistema trifásico, assumindo tensões e correntes arbitrárias e que contenham a componente fundamental de sequência positiva e componentes harmônicas desequilibrada, a potência real  $p$  igual a  $\bar{p} + \tilde{p}$  e a potência imaginária  $q$  igual a  $\bar{q} + \tilde{q}$ , terão componentes médias e oscilantes.

Este sistema é apresentado na Figura 3.2 e consta de uma fonte CA, uma carga não linear e um filtro ativo. A tensão  $v$  e a corrente  $i_s$  são as grandezas instantâneas medidas a partir das quais são realizados os cálculos da estratégia de controle proposta nesta seção.

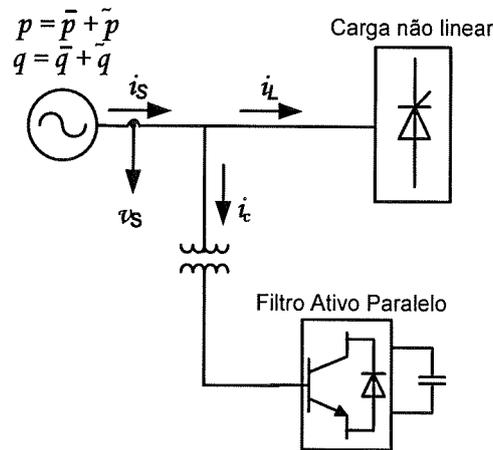


Figura 3.2 Diagrama do sistema analisado.

Deseja-se que com a estratégia de controle Potência Constante que o filtro ativo passe a drenar corrente  $i_c$  capaz de compensar a potência real oscilante  $\tilde{p}$ , a potência imaginária média  $\bar{q}$  e a potência imaginária oscilante  $\tilde{q}$  para que, então, seja mantida na fonte apenas a potência média constante  $\bar{p}$ . A tensões  $v_{Sa}$ ,  $v_{Sb}$  e  $v_{Sc}$  e as correntes  $i_{La}$ ,

$i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$  são transformadas em  $v_{S\alpha}$  e  $v_{S\beta}$  e  $i_{S\alpha}$  e  $i_{S\beta}$ , respectivamente, através da equação (3.1). As potências instantâneas  $p$  e  $q$  são obtidas a partir da equação (3.3).

Um filtro passa-baixas (FPB) separa o valor médio da potência instantânea  $p$  e com isso pode-se obter as potências oscilantes  $\bar{p}$  e  $\tilde{p}$ , conforme mostrado nas Figura 3.3.

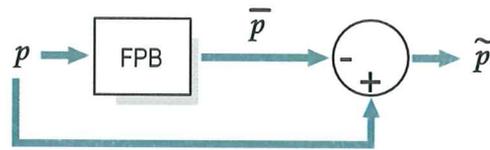


Figura 3.3 Obtenção das potências médias e oscilantes.

Conhecendo a potência oscilante  $\tilde{p}$  e a potência  $q$  é possível calcular instantaneamente as parcelas de correntes indesejáveis através da derivação da equação (3.7):

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

sendo  $i_{C\alpha}$  e  $i_{C\beta}$  as correntes de compensação.

Uma vez obtidas as parcelas de corrente que se deseja compensar, ou correntes de compensação nas coordenadas  $\alpha\beta$ , aplica-se a transformada de Clarke Inversa, conforme equação (3.8).

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

para se obter as correntes de referência de compensação nas coordenadas a, b e c. Estas correntes são produzidas pelo inversor de potência para compensar as potências real oscilante e imaginária média e oscilante.

### 3.4. Aplicação da Teoria $p$ - $q$ na Estratégia de Controle Corrente Senoidal.

Em um sistema elétrico trifásico, pode-se utilizar a teoria da potência instantânea para determinar uma estratégia de controle para compensação da corrente de carga para manter a corrente  $i_s$  senoidal e em fase com a tensão  $v_s$  da fonte.

A diferença com relação à estratégia apresentada na seção anterior, agora deseja-se que, com a estratégia de controle Corrente Senoidal que o filtro ativo da Figura 3.2 passe a drenar corrente  $i_c$  capaz de compensar a potência real oscilante  $\tilde{p}$ , a potência imaginária média  $\bar{q}$  e a potência imaginária oscilante  $\tilde{q}$  para que, então, seja garantido que a fonte supra uma corrente sempre senoidal e equilibrada. Neste caso, é necessária a utilização de um algoritmo de sincronismo e extração da componente fundamental de sequência positiva.

A equação (3.9) calcula as tensões  $v_{s\alpha}$  e  $v_{s\beta}$  a partir das tensões  $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$  e  $v_{sc}$ . As correntes  $i_{s\alpha}$  e  $i_{s\beta}$  são calculadas a partir de  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$  em equação similar.

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Um algoritmo de PLL (phase-locked loop) é utilizado para obtenção de  $v_{1\alpha}$  e  $v_{1\beta}$  que representam a frequência e fase da sequência positiva da componente fundamental de tensão. Processo análogo é realizado para obtenção da componente fundamental da corrente  $i_{1\alpha}$  e  $i_{1\beta}$  a partir das correntes  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$ .

As potências instantâneas  $p$  e  $q$  nas coordenadas  $\alpha\beta$  podem ser obtidas a partir da equação (3.10), desta vez, utilizando as grandezas resultantes do circuito de sincronismo.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1\alpha} & v_{1\beta} \\ v_{1\beta} & -v_{1\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

O filtro passa-baixa utilizado na Figura 3.3 é utilizado da mesma forma também para a obtenção da potência oscilante  $\tilde{p}$ .

Através da matriz (3.11) é possível calcular a corrente de controle  $i_c$  que servirá de referência para o controle  $i_{c\alpha}$  e  $i_{c\beta}$  do filtro ativo. Este cálculo é realizado a partir das grandezas  $v_{1\alpha}$  e  $v_{1\beta}$  obtidas no circuito de sincronismo.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{1\alpha}^2 + v_{1\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{1\alpha} & v_{1\beta} \\ v_{1\beta} & -v_{1\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

O diagrama de bloco da Figura 3.4 mostra a estratégia de controle cujos cálculos foram apresentados nas equações desta seção.

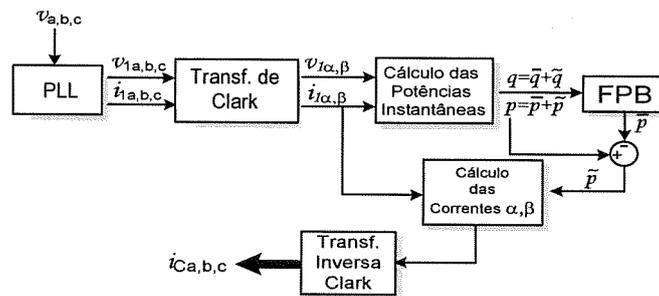


Figura 3.4 Diagrama de bloco da estratégia de controle Corrente Senoidal.

### 3.5. Proposta de Utilização da Teoria $p-q$ para Compensação Seletiva de Harmônico

Esta seção mostra como a utilização da teoria da potência instantânea pode ser utilizada para compensar, por exemplo, a componente de 5ª harmônica da corrente.

No presente estudo, para a obtenção da corrente de compensação capaz de servir de referência para o filtro ativo, foi utilizada a teoria  $p-q$  de uma forma particular. A corrente de referência foi obtida a partir da detecção de apenas a tensão fase-fase chamada de  $v_L$  da barra na qual o filtro ativo está conectado. O projeto prevê uma filtragem seletiva de corrente desta barra. A escolha somente da tensão dá-se devido ao fato de ser inviável a detecção da corrente, uma vez que a barra pode conter inúmeros vãos e não ser possível a determinação de qual seria o melhor ponto de medição.

A tensão  $V_L$  que aqui representa as tensões de fase a, b e c, é igual ao somatório da tensão de frequência fundamental  $v_{L1}$  (60 Hz) e de frequência de 5ª harmônica  $v_{L5}$  (300 Hz), ou seja,  $v_L = v_{L1} + v_{L5}$ .

O ângulo de fase e frequência devem ser obtidos a partir de um detector de sequência positiva conforme ilustrada na Figura 3.5 cujos sinais de saída são chamados de  $v_{PLL}$  já na quinta harmônica ainda não representando a fase da componente de 5ª harmônica a qual é determinada posteriormente.

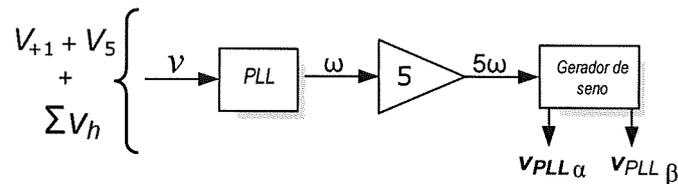


Figura 3.5 Detecção da fase.

Uma vez que se deseja a filtragem seletiva do 5º harmônico, a equação:

$$v \times v_{PLL} = (v_1 + v_5) \times v_{PLL} = v_1 \times v_{PLL} + v_5 \times v_{PLL}, \quad (3.12)$$

indica que a primeira parcela ( $v_1 \times v_{PLL}$ ) da equação resulta em componente oscilante e a segunda parcela ( $v_5 \times v_{PLL}$ ) representa as componentes médias. Neste caso, utiliza-se um filtro passa baixa para obtenção das potências médias  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  que representam a componente harmônica de interesse. É importante destacar que o que é chamado aqui de potência oscilante e média não tem nenhum significado físico, servindo apenas como variável auxiliar para obtenção dos sinais de referência.

Pode-se concluir que  $\bar{p}$  contém a mesma frequência e fase da componente de 5ª harmônica de  $v_L$  e que  $\bar{q}$  contém a mesma frequência, porém defasado de 90°.

Utilizando a transformada de Clarke se obtém  $V_\alpha$  e  $V_\beta$  que representam a tensão na barra V nas coordenadas  $\alpha\beta$ ;  $p$  e  $q$  são obtidas a partir da equação matricial:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{5PLL\alpha} & V_{5PLL\beta} \\ V_{5PLL\beta} & -V_{5PLL\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

Conforme mencionado anteriormente, a intenção é a de obter o valor médio de  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  que é obtido através de um filtro passa baixa. Por intermédio da inversão da matriz 3.13, é possível a obtenção das grandezas  $v_{5\alpha}$  e  $v_{5\beta}$ , mostrada na equação seguinte:

$$\begin{bmatrix} v_{5\alpha} \\ v_{5\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{5PLL\alpha'} & -V_{5PLL\beta'} \\ V_{5PLL\beta'} & V_{5PLL\alpha'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

sendo  $\Delta$  igual a

$$\Delta = (v_{SPLL\alpha'})^2 + (v_{SPLL\beta'})^2. \quad (3.15)$$

Finalmente, aplicando-se a transformada inversa de Clarke, é possível obter as tensões de referência  $v_{Ca}$ ,  $v_{Cb}$  e  $v_{Cc}$  para geração da corrente de compensação  $i_{Ca}$ ,  $i_{Cb}$  e  $i_{Cc}$ .

### 3.5.1. Resultados de Simulação da Estratégia Utilizada

Esta seção apresenta os resultados de simulação a partir de um sistema equivalente, cujo objetivo é verificar a eficiência da estratégia de detecção e o algoritmo utilizado.

A Figura 3.6 representa um modelo reduzido do circuito completo que representa a rede elétrica modelada. O circuito é composto de uma fonte alternada CA de 88 kV atrás de uma impedância, a carga linear  $r + jx$ , uma fonte de corrente com frequência de 300 Hz, a detecção da tensão fase-fase da barra, e a estratégia de controle com o algoritmo proposto. A fonte de corrente controlada representa o filtro ativo.

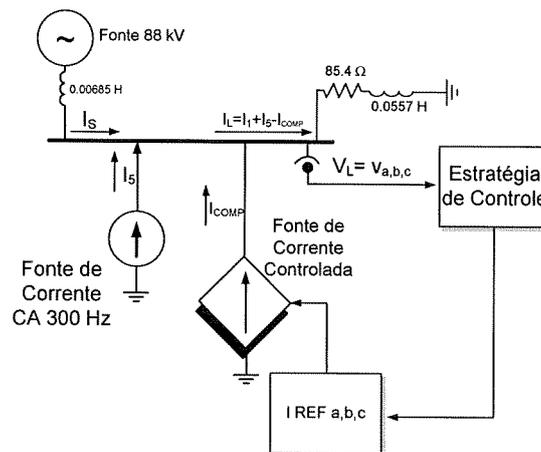


Figura 3.6 Diagrama simplificado utilizado na simulação.

$I_s$  é a corrente da fonte, ou seja, representa a corrente distorcida do sistema, mostrada na Figura 3.7 obtida através da simulação com o sistema apresentado.  $I_{COMP}$  é a corrente de compensação gerada pela fonte de corrente controlada, a partir da tensão de referência  $V_{REF}$ .

A Figura 3.7 mostra a forma de onda da corrente da fonte  $I_s$ , sem a ação de compensação da fonte de tensão controlada que representa o filtro ativo.

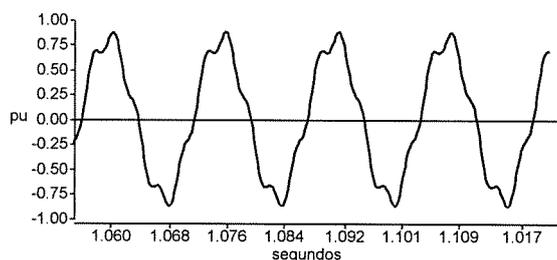


Figura 3.7 Forma de onda de  $I_s$  observada na simulação, antes da energização do filtro ativo.

A Figura 3.8 ilustra a detecção da fase da corrente de 5ª harmônica  $I_H$  pela corrente de compensação  $I_{COMP}$ , indicando que em a) houve a detecção e em b) houve a manutenção da estabilização após  $t = 5,0$  s.

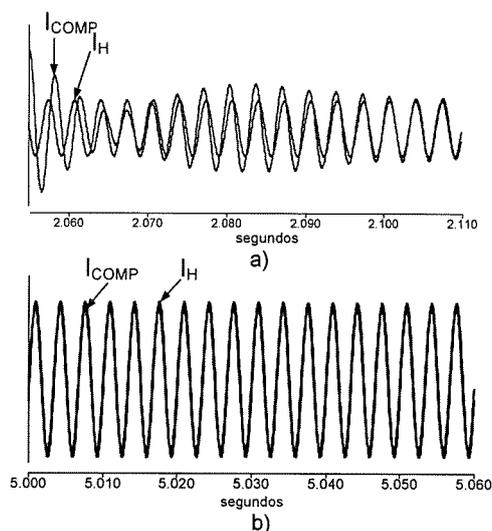


Figura 3.8 a) Detecção da fase da corrente  $I_H$ ; b) Estabilização após  $t = 5,0$  s.

Em  $t = 2$  s, há o desbloqueio do filtro, conforme pode ser observado na Figura 3.9 onde a corrente  $I_s$  é corrigida e torna-se senoidal. No momento do desbloqueio o filtro passa a gerar a corrente  $I_{COMP}$ , resultante da estratégia de controle implementada no filtro. Após o desbloqueio a corrente  $I_{COMP}$  apresenta transitório que traduz uma dinâmica lenta, devido ao filtro passa-baixa utilizado em  $p'$  e  $q'$  para obtenção das potências médias  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ . O valor da frequência de corte do filtro passa-baixa é de 30 Hz, obtido experimentalmente. Os filtros rápidos, com valores de frequência de corte superiores se mostraram ineficientes para a detecção da corrente de compensação na rede elétrica simulada.

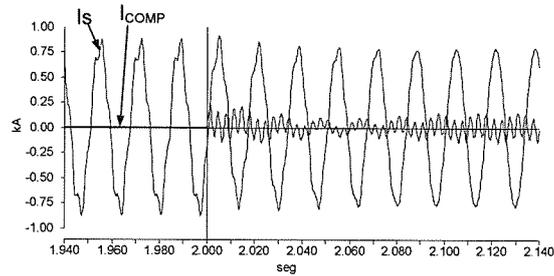


Figura 3.9  $I_S$  antes e depois do desbloqueio de filtro e a corrente de compensação  $I_{COMP}$ .

Para verificação da eficiência do controle e da dinâmica de resposta, em  $t = 6s$  foi incrementado uma perturbação na corrente de 5ª harmônica. Um degrau com valor 3 vezes superior ao valor inicial é inserido na fonte de corrente CA de 300 Hz. Observa-se na Figura 3.10 a corrente  $I_H$  sendo elevada em 3 vezes e a corrente da fonte  $I_S$  sem alteração na sua forma de onda, indicando a perfeita compensação da elevação da corrente harmônica de 5ª ordem.

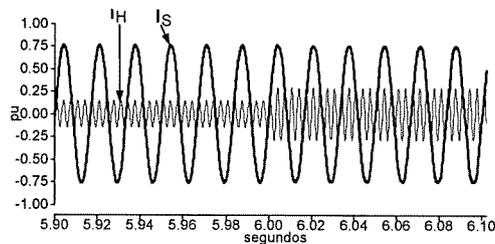


Figura 3.10 Degrau da corrente  $I_H$  e a forma de onda de  $I_S$ .

A Figura 3.11 mostra o sinal de controle da corrente de compensação, também chamada de  $I_{COMP}$ , indicando a dinâmica do sistema proposto. O sinal da corrente de compensação se estabiliza, em  $t = 6,033 s$ , o que significa que somente após 10 ciclos a corrente de 5ª harmônica será novamente compensada.

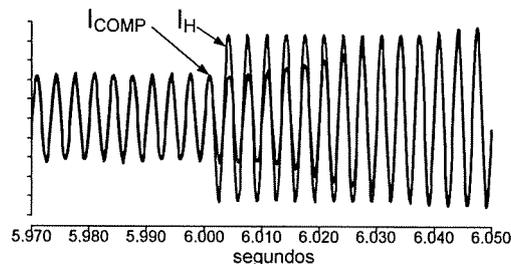


Figura 3.11 Dinâmica de controle de  $I_{COMP}$ .

A Figura 3.12 mostra a forma de onda da tensão da barra de carga  $V_L$  inalterada após a perturbação incluída no sistema em  $t = 6s$ .

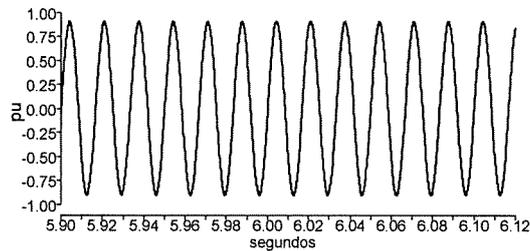


Figura 3.12 Forma de onda da tensão  $V_L$ .

### 3.6. Conclusões Parciais

Neste capítulo é apresentada a base da teoria da potência instantânea, também chamada teoria  $p-q$ . A aplicação desta teoria em conjunto com um algoritmo de sincronismo no algoritmo de controle dos filtros ativos faz com que o filtro ativo tenha a capacidade de atuar com as estratégias de controle apresentadas nas seções anteriores. A estratégia Potência Constante utiliza no seu algoritmo a potência real oscilante e a potência imaginária para obtenção da corrente de referência que o filtro ativo passa a gerar visando a compensação da potência desejada.

A estratégia Corrente Senoidal apresenta algoritmo similar, porém utiliza um circuito de sincronismo para extração da fundamental da sequência positiva da corrente.

Uma adaptação nesta teoria foi realizada visando a compensação da corrente oscilante. Essa adaptação foi decorrente da necessidade da compensação seletiva de corrente harmônica, a partir da detecção de tensão. A equação (3.13) determina as potências médias e oscilantes. Neste desenvolvimento a potência pode ser representada por  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  que são utilizadas para obtenção das correntes de referência no controle do filtro ativo paralelo. Neste caso,  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  significam que as potências são originadas por componente harmônica de 5ª ordem, são grandezas fictícias e não tem significado físico.

Um modelo reduzido foi utilizado para verificação da eficiência do algoritmo proposto. Este modelo representa a rede elétrica mostrada no capítulo 4. Este modelo atende às expectativas uma vez que se procura apenas verificar a detecção da corrente de compensação e a dinâmica do controle.

Pode-se concluir que o algoritmo baseado na teoria da potência instantânea “modificada”, apresentou resposta correta no sistema simulado. A dinâmica observada e o tempo de estabilização em 10 ciclos são satisfatórios uma vez que a rede elétrica

possui controladores com dinâmica lenta tornando o controle do filtro ativo paralelo compatível com o sistema ao qual é conectado.

No capítulo 6, é utilizada a mesma estratégia com novos ajustes de ganhos e adição de malhas de controle para rede modelada. Esta rede, denominada rede de simulação, é apresentada no próximo capítulo.

## 4- MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA

### 4.1. Objetivo

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a rede elétrica, aqui chamada de rede de simulação, representando parte do Sistema Interligado Nacional, com barras de fronteiras equivalentadas com impedância de curto-circuito simulada e calculada pelo programa ANAFAS<sup>®</sup> do CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica).

Para pesquisa da origem das correntes harmônicas é necessário o entendimento da topologia do SIN (Sistema Interligado Nacional), de como a rede básica se conecta com os agentes de distribuição, quais são os componentes que precisam ser devidamente modelados e qual o comportamento das cargas industriais, comerciais e residenciais. É necessário também saber qual o comportamento em regime permanente do perfil de tensão do SIN, visando determinar o regime de manobras de equipamentos na rede elétrica.

Rede básica e rede local são redes compostas por equipamentos que estão definidos nos Procedimento de Rede do ONS [1]. Basicamente, são definidas como:

- Rede Básica: composta de equipamento com níveis de tensão igual ou superior a 230 kV.
- Rede Local: composta de equipamentos com níveis de tensão menor que 230 kV.

### 4.2. Modelagem dos Equipamentos da Rede de Simulação

A rede de simulação para fins desta dissertação abrange a rede básica, sendo equivalentada em determinadas barras como uma fonte CA atrás de uma impedância de curto circuito calculada pelo programa ANAFAS<sup>®</sup> e em outras barras limítrofes com a rede local representado por carga tipo  $r + jx$ , fornecida pelo caso de estudo do ONS, disponível no site [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br). A Figura 4.1 apresenta a rede de simulação, em um diagrama unifilar simplificado.

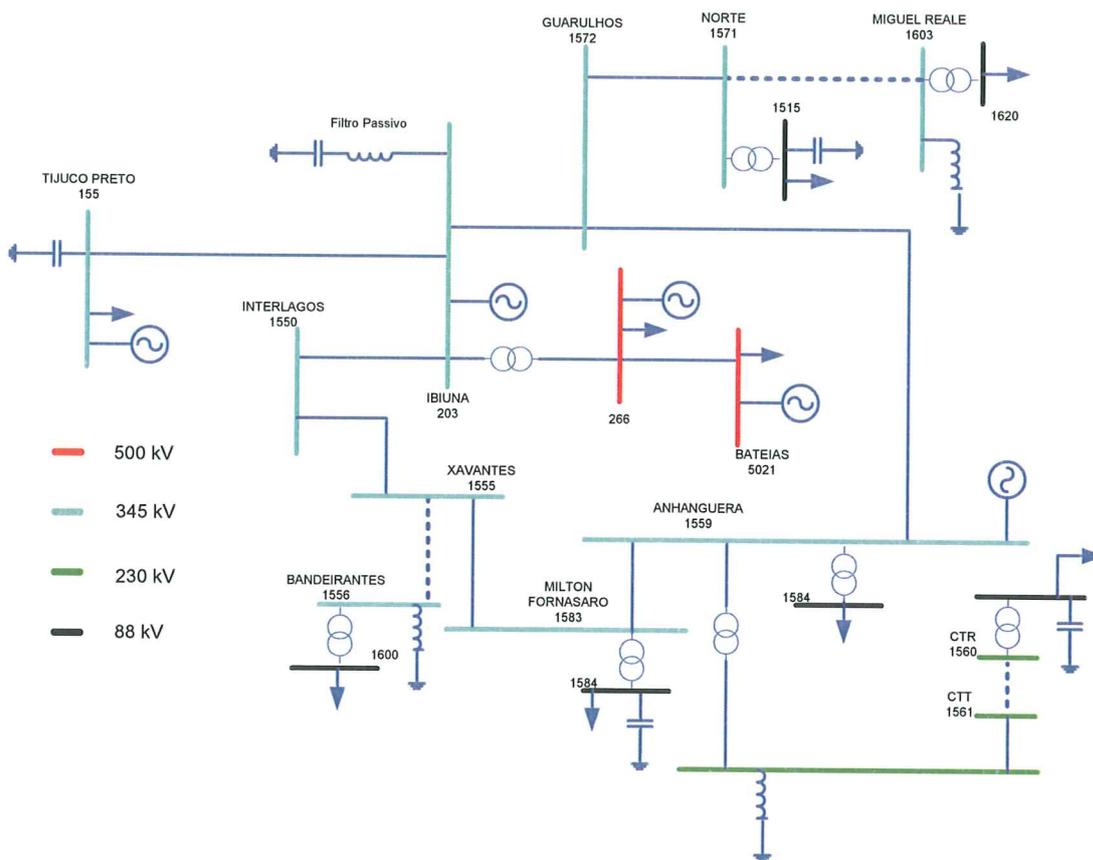


Figura 4.1 Rede de simulação – Diagrama unifilar simplificado.

Os circuitos pontilhados representam os cabos subterrâneos em 345 kV e 230 kV pertencentes à empresa Transmissão Paulista (CTEEP). Para resultados mais precisos foi utilizado o modelo T\_Line do PSCAD<sup>TM</sup>, para o qual foi necessário a obtenção do modelo do perfil das torres de todos os circuitos envolvidos.

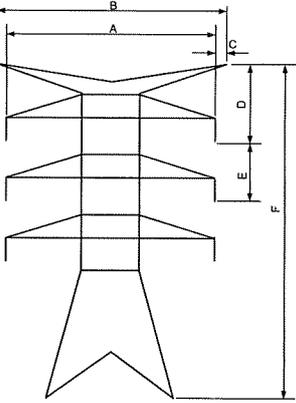
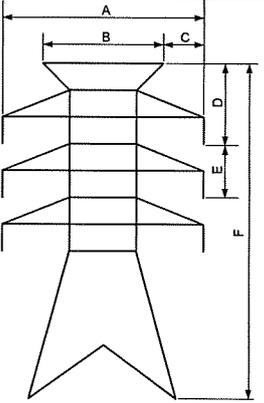
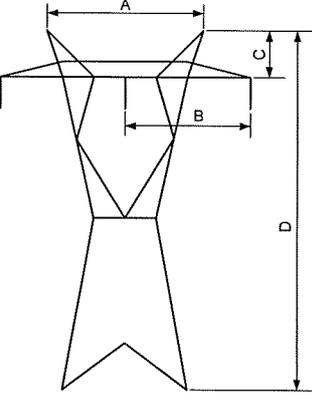
A Tabela 4.1 apresenta a descrição e o modelo das linhas de transmissão da rede de simulação utilizada no simulador PSCAD<sup>TM</sup>.

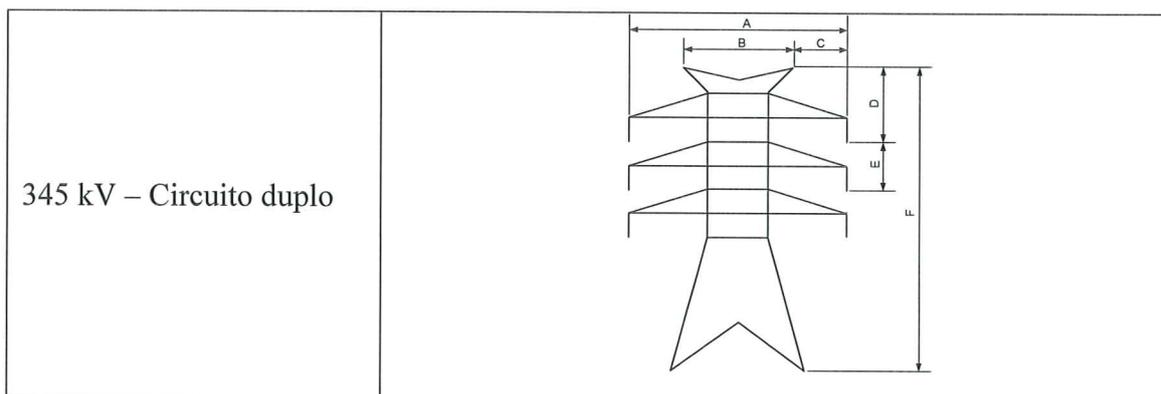
Tabela 4.1 Modelo das linhas de transmissão da rede de simulação.

Equipamento	Características					
	Linhas de Transmissão	Extensão (km)	Cabos p/ fase	Tipo de Silhueta da Torre	Dimensões da Torre (m)	
LT 345 kV Ibiúna/Tijuco Preto	92	3	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	954 MCM Rail
LT 345 kV Guarulhos/Ibiúna	75,0	3	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	954 MCM Rail
LT 345 kV Interlagos/Ibiúna	61,0	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=12,0 B=12,0 C=0	D=4,0 E=7,5 F=32,0	636 MCM Grosbreak
LT 345 kV Interlagos/Xavantes	7,5	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	636 MCM Grosbreak
LT 345 kV Xavantes/M. Fornasaro	15,5	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	636 MCM Grosbreak
LT 345 kV Anhanguera/ M.Fornasaro	3,0	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	636 MCM Grosbreak
LT 345 kV Guarulhos/Norte	5,0	3	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	954 MCM Rail
LT 345 kV Guarulhos/ Anhanguera	22,0	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=13,5 B=13,5 C=0	D=4,1 E=7,5 F=34,0	636 MCM Grosbreak
LT 230 kV Anhaguera/Centro	6,2	2	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=11,5 B=9,0 C=1,25	D=3,0 E=7,7 F=28,0	636 MCM Grosbreak
LT 500 kV Ibiúna/Bateias	328,0	4	LT 345 kV Circuito Duplo (figura 3.3)	A=15,6 B=16,0 C=0,3	D=4,0 E=9,5 F=40,5	636 MCM Grosbreak

A Tabela 4.2 mostra as dimensões das torres utilizadas no simulador, baseada em informações fornecidas pelas empresas Furnas Centrais Elétricas e Transmissão Paulista (CTEEP), proprietárias dos equipamentos do sistema de transmissão envolvidos.

Tabela 4.2 Tipo de silhueta das torres utilizadas no PSCAD™

TIPO	SILHUETA
500 kV - Circuito Duplo	
230 kV – Circuito duplo	
345 kV – Circuito simples	



A Tabela 4.3 mostra os parâmetros dos transformadores utilizados no simulador, baseada em informações contidas na base de dados técnicas do ONS, disponível no site desta empresa [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br).

Tabela 4.3 Modelo dos transformadores da rede de simulação.

Equipamento	Quantidade	Relação (kV)	Resistência Equiv. (%) AT/BT	Reatância Equiv. (%)
AT Ibiúna	2	500/345	0	1,913
AT Anhanguera	1	345/230	0	1,59
TR Norte	3	345/88	0	13,56
TR Miguel Reale	2	345/88	0	5,63
TR Bandeirantes	3	345/88	0	13,51
TR M. Fornasaro	3	345/88	0	5,61
TR Anhanguera	2	345/88	0	5,63
TR Centro	2	345/88	0	7,72

Para todos os transformadores não foram utilizadas curvas de saturação conforme mostra a Figura 4.2.

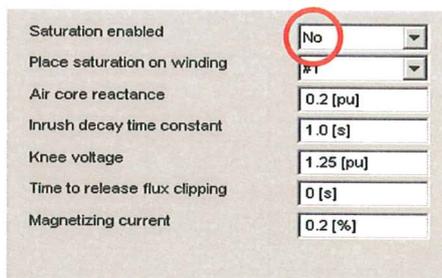


Figura 4.2 Dados dos parâmetros de saturação dos transformadores..

A Tabela 4.4 apresenta a relação com as principais características dos bancos de capacitores paralelos utilizados na rede de simulação. Os dados de potência reativa são obtidos no Procedimento de Rede do ONS e a capacitância é obtida através da equação seguinte:

$$C = \frac{V^2}{2.\pi.f.Q} \quad (4.1)$$

onde:

C = Capacitância em Faraday (F)

V = Tensão em Volts (V)

Q = Potência em var (var)

f = frequência fundamental (60 Hz).

Tabela 4.4 Modelo dos bancos de capacitores da rede de simulação

<b>Equipamento</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Nº x Potência (Mvar)</b>	<b>Capacitância (µF/un.)</b>
BC Tijuco Preto	345	10x200	4,45
BC Ibiúna	345	2x296	6,66
BC Leste	88	2 x 63	21,57
BC M.Fornasaro	88	3x28,8	9,86
BC Norte	88	3x28,8	9,86
BC Bandeirantes	88	1x63	21,57
BC Centro	88	1x21	7,19
BC Ed. de Souza	88	1x63	21,57

A Tabela 4.5 apresenta a relação com as principais características dos bancos de reatores paralelos utilizados na rede de simulação. Os dados de potência reativa são obtidos no Procedimento de Rede do ONS e a indutância é obtida através da equação abaixo:

$$L = \frac{Q}{2.\pi.f.V^2}, \quad (4.2)$$

onde:

L = Indutância em Henry (H);

V = Tensão em Volts (V);

Q = Potência em var (var);

f = frequência fundamental (60 Hz).

Tabela 4.5 Modelo dos bancos de reatores da rede de simulação.

<b>Equipamento</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>n° x Potência (Mvar)</b>	<b>Indutância (mH/un.)</b>
RT Tijuco Preto	13,8	2 x 180	2,81
RT Bandeirantes	345	3 x 100	3,157

A Tabela 4.6 apresenta a relação dos valores de impedância equivalente de curto-circuito utilizado nas barras de fronteiras. Estes dados foram obtidos através do programa ANAFAS<sup>®</sup> que utilizou o caso referência disponibilizado no site do ONS ([www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)) denominado BR0606B.ana, correspondente ao horizonte 2009 do SIN, acessado em Novembro de 2007.

Tabela 4.6 Impedâncias equivalentes da rede de simulação.

<b>Barra</b>	<b>EQUIVALENTES (%)</b>	
	<b>Seq. Positiva</b>	<b>Seq. Zero</b>
155 – Tijuco Preto 345 kV	0,0211+j0,3994	0,02322+j0,2489
203 – Ibiúna 345 kV	0,0372+j0,759	0,00731+j0,3299
1559 – Anhanguera 230 kV	0,0697+j2,61	0,0965+j1,226

A Tabela 4.7 apresenta a relação dos modelos de carga utilizada nas barras limites da rede básica e rede local que são fornecidas pelo modelo utilizado pelo ONS (caso base de Novembro de 2007).

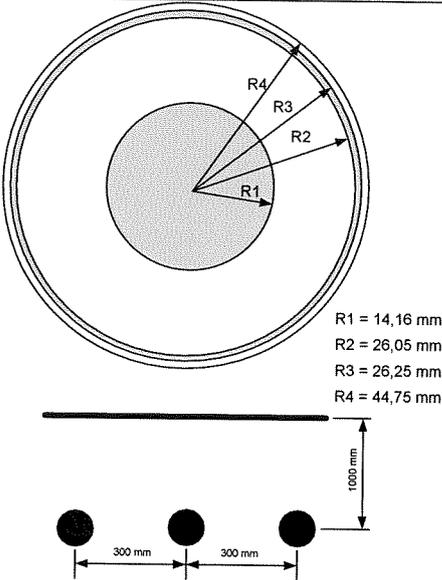
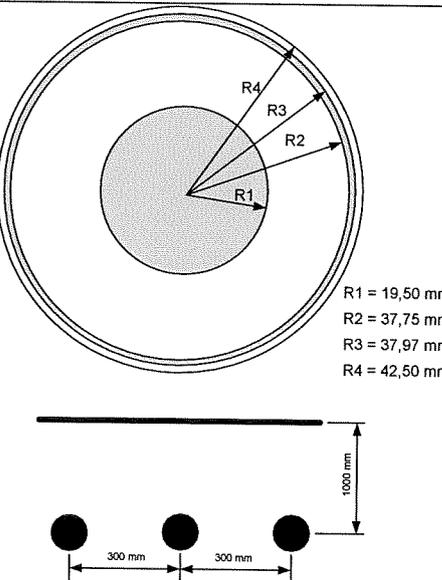
Tabela 4.7 Modelo das cargas utilizado na rede de simulação.

Barra	CARGA		
	P+jQ	R+jX	[R(Ω)/L(H)]
Bandeirantes	427+j50	17,8-j2,1	17,8/0,05557
E.Souza	254+j70	28,3-j7,8	28,3/0,02069
M.Fornasaro	332+j92	21,7-j6,0	21,7/0,01591
Anhanguera	88-j22	82,8+j20,7	82,8/0,05491
Centro	86+j20	85,4-j19,9	85,4/0,05278
Norte	201+j26	37,9-j4,9	37,9/0,013
M.Reale	66+j16	100-j26,9	100/0,07135

A Tabela 4.8 apresenta as características dos cabos subterrâneos utilizados no simulador, baseadas em informações prestadas pelos agentes de transmissão.

Tabela 4.8 Características dos Cabos Subterrâneos.

Circuito	Comprimento (km)	Modelo
LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes 3 circuitos	8,5	<p>R1 = 25,23 mm R2 = 44,73 mm R3 = 45,23 mm R4 = 50,35 mm</p> <p>300 mm      300 mm      1000 mm</p>

<p>LT 345 kV Norte / Miguel Reale 2 circuitos</p>	<p>12,0</p>	 <p>R1 = 14,16 mm R2 = 26,05 mm R3 = 26,25 mm R4 = 44,75 mm</p>
<p>LT 230 kV Centro / CTR 2 circuitos</p>	<p>6,5</p>	 <p>R1 = 19,50 mm R2 = 37,75 mm R3 = 37,97 mm R4 = 42,50 mm</p>

### 4.3. Simulador Utilizado

A interface escolhida para as linhas de transmissão aérea é a “*Overhead Line Interface*”, a qual identifica o número de conexões elétricas que define o número de condutores por fase, o *bundle*, o comprimento da linha e todas as dimensões do perfil da torre, bem como seu tipo. A permeabilidade relativa considerada foi igual a 1.

A interface escolhida para os cabos subterrâneos é a “*Cable Interface*” que igualmente a interface da linha aérea, também identifica o número de conexões, o comprimento e todas as dimensões do perfil do cabo e suas camadas de isolamento e os

aterramentos. Um cuidado adicional é tomado na utilização desta interface. Algumas comparações são realizadas neste capítulo, visando validar os resultados obtidos pelo simulador. A próxima seção demonstra, a partir de um modelo matemático conhecido, os cálculos de impedância variando com a frequência e as comparações necessárias.

O modelo utilizado para as simulações é o “*Bergeron Model*”. Baseado na distribuição de parâmetros LC com resistência concentrada. É utilizado o modelo “ $\pi$ ” de modo distribuído para os parâmetros L e C, considerando a resistência no meio da linha e em  $\frac{1}{4}$  de cada extremidade. Este modelo representa bem a impedância em frequências diferentes da fundamental, exceto quando de resistência variável com a frequência. Para o estudo presente este modelo é adequado, uma vez que a frequência a ser trabalhada é a de 300 Hz, além da fundamental.

Para todas as simulações são considerados o tempo de 25  $\mu$ s para o passo de integração e 50  $\mu$ s para o passo de plotagem. O tempo de simulação para 10,5 s corresponde a tempo de processamento de, aproximadamente, 18 min.

#### **4.4. Análise e Validação do Modelo de Cabos do PSCAD™**

Uma das características do sistema aqui estudado que o diferencia em relação ao restante do SIN é a presença dos cabos subterrâneos pertencentes à Transmissão Paulista, empresa responsável pela transmissão de energia elétrica de São Paulo, da energia advinda das usinas hidrelétricas de grande porte distante dos grandes centros de carga, através da rede básica. A característica urbana da região metropolitana de São Paulo fez com que fosse necessário o projeto do sistema de transmissão com utilização de cabos subterrâneos em extra-alta tensão. Esta seção é dedicada a estudá-los, visando observar o comportamento da amplificação harmônica de corrente de 5ª ordem, objeto de estudo deste trabalho.

No entanto, qualquer conclusão não pode ser obtida, antes da realização de uma comparação entre o modelo utilizado para simulações e os modelos matemáticos de rede clássicos utilizados na literatura [34]. Uma solução única, similar àquela utilizada para linhas de transmissão aérea é dificultada para cabos subterrâneos devido à grande variedade de projetos e arranjos.

#### 4.4.1. Análise Teórica do Modelo de Cabos Subterrâneos

A seção transversal de um cabo, embora extremamente complexa, pode ser simplificada [34] e sua impedância série por unidade de comprimento é calculada pela seguinte equação:

$$-\begin{bmatrix} dV_1/dx \\ dV_2/dx \\ dV_3/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & Z'_{13} \\ Z'_{21} & Z'_{22} & Z'_{23} \\ 0 & Z'_{32} & Z'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde

$Z'_{11}$  é a soma das três seguintes componentes;

$Z'_{\text{condutor interno}}$  = impedância interna do condutor ;

$Z'_{\text{isolador}}$  = impedância do isolador mais próximo do condutor;

$Z'_{\text{revestimento interno}}$  = impedância interna do revestimento interno.

$$Z'_{22} = Z'_{\text{revestimento externo}} + Z'_{\text{isolador armadura/revestimento}} + Z'_{\text{armadura interna}} \quad (4.4)$$

$$Z'_{33} = Z'_{\text{armadura externa}} + Z'_{\text{isolador terra/revestimento}} + Z'_{\text{aterramento}} \quad (4.5)$$

A impedância de acoplamento  $Z'_{12}=Z'_{21}$  e  $Z'_{23}$  e  $Z'_{32}$  são negativas devido à direção oposta da corrente ( $I_2$  na direção oposta à malha 1 e  $I_3$  na direção negativa no malha 2, ou seja:

$$Z'_{12} = Z'_{21} = -Z'_{\text{revestimento mútuo}} \quad (4.6)$$

$$Z'_{23} = Z'_{32} = -Z'_{\text{armadura mútuo}} \quad (4.7)$$

onde,

$Z'_{\text{revestimento mútuo}}$  = impedância mútua (por unidade de comprimento) do revestimento tubular 1 e 2.

$Z'_{\text{armadura mútuo}}$  = impedância mútua (por unidade de comprimento) do revestimento tubular 2 e 3.

Finalmente,  $Z'_{13} = Z'_{31} = 0$ , pois os revestimentos 1 e 2 não tem ligação comum.

A impedância do isolador é dada por:

$$Z'_{\text{isolador}} = j\omega \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_{\text{externo}}}{r_{\text{interno}}} \quad \text{em } \Omega/\text{m} \quad (4.8)$$

onde

$\mu$  = permeabilidade do isolador em H/m

$r_{\text{externo}}$  = raio externo do isolador

$r_{\text{interno}}$  = raio interno do isolador.

Se a impedância do isolador for considerada infinita, a impedância interna passa a ser função apenas da frequência e pode ser derivada da função de Bessel:

$$Z' = \frac{\sqrt{j\omega\mu}}{2\pi \cdot mq \cdot D} \left[ I_0(\sqrt{jmq})K_1(\sqrt{jmr}) + K_0(\sqrt{jmq})I_1(\sqrt{jmr}) \right] \quad (4.9)$$

onde

$$D = I_1(\sqrt{jmr})K_1(\sqrt{jmq}) - I_1(\sqrt{jmq})K_1(\sqrt{jmr}) \quad (4.10)$$

$$mr = \sqrt{K \frac{1}{1-s^2}} \quad (4.11)$$

$$mq = \sqrt{K \frac{s}{1-s^2}} \quad (4.12)$$

$$K = \frac{8\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \mu_r}{R'_{dc}} \quad (4.13)$$

$$s = \frac{q}{r} \quad (4.14)$$

sendo,

q = raio interno

r = raio externo

$R'_{CC}$  = Resistência CC em  $\Omega/m$ .

#### 4.4.2. Resultados Teóricos

Através da equação (4.9) é obtido o valor da impedância total do isolamento, considerando comprimento de 20 km.

$$Z'_{\text{isolador}} = j\omega \frac{6}{2\pi} \ln \frac{0,0377}{0,0195} = 1748,66 \cdot 20 \cdot 10^3 = 4,7467 \text{ M}\Omega \quad (4.15)$$

O resultado da equação (4.15) permite considerar a impedância do isolador igual à infinita e desprezar os efeitos mútuos entre os componentes. Com o modelo do

cabo considerado, cujos dados estão contidos na Tabela 4.9 e aplicando as equações (4.9) a (4.15) é possível obter resultados teóricos, que são comparados adiante com os resultados de simulação.

Tabela 4.9 Parâmetros do cabo considerado.

Tensão (kV)	Distância entre cabos (m)	Diâmetro do cabo central (m)		Resistividade do solo (ohms.m)	Comprimento (km)	Profundidade (m)
100	0,5	0,0192		100	20	1
Espessura do isolamento condutor/revest. (m)		Espessura do isolam. revest./terra (m)	Resistividade (ohm.m)		Permissividade relativa	
			Cabo	Revest.	Cabo/Rev	Rev./Terra
0,0182		0,00453	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	2.85	2.51

A Figura 4.3 mostra o gráfico que representa a impedância calculada em função da frequência.

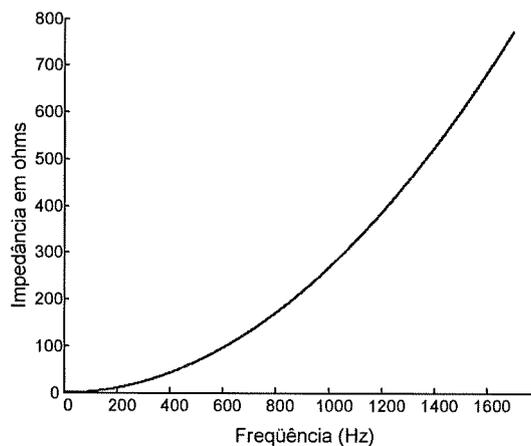


Figura 4.3 Resposta a frequência da impedância do sistema teórico.

Segundo o método, observa-se que a impedância aumenta exponencialmente. Para a frequência de 60 Hz, a impedância calculada é igual 1,1 ohms. Para a frequência de 300 Hz é calculada uma impedância de 27,52 ohms.

#### 4.4.3. Resultados de Simulação dos Cabos

Para obtenção dos resultados de simulação no PSCAD<sup>TM</sup>, são introduzidos os valores representados na Figura 4.4.

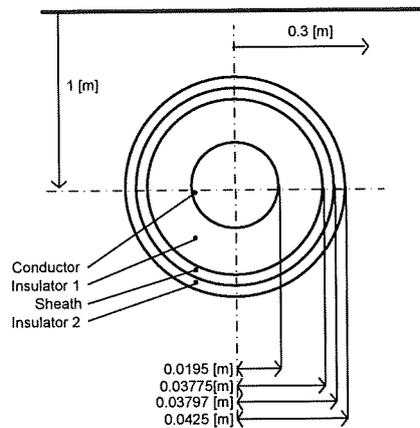


Figura 4.4 Dados de entrada do PSCAD.

O sistema simplificado, apresentado na Figura 4.5, consta de uma fonte de tensão alternada de 100 kV com controle externo de frequência, um circuito trifásico composto de cabos subterrâneos sem carga com extensão de 20 km, medidor de tensão entre fases no terminal da fonte e no terminal da carga e medidor de corrente de linha.

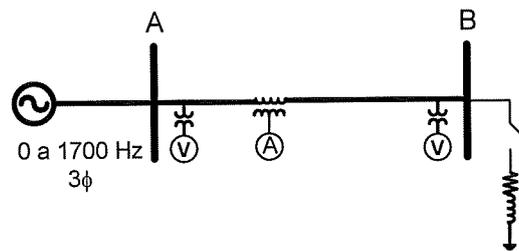


Figura 4.5 Sistema utilizado na simulação.

A escolha do comprimento do cabo de 20 km se deve ao fato de que os cabos representados na rede de simulação contêm comprimentos diversos sendo que o maior possui 12 km.

O sistema da Figura 4.5 é utilizado para obtenção dos seguintes parâmetros: a) tensão no terminal A; b) impedância relativa à barra da fonte e c) tensão no terminal B.

A Figura 4.6 representa a variação da impedância e diferença de potencial do cabo sem carga em relação ao seu comprimento, considerando uma fonte de 300 Hz.

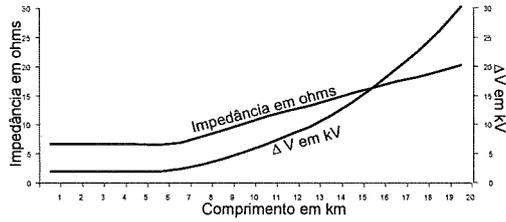


Figura 4.6 Variação da impedância do cabo e a diferença de tensão entre os terminais A e B.

É observada na Figura 4.6 elevação linear da impedância para o 5º harmônico a partir do comprimento de 6 km. Já a elevação da diferença de potencial ao longo do cabo em vazio a partir de 6 km se dá de forma exponencial.

Como conclusão desta medição, pode-se afirmar que quanto maior o comprimento do cabo, maior a impedância à corrente harmônica de 5ª ordem vista da fonte e, conseqüentemente, não de forma linear, maior a queda de tensão ao longo de sua extensão.

Uma vez determinadas as características do cabo e os locais de medição, pode-se variar a frequência da fonte para obtenção da impedância em resposta à frequência e a diferença de tensão entre os terminais da fonte e da carga.

O objetivo é analisar a resposta do simulador ao comportamento do cabo face à variação da frequência e comparar com os resultados apresentados na seção 4.4.2. A Figura 4.7 apresenta a resposta à frequência da impedância vista da barra da fonte.

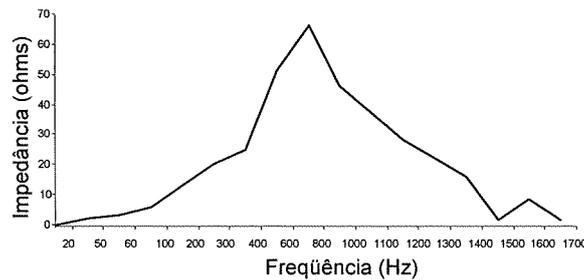


Figura 4.7 Resposta à frequência da impedância do sistema.

O resultado apresentado no gráfico indica elevação significativa da impedância dos cabos para altas frequências, até aproximadamente 800 Hz. Em 300 Hz, é observada impedância de 22,65 ohms, o que sugere que o próprio cabo seria uma barreira natural para o quinto harmônico. Figura 4.8 apresenta a diferença de tensão entre o terminal da carga e da fonte ao longo do cabo de 20 km.

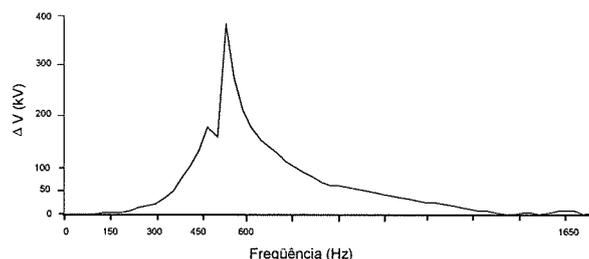


Figura 4.8 Variação da tensão em função da frequência.

A Figura 4.8 confirma a alta diferença de potencial entre os terminais para altas frequências. Em 60 Hz não há diferença de potencial entre os terminais A e B para um caso de um cabo de 20 km. Para 300 Hz a diferença é de, aproximadamente, 20 kV o que corresponde, neste caso, a uma queda de tensão de 20% ao longo do cabo, devido à alta impedância para a frequência de 5º harmônico.

Em primeira análise, é pertinente afirmar que o cabo subterrâneo por si só é um fator atenuador da componente harmônica de corrente de 5ª ordem. Porém, em capítulos seguintes é investigada uma possível ressonância para o 5º harmônico da capacitância do cabo com a indutância da rede do SIN, aqui representada pela rede de simulação.

#### 4.4.4. Comparação dos Métodos Teóricos e de Simulação

O primeiro método considera as características geométricas e físicas do cabo, tal como o raio médio geométrico, o comprimento, a distância dos cabos e o solo, a distância entre condutores e calcula a impedância total, independente da tensão ou corrente.

O segundo método considera, além das características geométricas e físicas do cabo, a tensão no terminal da fonte, para que baseado na lei de ohm, a impedância do sistema possa ser calculada.

A Figura 4.9 mostra os erros relativos entre o cálculo teórico e simulado da resposta a frequência do sistema sugerido.

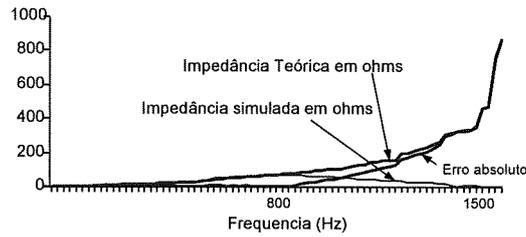


Figura 4.9 Erro entre os dois métodos – calculado e simulado.

O gráfico indica erros entre os dois métodos muito baixos para frequências até 800 Hz. Após esta frequência, o simulador não produz resultados satisfatórios. Trabalhar com o modelo de cabos no PSCAD<sup>TM</sup> em altas frequências não é aconselhável, como indica o próprio fabricante deste simulador. Porém, uma vez definido que a pesquisa deste trabalho se limita a investigar comportamento do sistema de simulação em frequências baixas de até 300 Hz, pode-se concluir que o simulador PSCAD<sup>TM</sup> possui modelo adequado para as análises propostas.

## 5- RESULTADOS OBTIDOS COM A CAMPANHA DE MEDIÇÃO E COM A REDE DE SIMULAÇÃO

### 5.1. Introdução

A campanha de medição realizada por Furnas em parceria com o ONS em 2001 [35] indicou, conforme a Figura 5.1, a predominância da corrente de 5ª harmônica drenada pelos filtros passivos ZRN e ZRC da SE Ibiúna. Embora este relatório não tenha sido conclusivo, pois através de suas constatações não foi possível precisar as origens da corrente harmônica, ficou bastante evidente a contribuição da rede elétrica para a elevação contínua do carregamento dos filtros de Ibiúna.

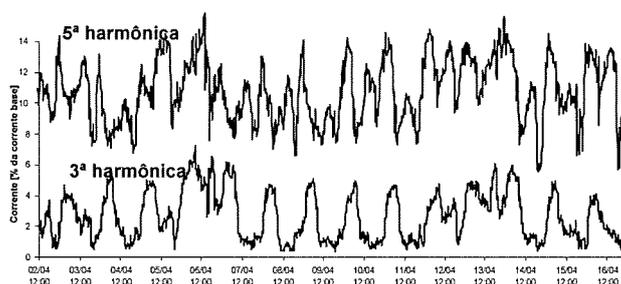


Figura 5.1 Corrente de 3ª e 5ª harmônica do filtro ZRC, ramos paralelos.

### 5.2. Objetivo

A partir da rede de simulação, apresentada no capítulo 4, e a devida validação dos modelos dos cabos subterrâneos que são de extrema importância para a pesquisa em questão, é possível realizar simulações, visando os seguintes objetivos:

- i.* Investigar o fluxo da corrente de 5º harmônico da carga até o ponto de referência, considerando os bancos de filtros ZRC, ZRN, ZRJ e ZRI (nomenclatura dada pelo fabricante) de Ibiúna. Para tal são assumidas pelo autor as condições descritas a seguir:
- ii.* A corrente harmônica de 5ª ordem está presente na rede do SIN e é representada na rede de simulação, tratada neste trabalho, por uma injeção trifásica senoidal de 300 Hz nas barras de 88 kV, que correspondem a barras de carga da concessionária AES ELETROPAULO.

- iii.* A amplitude das injeções trifásicas de corrente harmônica de 5ª ordem foi considerada a partir de duas referências: 1 – Cálculo do total de injeção de corrente de 5º harmônico produzidas por televisores [36] em função da população estimada consumidora de uma determinada subestação; 2 – A amplitude das correntes harmônicas de 5ª ordem verificada na campanha de medição.
- iv.* Investigar a relevância da amplificação de corrente harmônica em função da ressonância entre a capacitância dos bancos de capacitores paralelos e a indutância equivalente da rede elétrica, aqui representada pela rede de simulação.
- v.* Investigar a relevância da amplificação de corrente harmônica através das linhas de transmissão ou cabos subterrâneos.
- vi.* Determinar um ponto de conexão ótimo para um filtro ativo paralelo capaz de bloquear a corrente de 5ª harmônica, atenuando o efeito da mesma na rede elétrica e, conseqüentemente, nos bancos de filtros de Ibiúna, a partir das conclusões dos itens anteriores.

Para análise do comportamento da rede de simulação, alguns valores considerados têm como referência os valores obtidos nas campanhas de medição realizadas em parceria com ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), FURNAS (Furnas Centrais Elétricas S.A.), CTEEP (Transmissão Paulista) e USP (Universidade do Estado de São Paulo). Por isso foi destacada a seção seguinte deste capítulo para apresentação de alguns resultados, selecionados criteriosamente, de acordo com a necessidade e conveniência dessa pesquisa.

### **5.3. Campanha de Medição**

A campanha de medição teve o objetivo principal de determinar a magnitude e ângulo, das correntes e tensões harmônicas provenientes das cargas não lineares. Essas cargas estão conectadas a barras da rede básica ou da rede de distribuição do SIN (Sistema Interligado Nacional). As medições determinaram uma correlação entre o fluxo e ângulo das corrente harmônicas nas linhas de transmissão da rede básica e a corrente drenada pelos filtros passivos de dupla sintonia da SE Ibiúna.

Esta seção apresenta alguns resultados da campanha com o objetivo de justificar alguns valores adotados durante a pesquisa na rede de simulação utilizada neste trabalho.

Foi concluído em [35] que a causa quase exclusiva das frequentes sobrecargas harmônicas nos bancos de filtros ZRC e ZRN da SE Ibiúna era de origem sistêmica, ou seja, o somatório de várias cargas não lineares, conectadas em barras próximas a SE Ibiúna encontravam um ponto de ressonância nesta barra. Porém, não foi possível concluir mais precisamente, de modo a apontar não só a origem, mas as causas do comportamento tão irregular e imprevisível da corrente harmônica ao longo da rede elétrica e dos filtros passivos da SE Ibiúna.

Para cumprir seu objetivo fundamental e tendo em consideração a quantidade limitada de medidores (onze), a campanha foi dividida em três etapas nas quais foram alternados os locais de realização das medições.

A Figura 5.2 ilustra os pontos de medição e a movimentação dos medidores nas respectivas etapas.

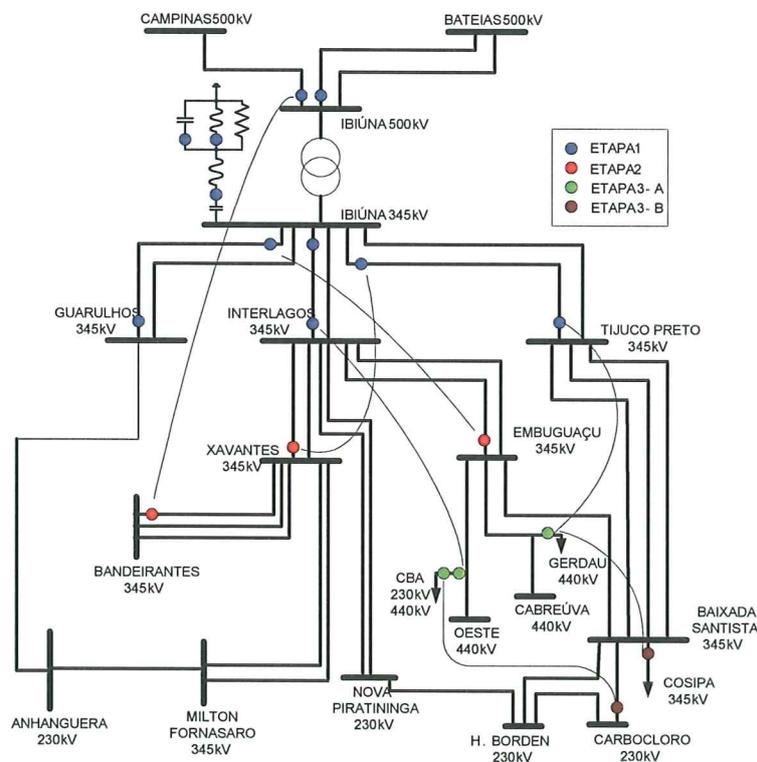


Figura 5.2 Localização dos medidores nas três etapas de medição – etapas 1, 2 e 3.

Na próxima seção são apresentados apenas os resultados de medições em locais, onde, pela campanha anterior foram identificadas as maiores correlações com a corrente harmônica nos filtros passivos ZRC e ZRN e medições, cujos valores sejam relevantes para auxílio na composição da rede de simulação e nas conclusões aqui apresentadas.

#### **5.4. Resultados da Campanha de Medição**

As medições foram realizadas em períodos de 1 semana ininterrupta. Os resultados da campanha são apresentados, separadamente, por local com os devidos comentários e conclusões, quando houver, a partir da seção seguinte. É apresentado o valor de corrente fundamental e harmônica de 3ª e 5ª ordem e seus respectivos ângulos, por apresentarem maior relevância em relação às demais. Os pontos escolhidos para esta apresentação foram:

- Ramo paralelo indutivo do filtro ZRC da SE Ibiúna
- LT 345 kV Guarulhos / Ibiúna circuito 1
- LT 345 Interlagos / Ibiúna circuito 1
- LT 345 kV Tijuco Preto / Ibiúna circuito 1
- LT 345 kV Interlagos / Xavantes circuito 1
- LT 345 kV Embu-guaçu / Interlagos circuito 1
- LT 345 kV Xavantes / Bandeirantes circuito 1

Devido a limitação de medidores, alguns circuitos tiveram suas medições realizadas em apenas um dos terminais. Cada amostragem abrange um período de 7 dias.

Apesar de, inicialmente, ser considerada a maior possibilidade de fonte “poluidora”, as indústrias de grande porte localizadas próximas a região pesquisada (CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, GERDAU, CARBOCLORO, COSIPA), não apresentou participação relevante nos valores obtidos nesta campanha.

As componentes harmônicas de correntes de 3ª e 5ª ordem apresentaram valores baixos em relação à corrente que trafega pela rede elétrica e a corrente drenada

pelos filtros passivos da SE de Ibiúna. Por isso não serão apresentadas na próxima seção. Também é apresentado gráfico de correlação entre a corrente harmônica de um determinado circuito e a corrente drenada pelo banco filtro ZRC de Ibiúna.

#### 5.4.1. Medições no Filtro Passivo ZRC da SE Ibiúna

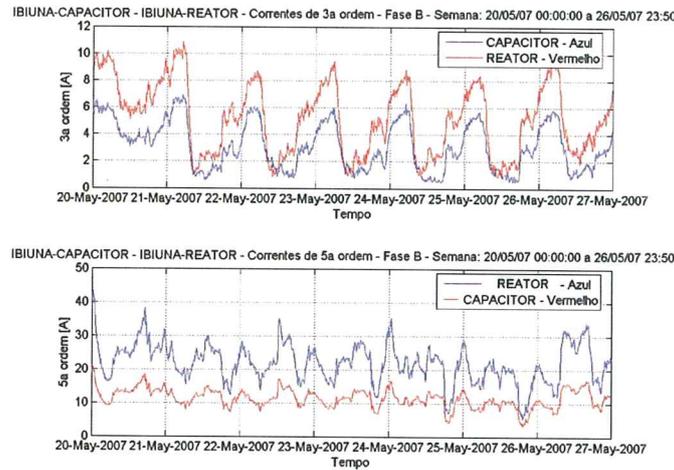


Figura 5.3 Correntes no reator e capacitor do ramo paralelo – 3ª e 5ª harmônicas.

A curva de tendência representada no gráfico da Figura 5.3 serve para observar e concluir que apesar da diferença entre corrente do capacitor e do reator ambas possuem a mesma tendência, porém a corrente de 5ª harmônica do reator é maior e por este motivo foi escolhida para todas as correlações realizadas.

#### 5.4.2. Medições na LT 345 kV Guarulhos / Ibiúna

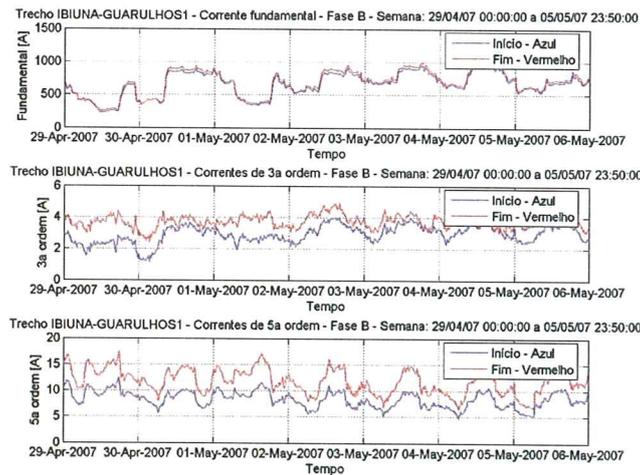


Figura 5.4 Correntes terminais à frequência fundamental, 3ª e 5ª harmônicas nos terminais da LT Guarulhos / Ibiúna.

Pela análise dos gráficos da Figura 5.4, é possível observar que o perfil das correntes fundamental e harmônicas não obedece a uma padronização definida, devido a este circuito ser considerado sistêmico, ou seja, o fluxo de potência na mesma varia em função de fatores além da carga.

Verificam-se nas correntes harmônicas, principalmente na corrente de 5ª harmônica, valores elevados em relação à fundamental e ainda que a corrente no terminal fim (vermelho) que neste caso é Ibiúna, é amplificada sensivelmente em até 50%. A Figura 5.5 ilustra a correlação existente entre as correntes harmônicas da LT Guarulhos / Ibiúna e a corrente harmônica drenada pelo filtro ZRC da SE Ibiúna.

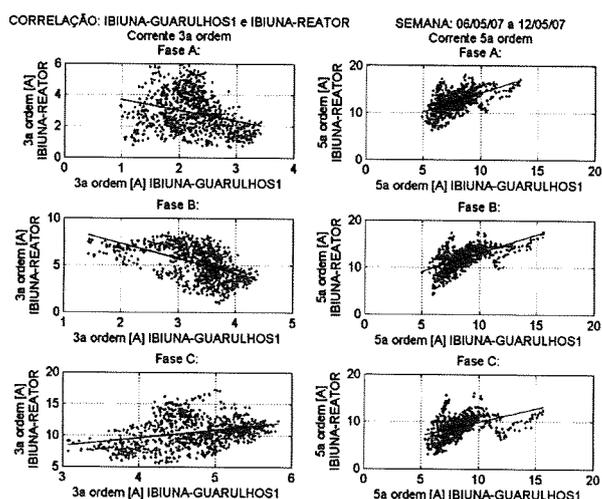


Figura 5.5 Correlações lineares entre as correntes da LT Ibiúna / Guarulhos e a do filtro ZRC.

A LT Guarulhos / Ibiúna, além de apresentar alto valor de corrente de 5ª harmônica, possui, conforme mostra Figura 5.5, correlação significativa entre esta corrente e a corrente harmônica drenada pelo filtro ZRC. A corrente de 3ª harmônica apresenta correlação inversa, ou seja, a elevação da amplitude desta corrente pelo circuito da LT Guarulhos / Ibiúna observa-se um decréscimo da corrente drenada pelo filtro.

### 5.4.3. Medições na LT 345 kV Ibiúna / Tijuco Preto

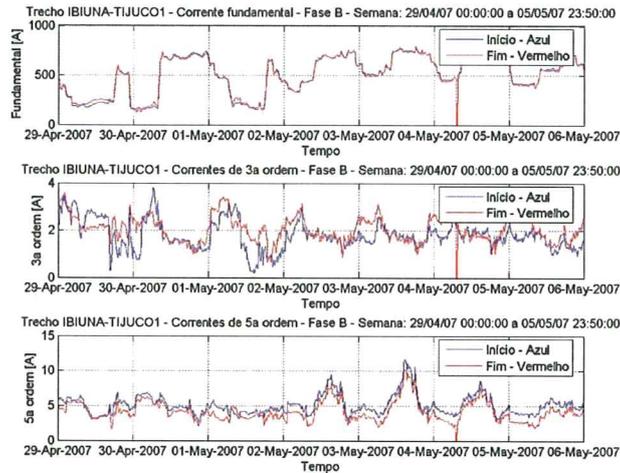


Figura 5.6 Correntes terminais - fundamental, 3ª e 5ª harmônicas na LT Ibiúna / Tijuco Preto.

Na amostragem indicada na Figura 5.6, o gráfico em azul (início) corresponde ao terminal de Ibiúna e o gráfico em vermelho (fim) corresponde ao terminal de Tijuco Preto. É possível constatar uma pequena atenuação do 3º harmônico no terminal de Ibiúna, enquanto que para o 5º, ocorre amplificação, ainda que pequena da magnitude da corrente. Não há relação definida entre as correntes harmônicas e a fundamental. Não é possível determinar padrão de comportamento para as correntes harmônicas, como é feito para a fundamental, a qual apresenta um perfil que obedece a uma padronização, mesmo se tratando de um circuito sistêmico que depende de uma série de variáveis além da carga.

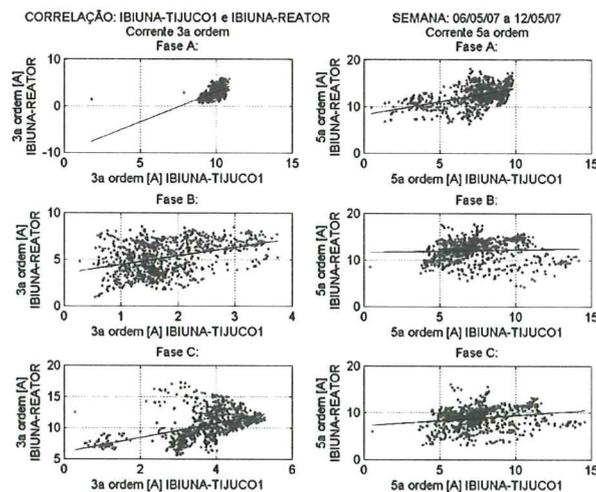


Figura 5.7 Correlações lineares entre as correntes da LT Ibiúna / Tijuco Preto e a do filtro ZRC.

A Figura 5.7 correlaciona as correntes harmônicas e a corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna é considerada baixa, ou seja, variações na corrente de 3º ou 5º harmônicas no circuito da LT Ibiúna / Tijuco Preto ocasiona pouca ou nenhuma variação na corrente drenada pelo filtro ZRC de Ibiúna.

#### 5.4.4. Medições na LT 345 kV Interlagos / Ibiúna

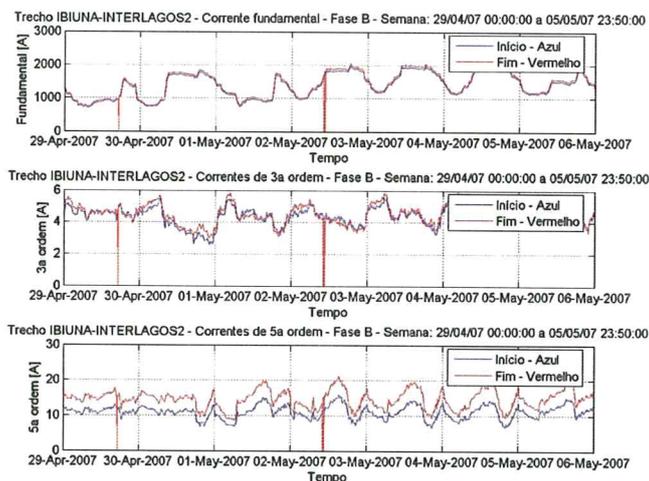


Figura 5.8 Correntes terminais - frequência fundamental, 3ª e 5ª harmônicas na LT Interlagos / Ibiúna

A Figura 5.8 apresenta gráficos de medição de corrente da LT Interlagos / Ibiúna no terminal início de Ibiúna (azul) e terminal fim de Interlagos (vermelho). As correntes fundamentais de 3ª harmônica não se alteram, porém, é observada uma atenuação significativa da componente harmônica da corrente de 5ª ordem. A contribuição das correntes harmônicas deste circuito é significativa, pois, apesar de significar apenas 1 a 2 % da corrente fundamental, apresenta amplitude média de 15 A.

A Figura 5.9 mostra como é a influência da corrente da LT Interlagos / Ibiúna na corrente drenada pelo filtro ZRC.

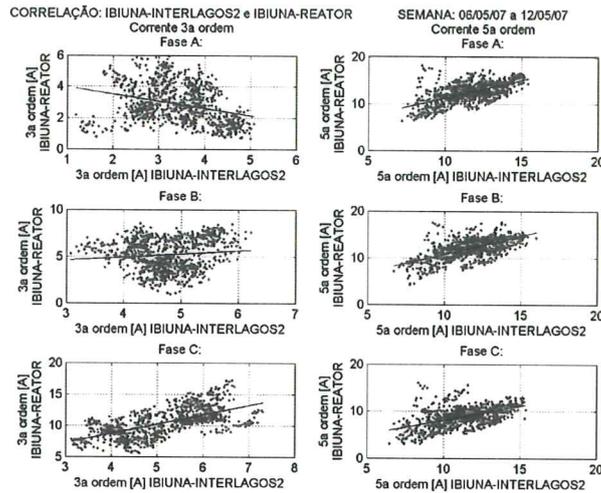


Figura 5.9 Correlações lineares entre as correntes da LT Interlagos / Ibiúna e a do filtro ZRC.

A correlação da corrente de 5ª harmônica da LT Interlagos / Ibiúna e a corrente do filtro é mais significativa do que a de 3ª harmônica. Embora esta correlação não seja muito alta, a contribuição que este circuito oferece é considerável, já que a amplitude da corrente harmônica de 5ª ordem é alta e, mesmo que variando relativamente pouco em relação à variação da corrente da linha, provoca elevação de corrente no filtro passivo da SE Ibiúna.

#### 5.4.5. Medições na LT 345 kV Interlagos / Xavantes

A partir desta seção, os gráficos apresentam medidas relativas a apenas um dos terminais de cada circuito, devido à limitação do número de medidores disponíveis. Os gráficos de correlação relacionam o circuito em questão com a LT Interlagos / Ibiúna, uma vez que é o circuito com maior valor absoluto de corrente de 5ª ordem e maior contribuição para a corrente drenada pelo filtro ZRC.

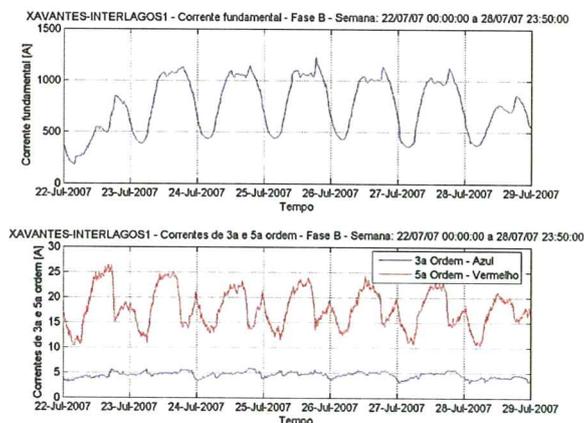


Figura 5.10 Correntes na frequência fundamental, 3ª e 5ª harmônicas na LT Interlagos / Xavantes.

O perfil da corrente fundamental e das correntes harmônicas da LT Interlagos / Xavantes, conforme indica a Figura 5.10, apresenta um tipo de padronização típica da carga do SIN, devido ao fato de a SE Xavantes ser localizada próxima a SE Bandeirantes que interliga com o sistema de distribuição em 88 kV da concessionária local (AES ELETROPAULO).

É observado que a amplitude da corrente de 5ª harmônica é sensivelmente superior à de 3ª harmônica. Embora corresponda a aproximadamente 2% da fundamental, contribui significativamente para a corrente do filtro ZRC.

Os gráficos da Figura 5.11 apresentam a correlação entre a corrente harmônica da LT Interlagos / Xavantes com a LT Interlagos / Ibiúna.

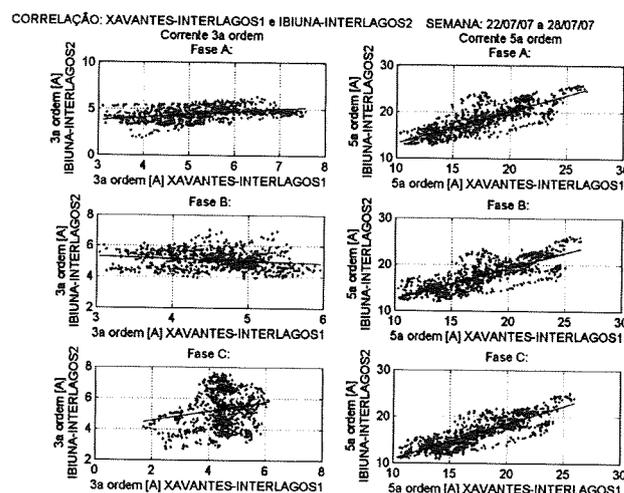


Figura 5.11 Correlação entre as correntes da LT Interlagos / Xavantes com relação às correspondentes correntes na LT Interlagos / Ibiúna.

A correlação para o 3º harmônico é baixa e, por vezes, nula ou inversa. Mas a correlação do 5º harmônica da corrente da LT Interlagos / Xavantes e da corrente da LT Interlagos / Ibiúna é alta, ou seja, a variação desta corrente que possui amplitude elevada influencia fortemente no carregamento harmônico da LT Interlagos / Ibiúna.

#### 5.4.6. Medições na LT 345 kV Interlagos / Embu-guaçu

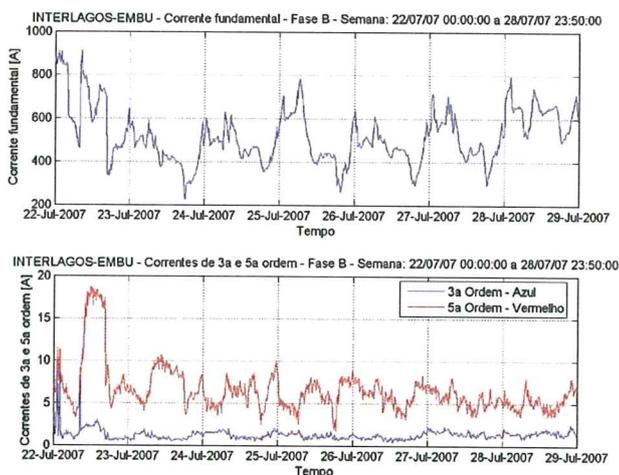


Figura 5.12 Correntes na frequência fundamental, 3ª e 5ª harmônicas na LT Interlagos / Embu-guaçu.

Este circuito, segundo o gráfico da Figura 5.12, apresenta baixo valor de componente harmônica de corrente de 5ª ordem e valores desprezíveis de 3º harmônica. A elevação componente harmônica de corrente de 5ª ordem no dia 22 de julho foi devido à alteração de configuração na rede elétrica (desligamento da LT 500 kV Ibiúna / Bateias para atender controle de tensão). A Figura 5.13 mostra a correlação desta corrente harmônica deste circuito com a corrente harmônica da LT Interlagos / Ibiúna.

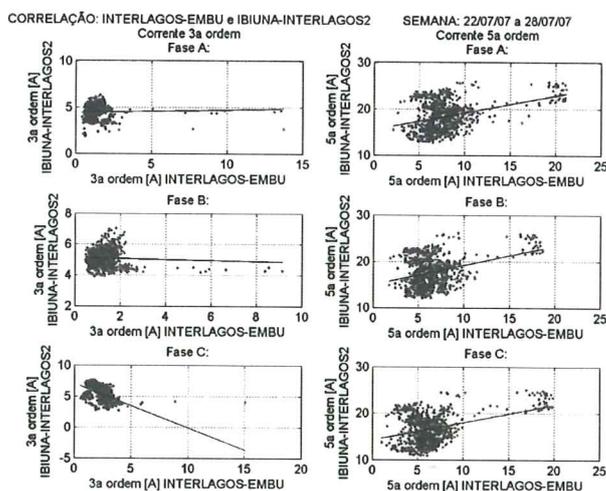


Figura 5.13 Correlação entre as correntes da LT Interlagos / Embu-guaçu com relação às correspondentes correntes na LT Interlagos / Ibiúna.

Além da componente harmônica de corrente de 5ª ordem ser baixa, a variação desta corrente no circuito da LT 345 kV Interlagos / Embu-guaçu reflete pouco na

componente harmônica de corrente de 5ª ordem da LT Interlagos / Ibiúna. A de 3ª ordem, ou não contribui ou tem influência negativa.

#### 5.4.7. Medições na LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes

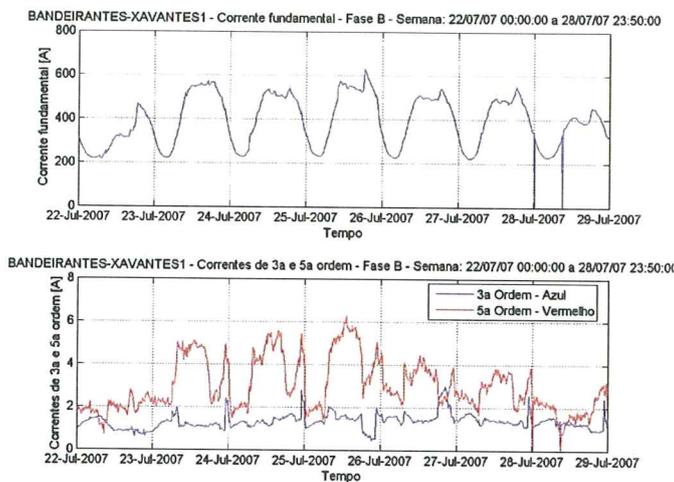


Figura 5.14 Correntes na frequência fundamental, 3ª e 5ª harmônicas na LT Bandeirantes / Xavantes.

O perfil da corrente de 5ª harmônica é apresentado pela Figura 5.14 de maneira irregular, apresentando comportamento diferente dos demais circuitos. Em curtos períodos a corrente de 3ª harmônica que tem valores reduzidos é superior à de 5ª harmônica. A análise deste gráfico, que representa a medição realizada no terminal de Bandeirantes, conforme ilustra Figura 5.15, indica baixa amplitude da corrente de 5ª harmônica, mesmo em períodos de pico. O gráfico mostrado na Figura 5.15 representa a baixa correlação entre a corrente da LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes e a corrente da LT 345 kV Interlagos / Ibiúna.

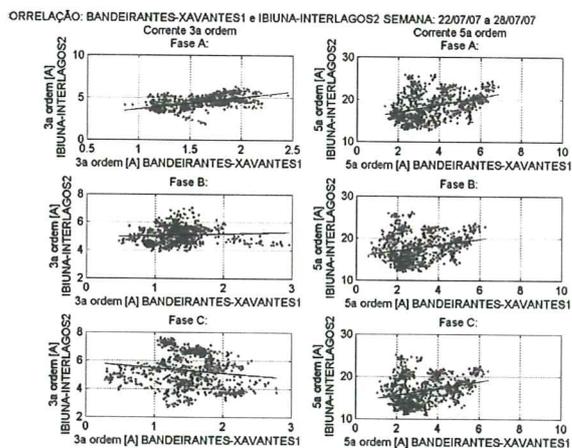


Figura 5.15 Correlação entre as correntes da LT Bandeirantes / Xavantes com relação às correspondentes correntes na LT Interlagos / Ibiúna.

#### 5.4.8. Conclusões Parciais

Como conclusão preliminar das medidas apresentadas, é pertinente afirmar:

1) A componente harmônica de corrente de 5ª ordem é muito maior que a componente de 3ª ordem, o que permite a desconsiderar a de 3ª ordem em estudos apresentados em capítulos seguintes. Baseado na afirmação número 1, a única componente harmônica de corrente trafegante considerada para efeito de estudos e análises é a de 5ª ordem.

2) Determinados circuitos apresentam maior amplitude da componente harmônica de corrente de 5ª ordem e sugerem caminhos específicos desta corrente da carga até o ponto de referência que neste trabalho é considerado o ramo paralelo indutivo do filtro passivo ZRC da SE Ibiúna.

3) Determinados circuitos apresentam maior correlação entre a sua componente harmônica de corrente de 5ª ordem e a corrente drenada pelo filtro ZRC.

4) A LT 345 kV Interlagos / Ibiúna tem maior influência no carregamento harmônico do banco de filtros ZRC.

5) Determinados circuitos apresentam maior correlação entre a sua componente harmônica de corrente de 5ª ordem e a corrente do circuito da LT Ibiúna / Interlagos.

6) Em complemento aos itens 3 a 6, é correto afirmar que a maior parte componente harmônica de corrente de 5ª ordem que é drenada pelo filtro ZRC de Ibiúna trafega a partir da carga localizada na SE Bandeirantes, através das LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes, LT 345 kV Xavantes / Interlagos e LT 345 kV Interlagos / Ibiúna.

As simulações seguintes têm como proposta investigar, com base nos dados apresentados, o comportamento dos fluxos da corrente de 5ª harmônica ao longo do sistema de transmissão. São propostas investigações de ampliações ou atenuações de corrente decorrentes do arranjo entre os elementos indutivos e capacitivos deste sistema, visando identificar o melhor ponto de conexão de um filtro ativo.

## 5.5. Resultados de Simulações na Rede Elétrica

### 5.5.1. Objetivo

Esta seção tem o objetivo de apresentar e analisar a pesquisa realizada na rede elétrica de simulação ou rede de simulação que consta do sistema apresentado na Figura 4.1. Esta simulação é realizada no PSCAD<sup>TM</sup> versão 4.2, o qual apresenta, entre outros, os seguintes resultados:

- i.* Fluxo de potência nas linhas de transmissão, ajustado nesta rede de acordo com o caso base de Novembro de 2007, disponibilizado no site do ONS ([www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), acessado em novembro de 2007).
- ii.* Tensões nas principais barras ajustadas conforme caso base de Novembro de 2007.
- iii.* Corrente fundamental e de 5<sup>a</sup> harmônica nos terminais dos circuitos representados, visando indicar o caminho percorrido na rede, identificando os pontos de ressonância e possível amplificação harmônica.

Mediante os resultados apresentados, é possível determinar, baseado nas contribuições de corrente de determinados circuitos, o ponto ideal de conexão de um filtro ativo, visando reduzir a corrente drenada pelo filtro da SE Ibiúna.

Alguns parâmetros inseridos na simulação são provenientes dos resultados apresentados na seção 5.3.

### 5.5.2. Hipóteses Consideradas

Algumas hipóteses são consideradas para condução da pesquisa realizada neste trabalho:

a) Há contribuições significativas de cargas não lineares de diversas origens, inclusive comerciais e residenciais, tais como televisores, fontes chaveadas, *dimmer*, etc.

b) Ocorre amplificação harmônica na rede, a partir de ressonância entre os bancos de capacitores paralelos utilizados para controle de tensão e correção de fator de potência e a indutância equivalente da rede do SIN.

c) Ocorre amplificação harmônica ao longo das linhas de transmissão e cabos, principalmente nas longas em função do equivalente capacitivo da linha e o comprimento de onda da corrente em 300 Hz.

d) As correntes harmônicas de ordem superior a 5 não são significativas. Uma vez que a harmônica de 3ª ordem é eliminada no próprio sistema e a de ordem par não é significativa, somente a corrente harmônica de 5ª ordem é considerada neste trabalho.

e) As variações de tensão no SIN, decorrentes de elevação ou redução de carga e / ou variação de patamares em atendimento a normas [9] constituem fatores variáveis para alteração do fluxo do 5º harmônico na rede elétrica do SIN.

f) O sistema elétrico considerado possui suas tensões entre fases equilibradas.

Uma segunda campanha de medição [11] está sendo realizada pelo ONS em parceria com a Universidade de São Paulo (USP). Nela são constatadas algumas das hipóteses descritas anteriormente e são mostradas no decorrer desta dissertação, visando também validar as simulações realizadas.

### 5.5.3. Ajuste do Fluxo de Potência e das Tensões nas Barras

O ajuste do fluxo de potência no PSCAD<sup>TM</sup> foi realizado de acordo com a equação de transmissão de potência [37].

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta \quad (5.1)$$

onde:

P - potência transmitida;

V<sub>1</sub> – tensão no terminal 1;

V<sub>2</sub> – tensão no terminal 2;

X<sub>L</sub> – reatância da linha de transmissão;

δ - ângulo entre V<sub>1</sub> e V<sub>2</sub>.

Uma vez determinadas as cargas e as impedâncias equivalentes, o ajuste do fluxo de potência foi realizado através dos ângulos das fontes. As tensões nas barras foram ajustadas através dos equipamentos de controle de tensão disponíveis na rede de simulação, tais como capacitores, reatores, tensão de gerador, ltc (tipe comutado sob carga), os quais são comumente utilizados para controle de tensão [38] na rede elétrica.

A Figura 5.16 ilustra o resultado do ajuste final do fluxo de potência e tensão nas barras da rede de simulação, utilizando o programa Anarede do CEPEL. A Figura 5.17 mostra para efeito de comparação os fluxos obtidos no caso base de Novembro de 2007 fornecido pelo ONS, no seu site [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), acessado em novembro de 2007.

Bus:	86	IBIUNA---345	Type:	PQ Area:	1	Zone:	1	Uolt:	1.020pu,	-9.94deg			
				MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
			Gen:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
			Load:	66.0	0.0		1	1					
			Shunt:	0.0	1815.5		0	0					
			DCInv:	-733.6	321.9							1.047	1
			DCInv:	-733.6	321.9							1.047	2
			DCInv:	-733.6	321.9							1.047	3
			DCInv:	-733.6	321.9							1.047	4
-----													
			ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR	
To:	48	IBIUNA---4CS	1	1	0.0	893.8	83	1.013F	0.0		CC		
To:	78	T.PRETO--345	1	1	354.1	-57.8	27				CC		
To:	78	T.PRETO--345	2	1	354.1	-57.6	27				CC		
To:	97	GUARU-2--345	2	1	487.0	20.7	28				CC		
To:	97	GUARU-2--345	1	1	487.0	20.7	28				CC		
To:	122	IBIUNA---500	2	1	-161.5	-221.7	36	1.000F	0.0		CC		
To:	122	IBIUNA---500	1	1	-161.5	-221.7	36	1.000F	0.0		CC		
To:	488	INTERLAG-345	2	4	754.7	75.8	37				CC		
To:	488	INTERLAG-345	1	4	754.7	75.8	37				CC		
Bus:	78	T.PRETO--345	Type:	PQ Area:	1	Zone:	1	Uolt:	1.024pu,	-14.54deg			
				MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
			Gen:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
			Load:	0.0	0.0		0	0					
			Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----													
			ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR	
To:	76	T.PRETO--765	5	1	-767.5	-120.2	51	1.077F	0.0		CC		
To:	76	T.PRETO--765	7	1	0.0	0.0	0	1.077	0.0		00		
To:	76	T.PRETO--765	6	1	-767.5	-120.2	51	1.077F	0.0		CC		
To:	81	TPFIC345-8T4	4	1	-750.8	-117.6	49	1.077F	0.0		CC		
To:	86	IBIUNA---345	2	1	-352.4	17.1	27				CC		
To:	86	IBIUNA---345	1	1	-352.4	17.2	27				CC		
To:	449	ITAPETI--345	2	4	605.9	39.1	50				CC		
To:	449	ITAPETI--345	1	4	605.9	39.1	50				CC		
To:	464	LESTE----345	3	4	193.5	-23.4	21				CC		
To:	464	LESTE----345	2	4	204.0	-23.3	22				CC		
To:	464	LESTE----345	1	4	201.9	-22.9	22				CC		
To:	471	BAIXADA--345	3	4	364.6	100.1	40				CC		
To:	471	BAIXADA--345	2	4	407.4	107.4	35				CC		
To:	471	BAIXADA--345	1	4	407.4	107.4	35				CC		
Bus:	488	INTERLAG-345	Type:	PQ Area:	4	Zone:	1	Uolt:	1.006pu,	-15.34deg			
				MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
			Gen:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
			Load:	0.0	0.0		0	0					
			Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----													
			ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR	
To:	86	IBIUNA---345	1	1	-750.2	-43.3	37				CC		
To:	86	IBIUNA---345	2	1	-750.2	-43.3	37				CC		
To:	489	INTERL-1-230	1	4	110.6	18.3	22	1.000F	0.0		CC		
To:	490	INTERL-2-230	1	4	110.4	18.2	22	1.000F	0.0		CC		
To:	491	XAVANTES-345	2	4	314.0	28.5	13				CC		
To:	491	XAVANTES-345	1	4	314.0	28.5	13				CC		
To:	582	EMBUGUACU345	2	5	325.7	-3.4	36				CC		
To:	582	EMBUGUACU345	1	5	325.7	-3.4	36				CC		

Bus: 491	XAVANTES-345	Type: PQ	Area: 4	Zone: 1	Volt: 1.005pu, -15.69deg							
		Gen:	MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
		Load:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
		Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----												
		ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)	(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR
To: 488	INTERLAG-345	1	4	-313.9	-32.1	13				CC		
To: 488	INTERLAG-345	2	4	-313.9	-32.1	13				CC		
To: 492	BANDEIRA-345	3	4	140.6	19.3	28				CC	0.0	-100.8
To: 492	BANDEIRA-345	2	4	140.6	19.3	28				CC	0.0	-100.8
To: 492	BANDEIRA-345	1	4	140.6	19.3	28				CC	0.0	-100.8
To: 495	M.FORNAS-345	2	4	103.0	3.2	9				CC		
To: 495	M.FORNAS-345	1	4	103.0	3.2	9				CC		
Bus: 495	M.FORNAS-345	Type: PQ	Area: 4	Zone: 1	Volt: 1.005pu, -16.06deg							
		Gen:	MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
		Load:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
		Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----												
		ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)	(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR
To: 439	ANHANG---345	1	4	-151.0	-118.6	11				CC		
To: 439	ANHANG---345	2	4	0.0	0.0	0				00		
To: 491	XAVANTES-345	2	4	-103.0	-11.5	9				CC		
To: 491	XAVANTES-345	1	4	-103.0	-11.5	9				CC		
To: 496	M.FORNAS--88	3	4	119.1	47.3	32	0.985R	0.0		CC		
To: 496	M.FORNAS--88	2	4	118.5	47.0	32	0.985R	0.0		CC		
To: 496	M.FORNAS--88	1	4	119.3	47.3	32	0.985R	0.0		CC		
Bus: 439	ANHANG---345	Type: PQ	Area: 4	Zone: 1	Volt: 1.008pu, -15.87deg							
		Gen:	MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
		Load:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
		Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----												
		ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)	(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR
To: 97	GUARU-2--345	1	1	-289.4	-26.1	12				CC		
To: 97	GUARU-2--345	2	1	-289.4	-26.1	12				CC		
To: 431	ANHANG---230	1	4	341.1	-39.9	68	1.000F	0.0		CC		
To: 444	ANHANG---88	2	4	43.3	-11.8	11	1.000	0.0		CC		
To: 444	ANHANG---88	1	4	43.3	-11.8	11	1.000	0.0		CC		
To: 495	M.FORNAS-345	2	4	0.0	0.0	0				00		
To: 495	M.FORNAS-345	1	4	151.0	115.7	11				CC		
Bus: 425	TRCEN-1--230	Type: PQ	Area: 4	Zone: 1	Volt: 1.010pu, -19.05deg							
		Gen:	MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
		Load:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
		Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----												
		ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)	(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR
To: 427	CENTRO---230	1	4	42.1	-73.9	21				CC		
To: 431	ANHANG---230	1	4	-42.1	73.9	26				CC		
Bus: 426	TRCEN-2--230	Type: PQ	Area: 4	Zone: 1	Volt: 1.010pu, -19.05deg							
		Gen:	MW	MVAR	Code	On	Max	PMax	QMin	QMax	Tap	Bp
		Load:	0.0	0.0		0	0	0.0	0.0	0.0		
		Shunt:	0.0	0.0		0	0					
-----												
		ID	Are	Flow(MW)	Flow(MVAR)	(%/U)	Tap	Phs(dg)	U0(pu)	Bk	ShF_MVAR	ShT_MVAR
To: 427	CENTRO---230	1	4	42.1	-73.9	21				CC		
To: 431	ANHANG---230	1	4	-42.1	73.9	26				CC		

Figura 5.16 Fluxos de potência, tensão e ângulos nas barras fornecidos pelo caso base.

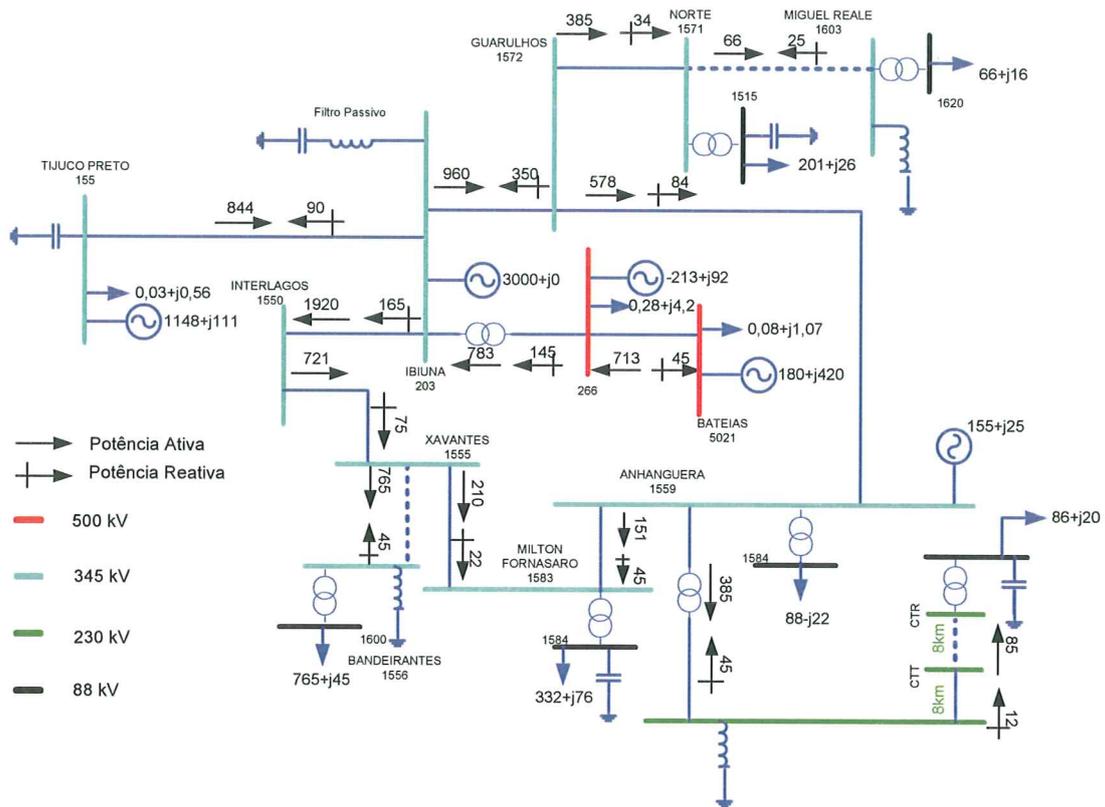


Figura 5.17 Rede de simulação e os fluxos e tensões ajustados.

#### 5.5.4. Ajuste da Fonte de Corrente de 5ª Harmônica

Baseado em [11]-[35], pode-se afirmar que parte do somatório de correntes harmônicas, proveniente de diversas cargas, distribuídas de forma não conhecida pelo sistema de distribuição, resulta na corrente drenada pelos filtros de Ibiúna, que é o ponto de referência para este trabalho.

De acordo com uma das conclusões da seção 5.3, é considerada apenas a influência da 5ª harmônica de corrente que é representada por uma fonte de corrente trifásica senoidal conectadas em barras notáveis por sua alta concentração de carga não linear.

A amplitude da corrente de cada fonte foi baseada em estimativa do somatório da corrente de 5ª harmônica, oriunda dos aparelhos de televisores [36], fonte de harmônicos comprovada, cujo componente harmônica de 5ª ordem consumida por estes aparelhos corresponde a 40% da componente fundamental. Para estabelecer o valor da amplitude foi formulada a seguinte equação:

$$I_5 = P \times NT \times pC \times RT \times FC / V \quad (5.2)$$

onde:

$I_5$  – corrente da fonte de 5ª harmônica

P – potência média de um televisor

NT – número de televisores ligados

pC – percentual da corrente de 5ª harmônica na fundamental

RT – relação de transformação da corrente (quadrática)

FD – fator de carga

V – tensão de alimentação do televisor.

A estimativa da carga de televisores foi realizada calculando o número de clientes da concessionária ELETROPAULO. A relação consumidor/MW pode ser obtida em [39]. A SE Bandeirantes, com capacidade instalada de 1650 MVA e operando com demanda média de 950 MVA, corresponde a atendimento a população de 1,450 milhões de habitantes [39], uma vez que esta área é tipicamente residencial. Considerando a média de 1 televisor por cada 3 habitantes, é estimado um valor total de 150 mil televisores instalado com fator de típico de demanda de 70% [40]. Com a relação de transformação (RT) igual a:

$$RT = \left( \frac{110}{345.000} \right)^2 = 1,562.10^{-6} \quad (5.3)$$

Utilizando a equação (5.2), é obtido o resultado de  $I_5 = 5$  A na LT 345 kV Bandeirantes / Xavantes. Este resultado é compatível com a medição apresentada na Figura 5.14. O método apresentado e a equação (5.2) são utilizados para calcular a amplitude das demais fontes de corrente mostrada na Tabela 5.1. O resultado é projetado para o lado de 88 kV, multiplicado pelo número de circuitos e acrescido de 30% como fator de crescimento da carga.

Tabela 5.1 Relação das amplitudes das fontes de 5ª harmônica.

<b>Barra da fonte de 5ª harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>
Bandeirantes – 88 kV	80
Miguel Reale – 88 kV	25
Anhanguera – 88 kV	22
Centro – 88 kV	65
Norte – 88 kV	42

### 5.5.5. Correntes Harmônicas ao Longo da Rede de Simulação

Nesta seção, é apresentado o comportamento da amplitude da componente harmônica de corrente de 5ª ordem ao longo da rede de simulação, através de medição nos extremos das linhas de transmissão, em função da variação da carga nas barras de carga e da variação do perfil de tensão decorrente de chaveamento dos reatores e capacitores paralelos apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5. É mostrada também a variação da tensão fundamental em determinadas barras.

A simulação foi realizada em um período de 10,5 s, com intervalos de 0,5 s para cada chaveamento, entendendo que  $t = 0,5s$  é suficiente para o sistema retornar ao regime permanente após o transitório inerente ao chaveamento e a alteração da configuração da rede.

A Tabela 5.2 traz a relação dos chaveamentos programados realizados ao longo da simulação. A última coluna representa o número da chave modelada no simulador.

Tabela 5.2 Manobras de chaveamento de equipamentos paralelos e carga.

Nº Evento	Tempo (em segundos)	Equipamento		BRK
1	0,5	RT BANDEIRANTES	L	1
2	1,0	RT NORTE	L	2
3	1,5	RT BANDEIRANTES	L	3
4	1,5	CAP NORTE	L	11
5	2,0	RT BANDEIRANTES	L	4
6	2,5	RT TIJUCO PRETO	L	5
7	3,0	RT ANHANGUERA	L	16
8	3,0	CAP TIJUCO PRETO	L	6
9	4,0	CARGA BANDEIRANTES	L	7
10	4,0	CAP TIJUCO PRETO	L	7
11	4,5	RT BANDEIRANTES	D	1
12	4,6	RT BANDEIRANTES	D	3
13	5,0	CARGA NORTE	L	8
14	5,5	RT NORTE	D	2
15	6,0	CARGA M.REALE	L	9
16	6,5	CARGA ANHANGUERA	L	10
17	7,0	RT TIJUCO PRETO	D	5
18	8,0	CAP TIJUCO PRETO	L	12
19	8,5	CAP TIJUCO PRETO	L	13
20	9,0	RT BANDEIRANTES	D	4
21	9,5	CAP TIJUCO PRETO	L	14
22	10,0	RT ANHANGUERA	L	16
23	10,0	CAP TIJUCO PRETO	D	14
24	10,5	CAP CENTRO	D	15

L - Ligado      D - Desligado

BRK – Identificação da chave do simulador

RT – Reator

CAP – Capacitor

A Figura 5.18 mostra as variações significativas das grandezas monitoradas na rede de simulação em função dos chaveamentos.

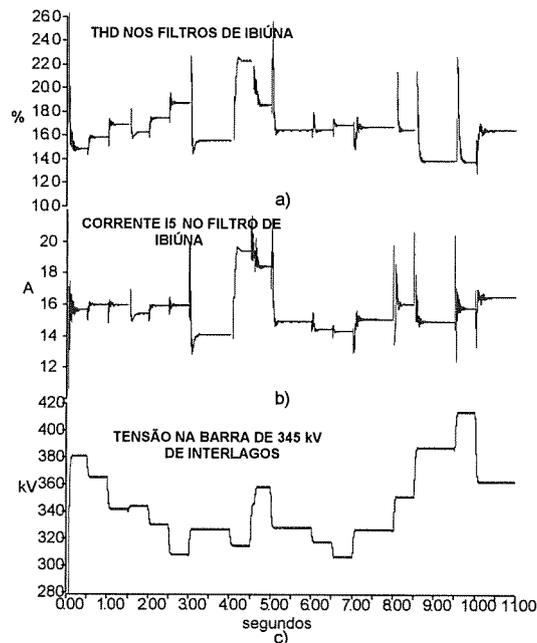


Figura 5.18 a) Variação do DHT no filtro de Ibiúna. b) Variação da corrente drenada pelo filtro de Ibiúna. c) Variação da tensão na barra de Interlagos.

As variações da tensão fundamental, em função das manobras descritas na Tabela 5.2, correspondem valores muito próximos aos observados na rede elétrica. Para esta rede de simulação, é correto considerar que a tensão na barra de 345 kV de Interlagos é proporcional à tensão das demais barras, não sendo aqui necessária, portanto, a representação da variação de tensão de todas as barras. Procura-se representar durante os 11 segundos de simulação as variações típicas em regime ao longo das 24 horas. As tensões acima de 1,05 pu podem ser explicadas pela falta de modelagem adequada dos controladores de tensão tais como compensadores síncronos e unidades geradoras.

Observando os gráficos da Figura 5.18, constata-se que não há relação direta entre a variação da tensão fundamental e a corrente drenada pelo filtro passivo. Porém nota-se, por exemplo, no instante  $t = 8s$ , após chaveamento de um banco de capacitores de 200 Mvar elevação da corrente no filtro passivo, e em  $t = 8,5s$  após chaveamento de outro banco de capacitores uma redução da corrente no filtro passivo, indicando alteração do ponto de ressonância. A alteração do ponto de ressonância é apenas um dos fatores que contribuem para a elevação ou redução do fluxo de corrente harmônica na rede. Outro fator determinante, da variação da componente harmônica de 5ª ordem é a forma como a mesma se comporta em função da sua amplificação ou atenuação através

das linhas de transmissão decorrente também de ressonância entre a indutância da rede e a capacitância dos capacitores derivação. A seguir são apresentados gráficos obtidos a partir das alterações na rede de simulação que indicam o valor eficaz da corrente de 5ª harmônica em ambos os terminais das linhas de transmissão em função do chaveamento apresentado na Tabela 5.2. A Figura 5.19 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Guarulhos / Ibiúna e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

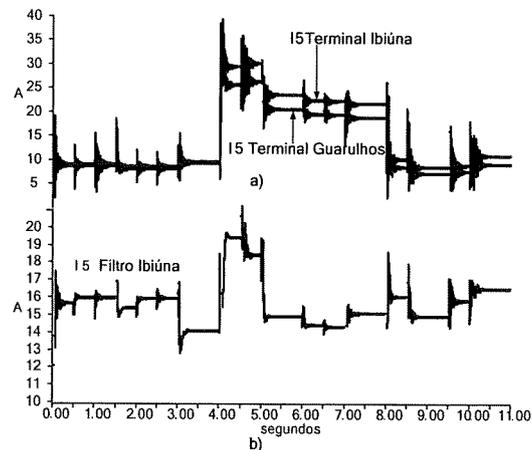


Figura 5.19 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Guarulhos / Ibiúna - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

Em  $t = 4s$  até  $t = 8s$ , observa-se a corrente no terminal de Ibiúna amplificada em valores superiores a 10 %. Embora tenha sido um resultado abaixo do valor obtido na campanha de medição [11], descrita na seção 5.4, pode-se afirmar que houve elevação significativa da corrente, mas somente em condições topológicas especiais. A Figura 5.20 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Ibiúna / Tijucd Preto e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

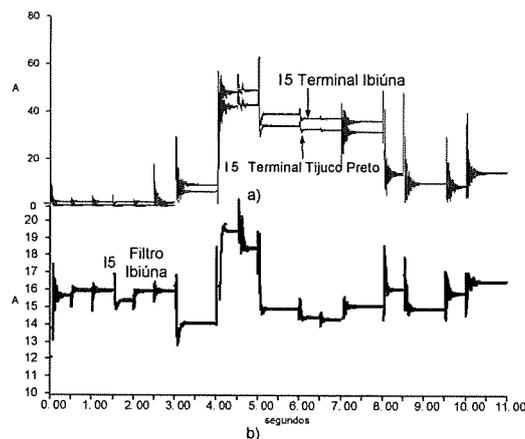


Figura 5.20 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Ibiúna / Tijuco Preto - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

A corrente de 5ª harmônica que flui pela LT 345 kV Ibiúna / Tijuco Preto apresenta valores iniciais de 3 a 4 A, o que corresponde aos valores encontrados na campanha de medição da seção 5.4. A partir do instante  $t = 4s$ , a corrente aumenta consideravelmente, porém a amplificação ao longo do circuito é insignificante, similar ao que foi mostrado na figura 4.5.

A Figura 5.21 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Interlagos / Ibiúna e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

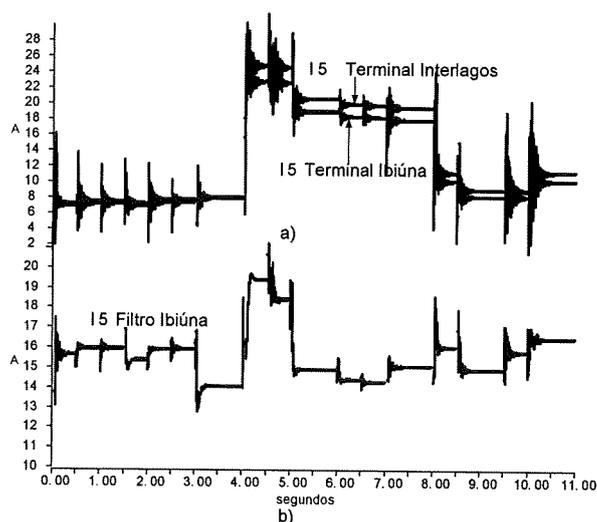


Figura 5.21 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Interlagos / Ibiúna - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

Durante alguns instantes se observa elevação máxima de 2 A ao longo do circuito, sendo maior no terminal de Interlagos, de modo que o resultado é coerente com o obtido na campanha de medição apresentada na seção 5.4, o que se pode considerar desprezível, pois corresponde apenas 5% da corrente total deste circuito e para apenas algumas condições topológicas.

A Figura 5.22 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Interlagos / Xavantes e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

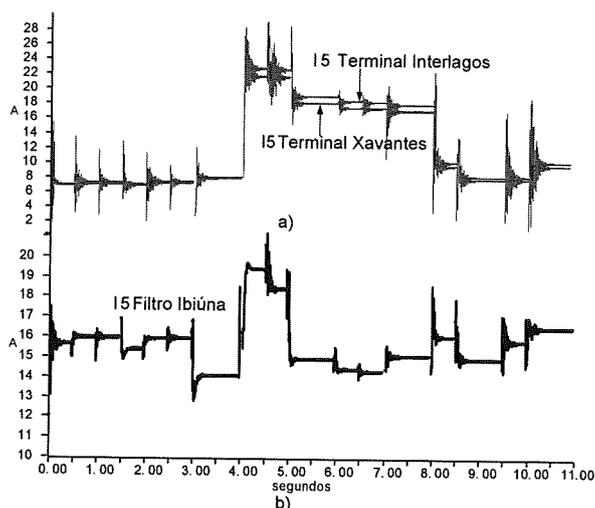


Figura 5.22 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Interlagos / Xavantes - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

No caso da LT 345 kV Interlagos / Xavantes não foi observada diferença significativa entre as correntes nos terminais. Este resultado não é comparado com a medição da campanha de medição da seção 5.4, pois não houve medição simultânea nestes terminais.

A Figura 5.23 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Norte / Miguel Reale e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

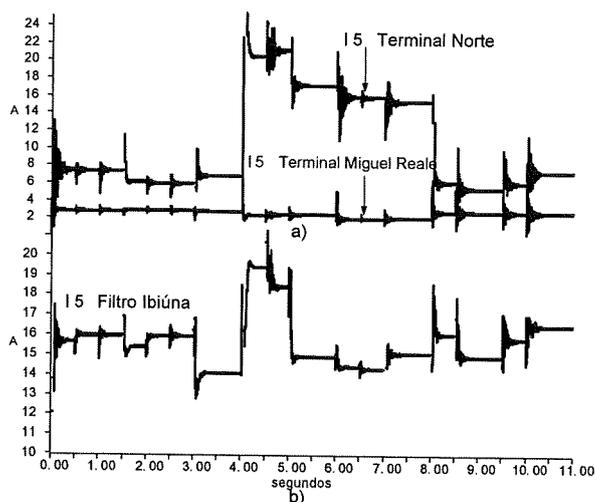


Figura 5.23 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Norte / Miguel Reale - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

Os resultados da simulação para o circuito duplo da LT 345 kV Norte / Miguel Reale, que são constituídos de cabos subterrâneos apresentam características diferentes

dos resultados referentes às linhas aéreas. Para determinada configuração de equipamentos paralelos e cargas conectadas a corrente através do cabo se eleva em até 10 vezes, porém, não foi possível a comparação com os resultados da campanha de medição da seção 5.4. A partir do instante  $t = 4s$ , quando é conectado um banco de capacitores paralelos na SE Tijuco Preto, a corrente no terminal de Norte se eleva e se mantém até o instante  $t = 8s$ , onde também é ligado outro banco de capacitores paralelos na SE Tijuco Preto. É interessante observar que, embora a corrente se mantenha elevada a partir de  $t = 4s$ , com correspondente elevação da corrente no filtro passivo em torno de 33 %, no instante  $t = 5 s$ , após realização de outras manobras, a corrente do filtro passivo volta a seu valor do instante  $t = 0$ , embora a corrente no terminal da SE Norte, se mantenha elevada.

A Figura 5.24 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 230 kV Centro / CTT e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

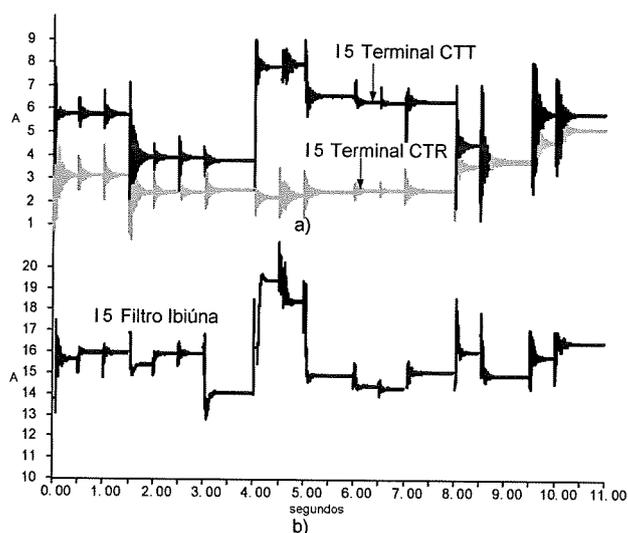


Figura 5.24 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 230 kV Centro / CTT - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

O resultado da simulação referente aos cabos de 230 kV Centro / CTT indica, dependendo da topologia e condição de carga alternância na relatividade do valor rms das correntes nos terminais de Centro e CTT. Até o instante  $t = 4s$ , a corrente no terminal de CTT é superior ao terminal de Centro. A partir de  $t = 4s$ , a corrente em CTT eleva em até 8 vezes o valor do terminal em Centro.

A Figura 5.25 mostra os valores rms a) da corrente de 5ª harmônica dos terminais da LT 345 kV Xavantes / Bandeirantes e b) da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna.

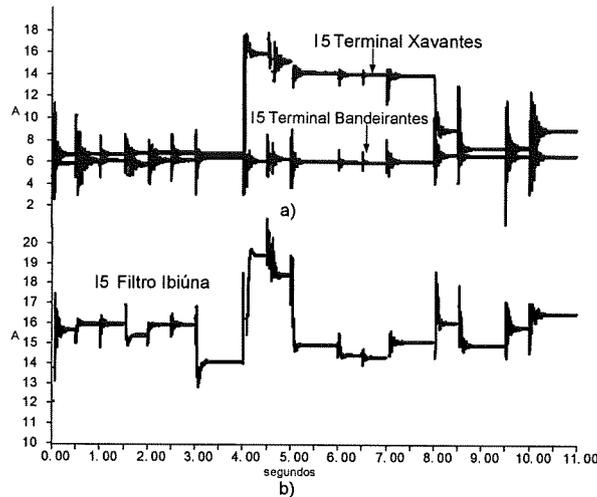


Figura 5.25 a) Corrente de 5ª harmônica nos terminais da LT 345 kV Xavantes / Bandeirantes - b) Corrente drenada pelo filtro passivo.

A exemplo dos demais cabos, é observada amplificação significativa da corrente ao longo do circuito da LT 345 kV Xavantes / Bandeirantes. Neste caso, para a configuração apresentada, é verificada, no intervalo de  $t = 4$  s a  $t = 8$  s, amplificação de até 10 vezes da corrente do terminal da SE Xavantes em relação ao terminal da SE Bandeirantes. Neste intervalo, há chaveamento de equipamentos paralelos e de carga e a corrente de 5ª harmônica no terminal da SE Xavantes se eleva em  $t = 4$  s e se mantém elevada até  $t = 5$  s, retornando ao seu valor próximo ao inicial após este instante, mesmo com a corrente de 5ª harmônica alta no terminal da SE Xavantes. O fato de a corrente no terminal do circuito ser elevada e a corrente do filtro ser reduzida tem explicação provável ao se analisar os ângulos relativos das correntes e a soma entre os fasores de corrente.

#### 5.5.6. Bloqueio das Fontes de 5ª Harmônica

O objetivo desta seção é determinar o melhor ponto de conexão de um filtro ativo que tenha função de bloquear a corrente em ponto mais próximo possível da distribuição, de tal forma que reduza significativamente a corrente de 5ª harmônica drenada pelo filtro passivo.

Para isso, é isolada individualmente cada fonte e observada qual delas mais contribui na corrente do filtro. Então são isoladas as fontes das barras de 88 kV das SE Miguel Reale, Centro e Bandeirantes. A retirada das fontes de Norte e Anhanguera não foi considerada nesta etapa da simulação por não representar alteração significativa na corrente de 5ª harmônica dos filtros da SE Ibiúna.

Os resultados apresentados a seguir, indicam a componente harmônica de corrente de 5ª ordem, sendo drenada pelo filtro passivo após o bloqueio de cada fonte de corrente, obedecendo a mesma sequência de chaveamento apresentada na seção 5.5.5.

A Figura 5.26 mostra a curva da corrente do filtro passivo após bloqueio da fonte da SE Miguel Reale.

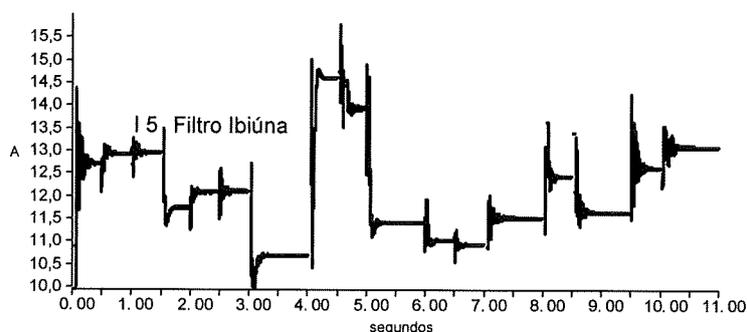


Figura 5.26 Corrente do filtro passivo sem a fonte de 5ª harmônica de Miguel Reale.

Este resultado apresenta redução média da corrente drenada pelo filtro passivo de 25% em relação à condição da rede completa. A Figura 5.27 mostra a curva da corrente do filtro passivo após bloqueio da fonte da SE Centro.

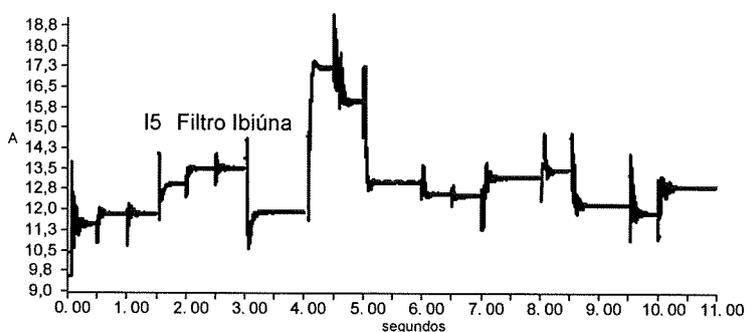


Figura 5.27 Corrente do filtro passivo sem a fonte de 5ª harmônica da SE Centro.

Este resultado apresenta redução média da corrente drenada pelo filtro passivo de 35% em relação à condição de rede completa. A Figura 5.28 mostra a curva da corrente do filtro passivo após bloqueio da fonte da SE Bandeirantes.

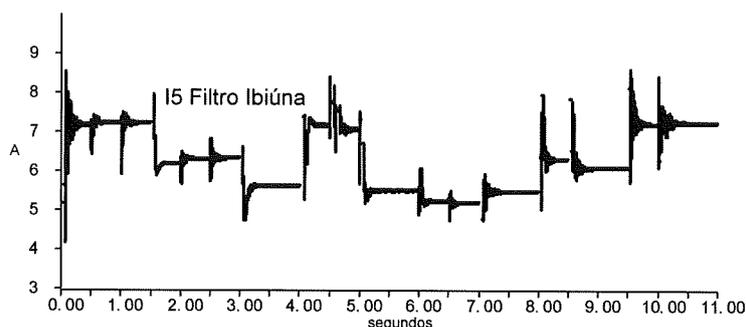


Figura 5.28 Corrente do filtro passivo sem a fonte de 5ª harmônica da SE Bandeirantes.

Este resultado apresenta redução média da corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna de 76% em relação à condição de rede completa. O bloqueio das demais fontes de corrente não proporcionou redução no filtro passivo da SE Ibiúna.

#### 5.5.7. Conclusões Parciais

Os resultados simulados quando comparados com os resultados medidos apresentaram coerência de valores entre si. Os circuitos aéreos possuem características tal que, mesmo considerando diferenças entre a configuração entre a rede elétrica e a rede de simulação, a componente harmônica de corrente 5ª ordem ao longo dos circuitos apresentam valores próximos, validando, assim, os resultados obtidos.

Os circuitos subterrâneos, devido a sua característica, se comportam de forma diferente dos cabos aéreos, apresentando alta amplificação da componente harmônica de corrente de 5ª ordem em função da alteração da configuração da rede simulação. Estes resultados, no entanto, não puderam ser comparados com os resultados medidos na campanha de medição da seção 5.4, devido à ausência de leitura em alguns terminais. Ao longo da rede de simulação, foi observada variação dos valores da componente harmônica de corrente em função da alteração da configuração que resultou em alterações da corrente total drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna. Uma vez que a corrente drenada pelo filtro passivo da SE Ibiúna é a soma vetorial entre as correntes nas linhas de transmissão conectadas as esta subestação, nem sempre correntes com

amplitudes elevadas convergentes para o mesmo nó elétrico resultam em corrente total elevada drenada pelo filtro conectado neste nó elétrico.

A corrente de 5ª harmônica teve seu comportamento analisado, através da rede de simulação, cujos resultados mostraram variações que puderam revelar uma amplificação da componente harmônica de corrente de 5ª ordem, devido à combinação entre a indutância equivalente da rede e a capacitância dos capacitores paralelos e dos cabos subterrâneos.

Mediante os resultados das simulações realizadas na seção 5.5.5, é observada redução significativa da corrente drenada pelo filtro passivo quando da retirada individual da fonte de corrente de cada estação.

Como conclusão final deste capítulo pode-se afirmar que os resultados sugerem, confirmando expectativas iniciais, que o fluxo harmônico na rede, depende da configuração da rede elétrica e se altera de forma não proporcional.

Constata-se a maior contribuição da componente harmônica de corrente de 5ª ordem a partir da SE Bandeirantes, visto que, quando a fonte é bloqueada, a componente harmônica de corrente de 5ª ordem do filtro passivo da SE Ibiúna tem redução média de 76 %. Isso garante manutenção da corrente no filtro passivo em valores abaixo do nominal para toda a configuração de capacitores e reatores paralelos experimentada na rede elétrica. Este resultado indica que o melhor local para instalação do filtro ativo é na SE Bandeirantes, pois para o bloqueio das demais fontes, a redução da corrente do filtro passivo, não é suficiente para que em todas as configurações apresentadas, garantir a manutenção do valor desta corrente abaixo do nominal.

O próximo capítulo é dedicado ao estudo da especificação de um filtro ativo paralelo, e a viabilização da conexão do mesmo na barra de 88 kV da SE Bandeirantes.

## 6- CÁLCULOS RELATIVOS AO FILTRO ATIVO E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

### 6.1. Objetivo

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os cálculos dos capacitores do elo CC, dos capacitores de *ripple* e do ganho do controlador PI utilizado.

Neste capítulo será apresentada a estratégia de controle completa, introduzida no capítulo 3, considerando o controle de tensão no capacitor CC e o chaveamento PWM. Após a realização dos cálculos e determinação da estratégia de controle o filtro ativo paralelo é conectado a rede de simulação quando são realizados os últimos ajustes de controle.

Por fim, este capítulo objetiva apresentar os resultados de simulação, mostrando o desempenho do filtro ativo paralelo conectado à rede e a redução da componente harmônica de corrente no filtro passivo da SE Ibiúna.

### 6.2. Cálculo do Capacitor do Elo CC

O sistema proposto adota como única grandeza medida a tensão na barra de 88 kV da SE Bandeirantes, chamada, neste trabalho de  $V_L$ .

A potência do filtro pode ser calculada com a tensão fase-fase da barra no qual está conectado e a corrente que é drenada pelo mesmo, conforme cálculo seguinte:

$$\begin{aligned} S_{\text{Filtro}} &= V_{\text{fase-fase rms}} \times I_{\text{Drenada}} \times \sqrt{3}; \\ S_{\text{Filtro}} &= 88 \text{ kV} \times 80 \text{ A} \times \sqrt{3} \\ S_{\text{Filtro}} &= 12,19 \text{ MVA} \end{aligned} \tag{6.1}$$

A corrente refletida no lado de baixa do transformador de acoplamento  $I_{\text{Drenada}}$  é alta (16 kA) o que demandaria arranjos especiais de chaves IGBT's.

Uma vez determinada a potência do filtro e baseado no fator de unidade de constante de capacitância – UCC [41], é possível determinar a capacitância do elo CC do conversor.

UCC significa o tempo necessário para descarregar o capacitor, ou seja, uma vez carregado, o capacitor se mantém com energia suficiente para realização do trabalho no tempo igual a 1 UCC.

Para este projeto foi escolhido o UCC de 1 ciclo em 300 Hz. Isto significa que o capacitor quando é carregado na tensão nominal de referência, este tem uma quantidade de energia para suprir teoricamente a potência média do filtro ativo somente por 3,34 ms até sua descarga completa.

A tensão  $V_{CC}$  considerada é de 800 V, aproximadamente o dobro do valor da tensão do lado de baixa do transformador de acoplamento (88 kV / 0,44 kV), visando evitar a perda de controlabilidade.

O cálculo seguinte determina o capacitor a ser utilizado no elo CC.

$$UCC = \frac{CV^2}{2.S};$$

$$C = \frac{UCC \times 2 \times S}{V^2}; \quad (6.2)$$

$$C = \frac{1}{300} \times 2 \times 12,19 \times 10^{-6};$$

$$C = 126.980 \mu\text{F}$$

### 6.2.1. Cálculo do Ganho G

O ganho G representa a condutância necessária para determinação da corrente de controle  $i_C$  de acordo com a equação (6.3), sendo  $V_5'$  o sinal gerado a partir da detecção de  $V_L$ , mostrado no capítulo 3.

$$i_C = V_5' \times G. \quad (6.3)$$

O ganho G foi obtido de forma experimental, verificando a proporcionalidade entre grandeza  $V_5'$  gerada pelo sistema de detecção e corrente  $I_H$  gerada pela fonte de corrente, ambos no eixo  $\alpha \beta$ . O valor de G é obtido através da equação (6.4).

$$G = \frac{I_H}{V_5'}; \quad (6.4)$$

$$G = 0,0065 \Omega.$$

Em um sistema real essa relação poderia ser obtida através de  $I_H$  observada na campanha de medição.

### 6.2.2. Cálculo do Capacitor Atenuador de Ripple

O chaveamento tipo PWM (Pulse Width Modulation) [36]-[42] trouxe vantagens aos inversores de potência, principalmente no que diz respeito à formação dos harmônicos característicos que passam a ser, em função da alta frequência de chaveamento, de elevada ordem, sem prejuízo aos sistemas de potência.

Porém, esta frequência elevada ocasiona ripple no lado CA, o qual deve ser eliminado com a conexão de capacitores em paralelo a reatância de acoplamento, no caso deste projeto representado pelo transformador.

Sendo a indutância deste transformador  $L_T = 3,08$  mH, e a frequência de ressonância igual à de chaveamento  $F_C = 10.000$  Hz, através da equação (6.5), obtém-se o valor do capacitor.

$$C = \frac{1}{(2\pi F_C)^2 \times L_T}; \quad (6.5)$$

$$C = 2,822 \mu\text{F}.$$

### 6.2.3. Resultados de Simulação, Utilizando Inversor com Chaveamento PWM.

Uma vez determinada a estratégia de controle de detecção a mesma é experimentada em um inversor fonte de tensão, composto de chaves IGBT chaveando em 10.000 Hz.

Após  $t = 0,4\text{s}$ , observa-se que, conforme apresentado na Figura 6.1, inicialmente, a corrente de compensação  $I_{\text{COMP}}$  gerada é capaz de compensar a corrente de 5ª harmônica  $I_S$ . Porém, no decorrer da simulação a tensão  $V_L$  é alterada porque a componente 5ª harmônica reduz pelo efeito do controle de compensação, modificando a corrente de compensação e fazendo com que o controle passa a não ter o desempenho esperado, tal como observada na forma de onda e mostrado na Figura 6.2.

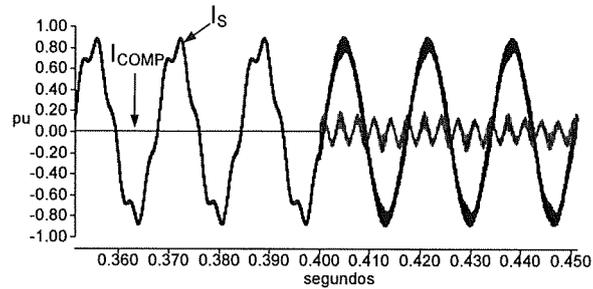


Figura 6.1 Forma de onda  $I_s$  antes e depois do desbloqueio do filtro

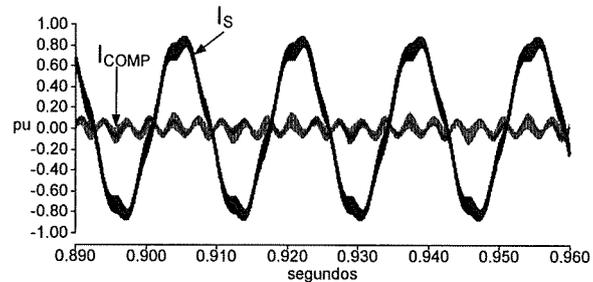


Figura 6.2 Forma de onda de  $I_s$ , após 0,9 s.

A Figura 6.3 (a) e (b) confirma a ineficiência do controle uma vez que P5 e Q5 apresentam valores diferentes do esperado (zero), o que se confirma na corrente de 5ª harmônica  $I_{S5}$ .

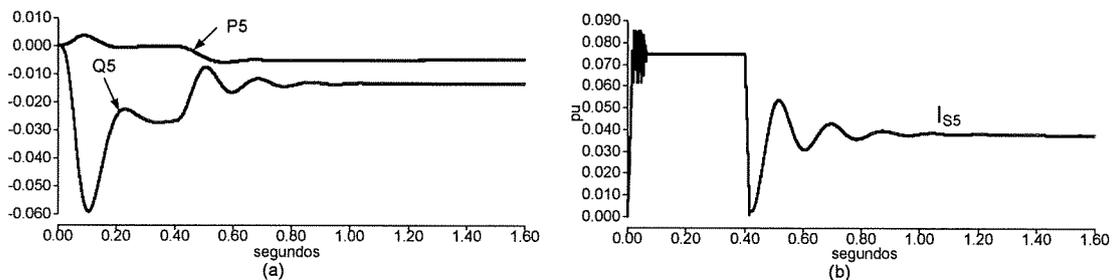


Figura 6.3 (a) Indicação de P5 e Q5 diferente de zero (b) Corrente  $I_{S5}$ .

A tensão  $V_L$  é alterada ao longo do tempo, pois após ser devidamente compensada sua componente harmônica tende a zero o que faz com que a corrente de compensação seja reduzida. A partir de então os valores estabilizados de tensão e corrente passam a não corresponder aos valores desejados, uma vez que a controle não consegue gerar a corrente de compensação necessária.

A seção seguinte apresenta a solução encontrada para que a detecção de  $V_L$  não fosse comprometida com o decorrer do tempo. Para isso foi inserido um controle a mais no sistema.

#### 6.2.4. Controle da Tensão de Detecção

O controle do filtro ativo a partir da detecção somente da tensão pode apresentar desempenho indesejável como verificado no item anterior. A tensão utilizada para detecção é a tensão  $V_L$  e a mesma é alterada ao longo do tempo.

É necessária, então, a implementação de uma malha de controle externa que garanta a filtragem total do 5º harmônico sem drenagem da corrente fundamental. A Figura 6.4 mostra como foi implementado este controle.

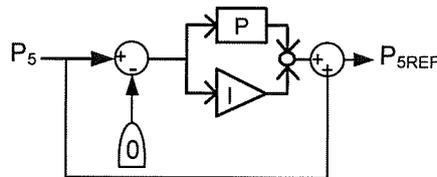


Figura 6.4 Controle da tensão de detecção através de  $P_5$ .

O objetivo é guardar o estado inicial de  $P_5$  que foi obtida da estratégia de detecção apresentada, através da tensão  $V_L$ . Este sinal  $P_5$  é comparado com o valor desejado “zero”, passa por um controlador PI e soma com o valor o qual se deseja partir o sistema. As grandezas  $P_{5REF}$  e  $Q_{5REF}$  as quais são determinadas de forma análoga a  $P_{5REF}$  da Figura 6.4 são as novas grandezas que comporão o cálculo matricial em substituição as grandezas  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ . A Figura 6.5 mostra a nova configuração completa após a implementação da estratégia de detecção. Como o objetivo desta etapa é de verificar a eficiência da compensação através do controle proposto, o diagrama apresentado na Figura 6.5 considera uma fonte de tensão controlada ao invés de um capacitor para regular o elo CC.

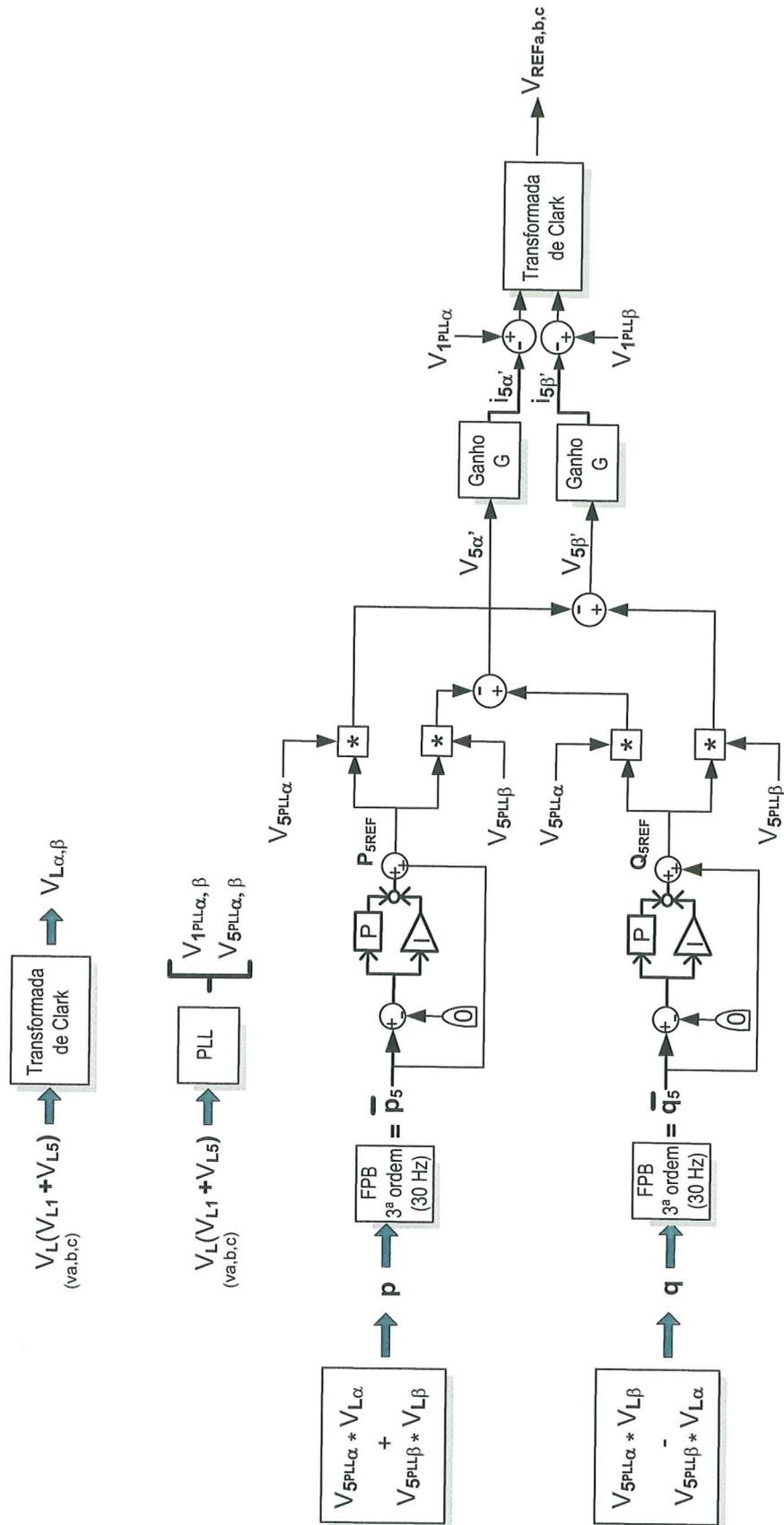


Figura 6.5 Nova estratégia de controle do filtro ativo, considerando o controle de  $P_5$  e  $Q_5$ .

### 6.2.5. Resultados após adição do controle de P5 e Q5

Com a inclusão da malha de controle de P<sub>5</sub>, houve o ajuste adequado do sistema e a detecção do 5º harmônico, sendo que a partir de V<sub>L</sub> passou a ser eficiente fazendo drenar toda a componente harmônica de corrente de 5ª ordem.

A Figura 6.6 mostra a forma de onda da corrente I<sub>S</sub> e da corrente de compensação I<sub>COMP</sub> antes e após o desbloqueio do filtro ativo indicando total filtragem do 5º harmônico.

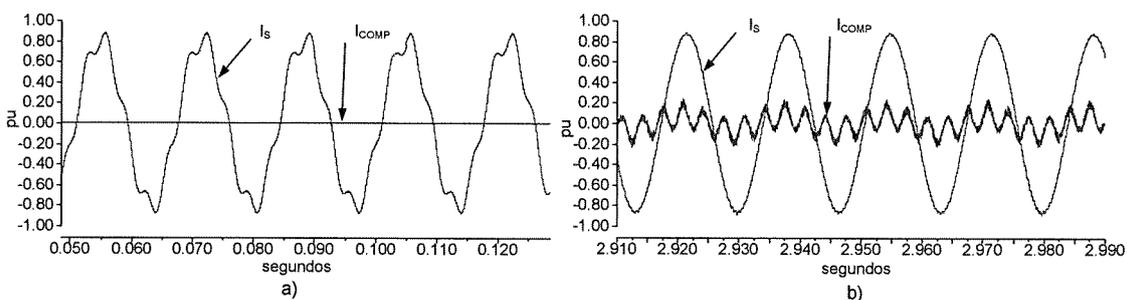


Figura 6.6 Forma de onda de I<sub>S</sub> e I<sub>C</sub> com o filtro a) bloqueado; b) desbloqueado.

A Figura 6.7 apresenta o momento da detecção da corrente de compensação. A corrente aqui representada por I<sub>COMP</sub> passando a ser gerada pelo sistema e, em aproximadamente 33 ms (~10 ciclos em 300 Hz) entra em fase com corrente a ser compensada, aqui denominada I<sub>H</sub>.

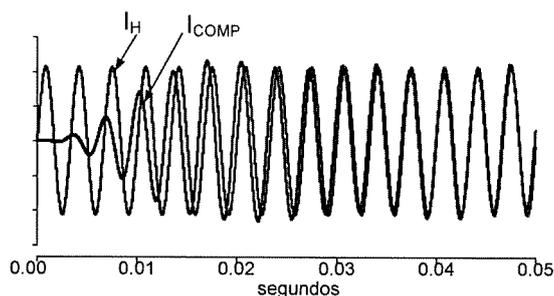


Figura 6.7 Detecção da corrente de 5ª harmônica.

A Figura 6.8 mostra o desbloqueio do filtro em t = 0,14s e confirma a eliminação da corrente de 5ª harmônica na barra da SE Bandeirantes, através do valor RMS de I<sub>S5</sub>, em t = 1,5s, o que pode ser visualizado também pelo valor médio de P<sub>5</sub> e Q<sub>5</sub> igual a zero, mostrado na Figura 6.9.

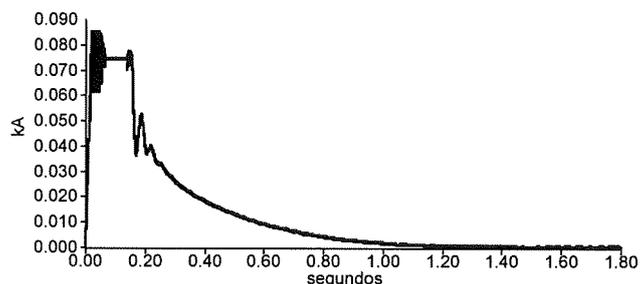


Figura 6.8 Valor RMS da corrente  $I_{55}$ .

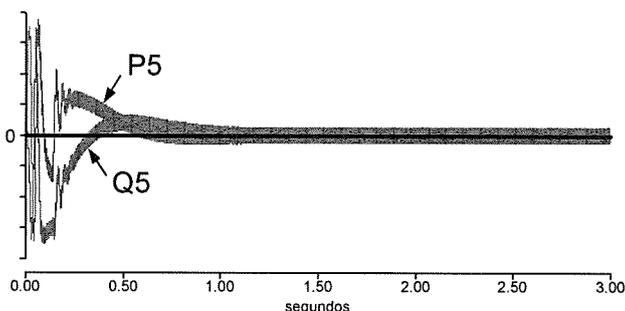


Figura 6.9 Valor médio de  $P_5$  e  $Q_5$ .

#### 6.2.6. Controle da Tensão no Capacitor do link CC

Após verificação da eficiência da estratégia de controle adotada, é necessária a implementação do capacitor do link CC, calculado no item 6.2 que substituirá a fonte de tensão.

Para o controle de tensão no capacitor CC é necessária a adoção de uma lógica de controle tal que o sistema existente module a tensão para que o filtro permita drenar a corrente fundamental suficiente para manter a tensão no capacitor no valor calculado de 800 V.

A Figura 6.10 mostra que a tensão medida no capacitor  $V_{CAP}$  é comparada com a referência desejada, igual a 800 V. O erro resultante passa por um controlador PI gerando um ganho de potência denominado  $P_{LOSS}$ .

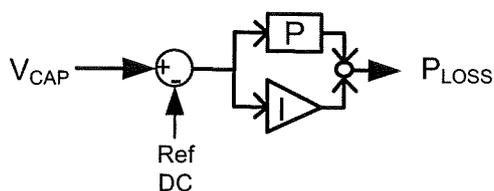


Figura 6.10 Obtenção do ganho  $P_{LOSS}$ .

O ganho  $P_{LOSS}$ , após multiplicado pela potência de sequência positiva  $V_{1PLL}$ , então, é somado com a corrente de controle  $i_5'$ . A resultante passa a ser a nova corrente de controle. A Figura 6.11 ilustra a configuração final da estratégia utilizada considerando todos os controles.

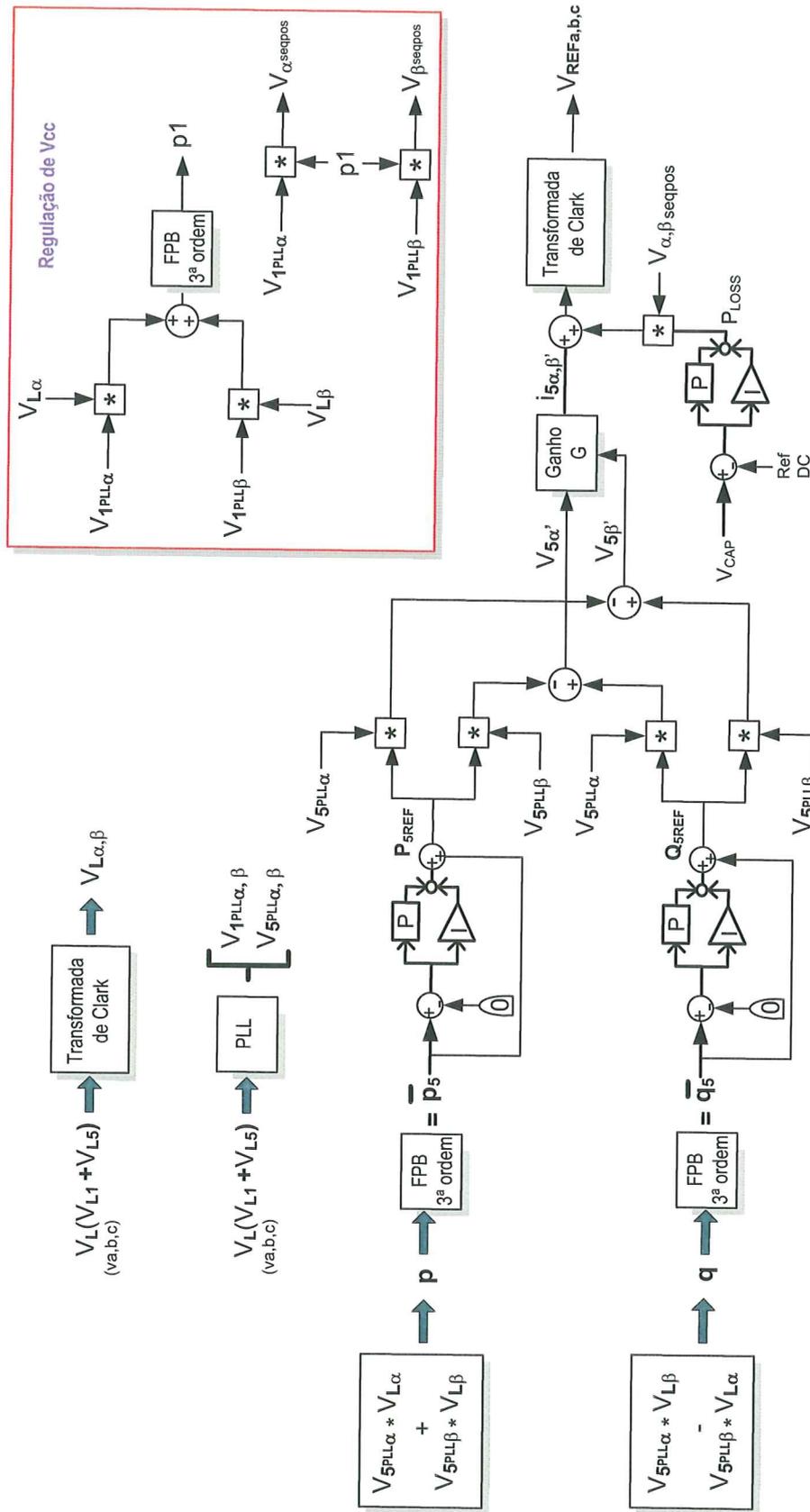


Figura 6.11 Nova estratégia de controle do filtro ativo, considerando o controle de tensão do capacitor CC.

A Figura 6.12 ilustra a eficiência do controle adotado, mostrando a manutenção da tensão CC no valor desejado igual a 800 V e a dinâmica do ganho  $P_{Loss}$ , considerada lenta, porém compatível à dinâmica dos controles do sistema de potência considerado. Em  $t = 0,14s$ , o filtro é desbloqueado, estabilizando em aproximadamente  $t = 1,0s$ .

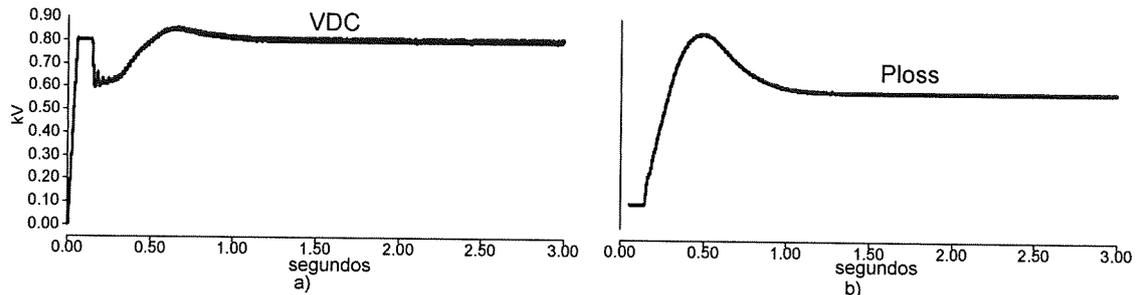


Figura 6.12 a) Tensão no capacitor CC; b) Ganho  $P_{Loss}$ .

### 6.3. Conexão ao Sistema Elétrico Considerado

Uma vez observada a eficiência da estratégia de controle proposta em uma rede simplificada, o conjunto apresentado na seção 6.2 é conectado à rede de simulação apresentada no capítulo 3 através da barra de 88 kV da SE Bandeirantes.

O objetivo final é reduzir o carregamento harmônico nos filtros passivos da SE Ibiúna, localizada a aproximadamente 70 km da SE Bandeirantes. A expectativa é que, uma vez reduzida ou eliminada a componente harmônica de corrente de 5ª ordem na SE Bandeirantes e sabendo que a contribuição desta SE é significativa em relação às demais, haverá sensível redução da corrente harmônica nos filtros da SE Ibiúna. Outras fontes permanecerão a contribuir com o carregamento harmônico em Ibiúna, porém, é esperado que não haja mais risco de incidência de sobrecarga. A Figura 6.13 mostra o diagrama unifilar simplificado utilizado na simulação do sistema completo.

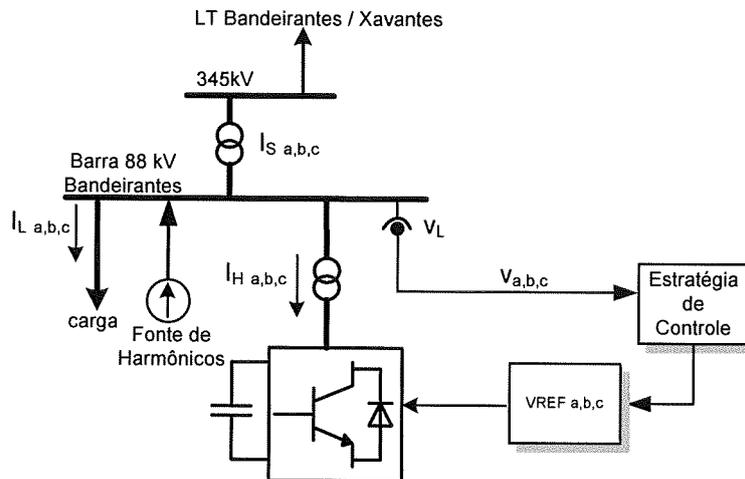


Figura 6.13 Diagrama simplificado da rede de simulação.

Por limitação computacional, não é possível realizar a simulação com toda a dinâmica de chaveamento apresentada no capítulo 4. São apresentados nesta seção apenas os 7 primeiros segundos, quando a componente harmônica de corrente de 5ª ordem de um dos filtros passivos da SE Ibiúna se encontra com valor de 9,6 A, sendo a soma total das fontes harmônicas no sistema é igual a 13 A. É relevante observar que a corrente máxima atingida no filtro passivo, conforme apresentado no capítulo 4 é de 20 A, comprovando a amplificação harmônica ao longo ao sistema. No entanto, o valor absoluto da corrente de 5ª harmônica no filtro da SE Ibiúna não é relevante, já que o objetivo é analisar o comportamento do filtro ativo no sistema completo e o resultado relativo na redução da corrente em Ibiúna.

O tempo de simulação apresentado é justificado, uma vez que o “*time step*” considerado foi de 2  $\mu$ s, valor este necessário, visando à devida representação do chaveamento PWM em 10.000 Hz. O plot step utilizado foi de 10  $\mu$ s, necessários para a demonstração adequada de toda a parte gráfica. O tempo de processamento durante a simulação é igual a 9,5 min / segundo.

A Figura 6.14 ilustra a redução da corrente de 5ª harmônica, após a dinâmica necessária para o amortecimento do sistema. O filtro é desbloqueado em  $t = 2$ s e o regime permanente se dá em  $t = 6,0$ s, o que poderia ser considerado um sistema lento, porém bastante razoável para o sistema elétrico de potência brasileiro.

Após  $t = 6,0$ s, é observada redução da drenagem de 9,6 A para 2,0 A, observado na Figura 6.14, no filtro passivo da SE de Ibiúna ( $I_{5IN}$ ), valor sensivelmente

inferior ao valor, quando da retirada da fonte de 5ª harmônica da barra de 88 kV da SE Bandeirantes, onde foi observado valor mínimo de 5,2 A. Este fato se deve à proximidade física das demais fontes de corrente de 5ª harmônica presentes na rede elétrica, o que significa dizer que este filtro também está bloqueando parte das correntes harmônicas das barras vizinhas.

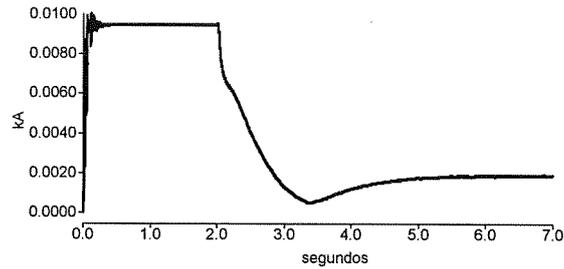


Figura 6.14 Corrente de 5ª harmônica no filtro passivo da SE Ibiúna.

A Figura 6.15 mostra a dinâmica do ganho  $P_{LOSS}$  agora submetido ao sistema elétrico completo. Observa-se que em comparação com a Figura 6.12, o tempo para estabilizar é sensivelmente elevado.

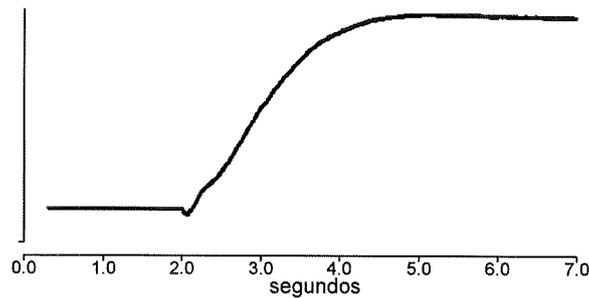


Figura 6.15 Ganho  $P_{LOSS}$ .

A Figura 6.16 ilustra a comparação da forma de onda da corrente de 5ª harmônica do filtro passivo da SE Ibiúna, a) antes e b) depois do desbloqueio do filtro ativo da SE Bandeirantes.

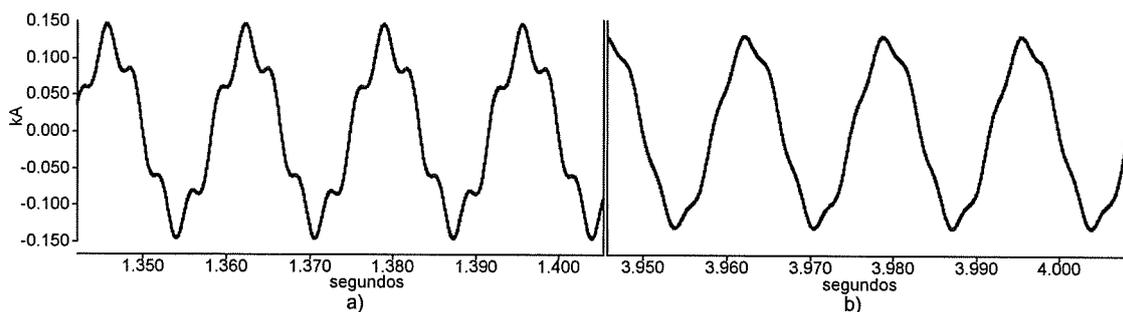


Figura 6.16 Corrente no filtro passivo a) antes do desbloqueio; b) depois do desbloqueio.

A Figura 6.17 confirma a manutenção da tensão no capacitor do link CC durante o tempo de simulação.

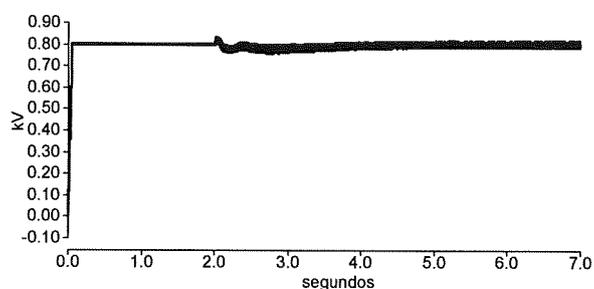


Figura 6.17 Tensão no capacitor CC.

## 6.4. Conclusões Parciais

Os parâmetros do filtro ativo paralelo considerados neste capítulo foram determinados através de cálculos e ajustes após simulações. A representação adequada da rede elétrica permitiu que os ajustes fossem realizados de modo a garantir o bom desempenho da filtragem ativa com resultados bastante significativos.

A dinâmica lenta observada na rede de simulação foi decorrente dos ajustes mencionados, uma vez que não foi possível utilização de filtros passa-baixas considerados rápidos, sob risco de perda de estabilidade do controle do filtro ativo.

Os resultados apresentados representam que os objetivos deste trabalho foram alcançados com algumas conclusões adicionais:

- A dinâmica de controle é considerada lenta, porém sem comprometimento aos controles da rede elétrica, pois a rede elétrica possui dinâmica lenta em seus controladores.
- A inclusão da malha de controle adicional para controle da tensão foi realizada de modo eficiente. Esta malha de controle não estava prevista na concepção original do projeto e foi sendo incluída no decorrer das simulações.
- Foi observado cancelamento da componente de corrente harmônica de 5ª ordem na barra de 88 kV da SE Bandeirantes.
- O filtro passivo de Ibiúna passa a drenar componentes harmônicas de corrente de 5ª ordem em valores inferiores aos previstos inicialmente.

## 7- CONCLUSÕES GERAIS

O desenvolvimento deste trabalho mostrou a possibilidade de realização de estudos mais aprofundados no que diz respeito a circulação de correntes harmônicas na rede elétrica, mesmo quando esta rede é um sistema de proporções como o SIN (Sistema Interligado Nacional). No decorrer da dissertação, alguns caminhos foram escolhidos e percorridos. A pesquisa mais detalhada dos cabos subterrâneos de alta tensão é fator determinante para o direcionamento de uma possível solução de um problema constante e crescente que é o elevado nível de componentes harmônicas de corrente em regiões onde cargas não lineares distribuídas e não identificáveis constituem parcela considerável da carga total de determinadas barras da rede elétrica. Foi necessária também a pesquisa mais detalhada do perfil das torres e cabos aéreos utilizados na modelagem da rede. O fornecimento dos dados do perfil das torres de transmissão pelas concessionárias Furnas Centrais Elétricas e CTEEP foi fundamental para a modelagem adequada na rede elétrica no simulador PSCAD. Em adição aos dados do perfil das torres foi necessária a obtenção dos parâmetros dos transformadores, reatores e capacitores o que pode ser obtido na base de dados técnica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Com a rede de simulação determinada, foi possível realizar uma investigação de possíveis ressonâncias para a corrente de 5ª harmônica e a amplificação desta corrente em função desta ressonância ao longo da rede. Os resultados desta investigação revelaram que as possíveis modificações de configuração na rede, como conexão de capacitores e reatores alteram o ponto de ressonância para a componente harmônica de corrente de 5ª ordem. Não foram observadas amplificações da componente harmônica de corrente de 5ª ordem através das linhas aéreas. Foi observada amplificação desta componente através dos cabos subterrâneos, o que norteou a solução apresentada neste trabalho. A pesquisa mencionada proporcionou apontar local apropriado para a correção da distorção harmônica de corrente, visando reduzir o efeito sobre o filtro passivo da SE Ibiúna.

As hipóteses consideradas simplificaram o projeto, pois consideraram uma rede equilibrada, já que para o sistema elétrico de potência em questão esta consideração não compromete os resultados apresentados. Nas redes de alta e extra-alta tensão, os

desequilíbrios de tensão entre as fases são desprezíveis para o tipo de estudo apresentado. Foi considerada a componente harmônica de 5ª ordem a única componente presente na rede elétrica. Esta hipótese está em concordância com a campanha de medição apresentada no capítulo 4, onde as componentes harmônicas de corrente de 3ª ordem foram consideradas desprezíveis em relação as componentes de 5ª harmônica. A estimativa feita para as injeções de corrente de 5ª harmônica também se mostrou coerente, já que na campanha de medição valores semelhantes foram observados.

É pertinente afirmar que a solução de conexão de um filtro ativo conectado à barra de 88 kV da SE Bandeirantes é apenas uma das várias soluções que poderiam ser apresentadas. Estas soluções variam em função do objetivo principal e quanto se dispõe de capital para investimento inicial. Outra questão é determinar qual a instituição, órgão ou empresa seria responsável pela instalação do filtro ativo para redução do problema de elevadas correntes harmônicas na rede elétrica.

As chaves eletrônicas utilizadas foram submetidas à corrente máxima de 16 kA, o que demandaria o paralelismo de várias chaves comercialmente existentes para tornar o projeto viável tecnicamente, o que o encareceria demasiadamente.

O pouco conhecimento do fenômeno de fluxo de corrente harmônica e a falta de um simulador capaz de calcular fluxos de correntes harmônicas através da rede elétrica limitam a investigação do problema e, conseqüentemente, a solução definitiva do mesmo. A investigação por meio fasorial, talvez apresente resultados mais significativos e repostas a perguntas tais como: o que faz o perfil da componente harmônica de corrente de 5ª ordem se comportar da maneira que foi apresentada no capítulo 1?

A estratégia inicial do autor foi validar a rede modelada através de simulações, para servir de “bancada experimental” e assim realizar a pesquisa necessária. Os chaveamentos de capacitores, reatores e de cargas RL simularam o comportamento da rede de transmissão representada. Foi observado, então o fluxo de correntes harmônicas desde a carga até o filtro passivo da SE Ibiúna. A SE Ibiúna é o ponto de referência escolhido por ser o único ponto de medição de correntes harmônicas na rede elétrica. Este método serviu de base para comparações com medições realizadas em campo, durante a campanha apresentada no capítulo 4. Os resultados obtidos e apresentados,

tais como fluxo de potência e tensão foram similares aos do caso base de novembro de 2007, o que confirmou a eficiência do simulador utilizado. As fontes de 5ª harmônica foram representadas por fonte de corrente, artifício pertinente, uma vez que seria impossível modelar todas as cargas não lineares existentes na região pesquisada. Suas amplitudes foram baseadas em cálculos de consumo de televisores, fontes conhecidas geradoras de 5º harmônico. O resultado se mostrou adequado e compatível com medidas apresentadas na campanha de medição.

A viabilidade do projeto em termos de equipamento elétrico pode ficar comprometida em função da alta potência do filtro ativo, cuja tecnologia atual ainda não suporta.

Quanto ao algoritmo apresentado e a estratégia de controle adotado conclui-se:

- É possível controlar e bloquear a corrente harmônica de uma determinada barra a partir da detecção da tensão desta barra.
- O algoritmo apresentado, baseado na teoria da potência instantânea se mostrou eficiente e exigiu um entendimento mais aprofundado desta teoria, visando proporcionar modificação necessária para adaptá-la à necessidade de realizar filtragem seletiva a partir somente da detecção de tensão.
- A dinâmica de controle observada é aceitável e pode ser considerada eficiente, já que a própria dinâmica dos controladores da rede elétrica simulada é lenta. Ou seja, não teria efeito significativo se uma possível melhoria do projeto tornasse a dinâmica mais rápida.

As contribuições do autor apresentadas neste trabalho foram:

- A modelagem dos equipamentos de uma rede elétrica significativa, o que proporcionou resultados expressivos quanto ao fluxo de corrente harmônica nesta rede.
- Descoberta da influência dos cabos subterrâneos na amplificação da componente harmônica de 5ª ordem, a partir da modelagem correta dos elementos de rede.
- Descoberta de um ponto específico de controle da corrente harmônica, a partir do qual se manteve a corrente do filtro passivo da SE Ibiúna em

valores baixos, possibilitando a operação com apenas um filtro em vez de 4 conforme praticado atualmente.

- Obtenção de uma estratégia de controle eficiente a partir apenas da detecção de tensão da barra de carga
- A adaptação da teoria da potência instantânea, considerando a potência média para a obtenção da corrente de compensação.
- A inserção de uma malha de controle visando o controle da tensão de detecção, uma vez que sem este controle a corrente de compensação estabilizaria em valor inferior ao desejado.
- Ajustes dos ganhos para os controladores de características lentas que viabilizou um controle ideal, porém sem comprometer a dinâmica do sistema de potência.

Em simulações derradeiras foi constatada a eficiência do projeto, uma vez que cumpriu o objetivo determinado inicialmente de redução da corrente drenada nos filtros passivos da SE Ibiúna. Vale lembrar a impossibilidade de filtragem local, ou seja, na SE Ibiúna, não há mais espaço físico para conexão de filtros passivos.

Uma vez que tem sido observado aumento frequente da utilização da eletrônica de potência na indústria, comércio e residências, uma legislação específica deverá ser elaborada para controlar a qualidade da energia. As concessionárias locais terão a parcela de responsabilidade para evitar que a corrente harmônica dos seus consumidores “polua” o sistema de transmissão, o que representa que a solução apresentada nesta dissertação poderia ser uma solução também para estas concessionárias.

Enfim, a complexidade do trabalho apresentado proporcionou resultados além das expectativas do autor, uma vez que contribui significativamente para pesquisas de medição harmônica atualmente realizada no setor elétrico. O estudo mais detalhado de cabos de 230 kV e 345 kV indicou amplificação harmônica de corrente de 5ª ordem até então não verificada em pesquisas semelhantes realizadas. A constatação da amplificação em simulações realizadas serviu como base para indicação da ampliação da campanha de medição para ambos os terminais dos circuitos elétricos constituídos por cabos subterrâneos. As medições em campo confirmaram a amplificação observada em simulação sendo possível a partir de então iniciar um novo debate sobre a utilização

e compensação dos cabos. Os estudos necessários para eliminação deste problema ainda não iniciaram, porém a informação da amplificação do componente de 5ª harmônica de corrente nos cabos subterrâneos já consta na minuta do relatório final da campanha realizada pelo ONS em parceria com a USP no período 2007 / 2008. Pode-se afirmar que trata-se de um problema estrutural em que a rede elétrica tem grande influência no problema apresentado.

## **7.1. Perspectivas Futuras**

Para futuros projetos e pesquisas baseados no tema apresentado, o autor sugere investimento em melhorias dos programas de simulação. Uma vez verificado ser o PSCAD, um simulador robusto e eficiente, é válido sugerir integração do mesmo com programas já sedimentados no setor elétrico como o ANAREDE, disponível a todas as empresas do setor elétrico e que processa o caso base fornecido mensalmente pelo ONS no seu site. A integração destes dois programas permitiria a leitura dos fluxos de potência, ângulos e tensões pelo PSCAD, porém na frequência fundamental, por isso é necessário: ou a devida modelagem das cargas existentes no PSCAD, ou assumir a partir de valores medidos, injeções de correntes harmônicas em barras pré-definidas. Seria possível investigar dinamicamente a variação da componente harmônica de corrente na rede elétrica e estabelecer critérios para redução das mesmas.

O filtro ativo projetado requer modificações visando torná-lo tecnicamente viável. É necessária a continuação da busca da solução para tornar o filtro ativo operacional com o nível da potência verificada.

Pode-se vislumbrar como perspectivas futuras, avanço no desenvolvimento da estratégia de controle para a seletividade do 3º harmônico, tendo como hipótese um possível crescimento deste harmônico na rede elétrica, vindo o mesmo apresentar o problema similar ao do 5º harmônico.

A estratégia de controle deve considerar para projetos futuros, redes desequilibradas.

A nova estratégia de controle poderá prever também a compensação da potência reativa, o que dispensaria investimentos em novos equipamentos tradicionais para compensar aumento de carga na região estudada o que ocorre continuamente.

Em relação aos cabos citados, é necessária modelagem mais precisa. Não existe a possibilidade de transformá-los em circuitos aéreos, devido à falta de uma área de servidão na região em que os cabos estão localizados. Esta alteração eliminaria o problema de amplificação do 5<sup>a</sup> harmônico. A modelagem mais precisa dos cabos mencionados proporcionaria estudos mais aprofundados para possíveis alterações estruturais, tal como material utilizado, isolamento, meio isolante, comprimento, etc.

Em relação à aplicação de filtros ativos em sistema de transmissão, estudos futuros poderão determinar topologias alternativas em relação à alternativa apresentada como solução deste trabalho. Filtros híbridos se apresentam como solução técnica e economicamente viável. Um estudo mais aprofundado em continuidade aos já existentes pode representar uma boa perspectiva para continuidade desta dissertação. Esse estudo poderia considerar, por exemplo, projeto de um filtro híbrido composto de um filtro passivo paralelo formado pelo capacitor utilizado para controle de tensão e a indutância do transformador de acoplamento e um filtro ativo em série com este filtro passivo conectado na mesma barra.

## Referências Bibliográficas

- [1] – Procedimento de Rede do ONS – Modulo 2, Sub-módulo 2.2, site do ONS (<http://www.ons.org.br/download/procedimentos/submodulo02-02-r2.pdf>), acessado em Maio, 2009.
- [2] – Norma EN 50106, *Voltage Characteristic of eletricity supllied by public distribution system*, 1999.
- [3] - ABB, **The Itaipu HVDC transmission**, site da ABB, (<http://www.abb.com/cawp/gad02181/c1256d71001e0037c1256833006cb3a4.aspx>), acessado em Nov. 2008.
- [4] – HINGORANI, N. G., 1999, **Understanding FACT's**. 2ed. Wiley-IEEE Pres,
- [5] – Shuter, T. C., Volkommer, H. T. e al, “Survey of harmonic levels on the American electric power distribution system”, **IEEE Transaction Power Delivery**, v.4, pp. 2204-2213, Oct. 1989.
- [6] – Mansoor, A. Grady, W.M. et al, “Predicting the net harmonic currentes produced by large number of distributed single-phase computer load”, **IEEE on Trans. Power Delivery**, vol. 10, pp. 2001-2006, Oct. 1994.
- [7] - Norma IEEE 519, *Harmonic Control and Reactive Compensation*, 1992.
- [8] – Segura, A. N., Sanches,P. B. “Experimental measurement of non-characteristic harmonic poer generated by thysristor pulse controlled AC/DC thee-phase converters”, **IEEE Ins. Eletron. Proceedings of the IEEE Internacional Symposium on**, vol. 1, pp.549-554, Jun. 1996.
- [9] - Procedimento de Rede do ONS – Módulo 10, site do ONS (<http://extranet.ons.org.br/operacao/mpo.nsf/principalweb?openframeset>), acessado em Maio, 2009.
- [10] – Fernandes, R. M.,2007, **Análise de medidas operativas para controle harmonico na rede elétrica: um estudo de caso**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [11] – 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 ordens harmônicas**, ONS RE3/344/2007. Dec. 2007.
- [12] – Peng, F.Z., Adams, D.J., “Harmonic sources and filtering approaches-series/parallel, active/passive, and their combined power filters”, **IEEE Industry Applications Conference** vol 1, pp. 448-445, 1999.

- [13] – Akagi, H., Hatada, T., “ Voltage Balancing Control for a Three-Level Diode-Clamped Converter in a Medium-Voltage Transformerless Hybrid Filter”, **IEEE Transactions on Power Electronics** vol 24, no. 3, Mar, 2009.
- [14] - Site da AES ELETROPAULO (<http://www.eletropaulo.com.br>), acessado em Março. 2009.
- [15] – Currence, E. J., Plizga, J. E. et al, “Harmonic Resonance at a medium sized industrial plant”, **IEEE Trans. on Industrial Applications** vol. 31, no.4, pp.682-630, 1995.
- [16] – Andrews, D., Bishop, M. T. et al, “Harmonic Measurements analysis and power factor correction in a modern steel manufacturing facility”, **IEEE Transactions on Industrial Application**, vol. 32, no.3, pp. 617-624, 1996.
- [17] – Oku, K., Nakamura, O. et al, “Measurement and analysis of harmonics in power distribution system, and development of a harmonic suppression method”, **IEEE of Japan Transactions**, vol 114-B, no. 3 pp. 234-241, 1994.
- [18] – Akagi, H., Fugita et al, “A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Installation on a Long Distribution Feeder”, in Proceedings of the **IEEE Industry Application Annual Meeting** 2001, vol. 1, pp. 157-163.
- [19] – Kusko, A., “Design of Power Harmonic Filters”, **Power Quality Proceedings**, Paris, Nov. 1990.
- [20] – Yuosif, S.N.AL, Wanik, M.Z, “Implantation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation”, in **National Power & Energy Conference**, Kuala Lumpur, Malasya,2004, pp. 224-234.
- [21] – Akagi, H., “New trends in activer filter for power conditional”, **IEEE Trans. on Industrial Application** vol 32, no.6, pp. 1312-1322, Nov, 1996.
- [22] – Peng, F., Akagi Z. H. et al, “A new approach to harmonic compensation in power system”, **IEEE Transactions on Industrial Application**, vol 26 no 6 Nov/Dec, 1990, pp 983-990.
- [23] – Nastran, J., Cajhen, R et al, “ Active power filter for nonlinear ac loads”, **IEEE Transaction Power Eletronics** vol 9, no. 1, Jan, 1994.
- [24] – Peng, F., Akagi, H et al, “A PWM converter for harmonic compensation”, **IEEE Transaction Power Eletronics**, vol 5 no.1, pp. 9-15, Jan, 1990.
- [25] – Bhavaraju , V. B., Enjeti, P., “ Analisis and design of na active power filter for balancing unbalanced loads”, **IEEE Transaction on Power Eletrocnics** vol 8, no. 4, pp 640-647, Oct, 1993.

- [26] – Encarnaç o L., Aredes, M. et al, “Hybrid Filter to Damp Harmonic Resonance in Power Transmission System”, **ISOBRAEP**, 2001.
- [27] – Peng, F., Akagi, H et al, “Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters”, **IEEE Transactions on Industry Applications** vol 29, no.1 pp. 144-152, Jan, 1993.
- [28] – Detjen, D., Joep, J. et al, “ A New Hybrid Filter to Dampen Resonances and Compensate Harmonic Currents in Industrial Power System With Power Factor Correction Equipment”, **IEEE Transactions Power Eletrocnics**, vol 16, no. 6 pp 821-827, Nov, 2001.
- [29] – Basic, D., Ramsden, V. et al, “Harmonic Filtering of High-Power 12-Pulse Rectifier Loads With a Selective Hybrid Filter System”, **IEEE Transactions on Industrial Eletronics** vol 48, no.6 pp. 1118-1127, Jan, 2001.
- [30] – Akagi, H., Sunt, S et al, “Comparisons in Circuit Configuration and Filtering Performance Between Hybrid and Pure Shunt Active Filters”, **IEEE Intelligent Transportation Systems Conference**, pp. 1195-1202, 2006.
- [31] – Aredes, M., H fner, J. et al, “New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters”, **IEEE Transactions Power Delivery**, vol 10, pp. 1649-1656, July, 1996.
- [32] – Akagi, H., Watanabe, E.H., M.Aredes, 2007, **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**, 1 ed. Wiley-Interscienc John Wikey & Sons Inc.
- [33] – Clarke, E., 1943, **Circuit Analisys of AC Power System**, vol.1, Wiley.
- [34] – Arrilaga, J. B., Smith, C. et al, 2000, **Power System Harmonic Analysis**, Wiley & Sons, Inc.
- [35] – ONS, 2003, **Medições na subestac o de Ibiúna 345 kV**, ONS RE3/221/2003.
- [36] – Rodrigues, R. M. Paulo, J. A. et al, “Qualidade de energia em instalações elétricas rurais”, in proceeding of the **3<sup>o</sup> Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, SP, Brazil (on line) 2003 (cited 9 January, 2008). Avaliable from: [www.proceedings.scielo.br/scielo.php](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php).
- [37] – Kimbark, E. W., 1947, **Power System Stability** – Vol. 1, J. New York, Wiley & Sons, Inc.
- [38] – Miller, R. H., 1988, **Operação de Sistemas de Potência**, Tradução S. Gutman, C. P. Neto, Mc Graw – Hill, São Paulo, SP, Brasil,.
- [39] –Site do MME - Ministério das Minas e Energia [http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=48](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=48), acessado em Nov. 2007.

[40] – Creder, H. 2002 **Instalações Elétricas**, 13 ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

[41] – Aredes, M, **Active Power Line Conditioners**, Tese de doutorado, University Berlim, Berlim, 1996.

[42] – Akagi, H., Nabae A., et al, “Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters”, **IEEE Transactions Industrial Application**, vol. IA-22, pp. 460-165, May/June 1986.