Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS DE SEQÜÊNCIA ZERO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

João Felício Vendramini Ferreira

Orientador: José Carlos de Oliveira, PhD

Uberlândia

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS DE SEQÜÊNCIA ZERO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

Dissertação apresentada por João Felício Vendramini Ferreira à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU
Kleiber David Rodrigues, Dr. Eng. - UFU
Roberto Apolônio, Dr. Eng. - UFMT
Luis Carlos Origa de Oliveira, Dr. Eng. - UNESP-ISA

Uberlândia, abril de 2006.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Carlos e Oneida por sempre apoiarem minhas decisões e por garantirem toda a base necessária ao meu aprendizado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e ao Mestre José Martins pela proteção e por todas as graças alcançadas.

Ao Prof. Dr. **José Carlos de Oliveira**, pela confiança, apoio e colaboração ao longo desta convivência. O senhor, mais do que ninguém sabe dar sentido à palavra "orientador".

Aos Professores **Kleiber David Rodrigues**, **Antônio Carlos Delaiba**, **Luis Carlos Origa de Oliveira**, **Roberto Apolônio** e **Arnulfo Vasconcellos**, pelos auxílios prestados ao longo deste trabalho.

Aos amigos da Pós-graduação, **Fernando Nunes Belchior, Ana Cláudia de Azevedo, André Roger, Jordana Felício, Elise Saraiva, Adeon Cecílio Pinto, Bismarck Castillo** e **João Salve** pelo apoio durante esta pesquisa, em especial na realização dos trabalhos experimentais.

À **Emilia Gabriela Nascimento**, pelo companheirismo e por me ensinar, apoiar, cobrar, e suportar durante esta etapa de minha vida.

À **Marli Junqueira** pela presteza nos serviços junto à secretaria da Pós-graduação.

À **CAPES** pelo apoio financeiro.

RESUMO

As distorções harmônicas na tensão e/ou na corrente estão entre os distúrbios mais comumente encontrados no sistema elétrico. Em resposta a este problema, esta pesquisa propõe uma nova alternativa à filtragem de componentes harmônicas de seqüência zero, pelo uso de um filtro fundamentado tão somente em arranjos eletromagnéticos.

Esta dissertação identifica os princípios funcionais do filtro eletromagnético de seqüência zero, estabelecendo um modelo matemático representativo de seus arranjos eletromagnéticos fundamentados em relutâncias e forças magnetomotrizes. Apresenta, também, a modelagem do dispositivo focado numa base computacional no domínio do tempo, para fins de estudo de desempenho conjunto com uma rede elétrica. Por fim, o dispositivo tem seu desempenho avaliado, no que tange a eficácia do processo de atenuação das distorções, através de testes laboratoriais e computacionais.

Palavras-chave: correntes de seqüência zero, correntes de neutro, filtro eletromagnético, técnicas para mitigação de harmônicos.

ABSTRACT

Harmonics distortions are one of the more common questions in the electric systems. This research proposes a new alternative to attenuate zero-sequence-harmonic injection by using an electromagnetic filter.

This document identifies the functional principles of the electromagnetic filter for zero-sequence-harmonics, establishing a representative mathematical model of its electromagnetic arrangements based on reluctances and magnetomotriz forces. It presents, also, a model of the studied device in a computational base using time-domain. Finally, laboratory and computational tests for evaluation filter's performance had been carried through.

Index Terms: Electromagnetic filter, neutral currents, techniques for harmonic elimination, zero sequence currents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1- Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não linear. 3
Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da Série de Fourier. 4
Figura 1.3 - Corrente no condutor neutro de circuitos alimentando cargas não lineares monofásicas. 7
Figura 2.1 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero. 13
Figura 2.2 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero. 14
Figura 2.3 - Arranjo físico do Filtro de seqüência zero. 15
Figura 2.4 - Distribuição magnética para o filtro de seqüência zero. 16
Figura 3.1 – Diagrama esquemático equivalente do template wind.sin. 25
Figura 3.2 - Diagrama esquemático equivalente do template core.sin. 27
Figura 3.3 – Parâmetros obtidos a partir da curva de histerese. 29
Figura 3.4 – Modelo magnético equivalente do núcleo e enrolamentos. 30
Figura 3.5 – Modelo eletromagnético equivalente da fase A e das culatras para o simulador utilizado. 31
Figura 3.6 – protótipo do filtro eletromagnético. 35
Figura 3.7. Diagrama simplificado para ensaio laboratorial 36
Figura 3.8 – Arranjo experimental para ensaio do filtro eletromagnético..... 37
Figura 3.9 – Forma de onda da corrente na linha A do alimentador, sem a presença do filtro. 39
Figura 3.10 – Forma de onda da corrente na linha B do alimentador, sem a presença do filtro. 39
Figura 3.11 – Forma de onda da corrente na linha C do alimentador, sem a presença do filtro. 40
Figura 3.12 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador sem a presença do filtro... 41
Figura 3.13 – Forma de onda da corrente na linha A do alimentador, na presença do filtro. .. 42
Figura 3.14 – Forma de onda da corrente na linha B do alimentador, na presença do filtro.... 43
Figura 3.15 – Forma de onda da corrente na linha C do alimentador, na presença do filtro.... 44

Figura 3.16 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador na presença do filtro. 45
Figura 3.17 – Forma de onda da corrente na linha A do filtro. 46
Figura 3.18 – Forma de onda da corrente na linha B do filtro. 47
Figura 3.19 – Forma de onda da corrente na linha C do filtro. 48
Figura 3.20 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador sem a presença do filtro... 49
Figura 4.1 – Reator com taps para 1, 2 e 3mH. 54
Figura 4.2 – Corrente na linha A do alimentador para diferentes valores da impedância do sistema. 55
Figura 4.3 – Corrente na linha A do filtro para diferentes valores da impedância do sistema. 56
Figura 4.4 – Corrente no neutro do alimentador para diferentes valores da impedância do sistema. 57
Figura 4.5 – Corrente no neutro do filtro para diferentes valores da impedância do sistema. . 58
Figura 4.6 – Tensões desequilibradas utilizadas nos estudo. 60
Figura 4.7 -- Corrente na linha A do alimentador. 61
Figura 4.8 - Corrente na linha A do filtro. 62
Figura 4.9 -- Corrente no neutro do alimentador. 63
Figura 4.10 - Corrente no neutro do filtro. 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Templates magnéticos disponíveis no simulador computacional..... 24
Tabela 3.2 - Características do protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero..... 35
Tabela 3.3 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional..... 37
Tabela 4.1 - Síntese das medições utilizadas para avaliação do desempenho do filtro..... 53

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS MONOFÁSICAS E TRIFÁSICAS 2

1.3 - QUANTIFICAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS 5

1.4 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE SEQÜÊNCIA ZERO 6

1.5 - SOLUÇÕES PARA A ATENUAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS 8

1.6 - AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO 9

1.7 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 10

CAPÍTULO II

PRINCÍPIO OPERACIONAL DOS FILTROS DE SEQÜÊNCIA ZERO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS 12

2.2 - PRINCIPIO FÍSICO DA COMPENSAÇÃO 13

2.3 - FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA COMPENSAÇÃO 15

2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 19

CAPÍTULO III

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS 21

3.2 - ESTRATÉGIAS PARA A MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA 22

3.2.1 - EQUAÇÕES ELÉTRICAS 22

3.2.2 - EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS 23

2.2.3 - USO DE RELUTÂNCIAS E FORÇAS MAGNETOMOTRIZES 23

3.3 - MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO 25

3.3.1 - TEMPLATES UTILIZADOS 25

3.3.2 - MODELO DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO 29

3.3.3 - MODELAGEM DA HISTERESE 32

3.3.4 - TEMPLATE UTILIZADO PARA A SIMULAÇÃO DIGITAL 32

3.4 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL 35

3.4.1 - CORRENTE DE LINHA DO ALIMENTADOR – SEM FILTRO 38

3.4.2 - CORRENTE DE LINHA DO ALIMENTADOR – COM FILTRO 41

3.4.3 - CORRENTE DE LINHA DO FILTRO 46

3.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS 50

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS 52

4.2 - ENSAIOS DE DESEMPENHO 53

4.2.1 - VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA 54

4.2.2 - TENSÕES DESEQUILIBRADAS DE FORNECIMENTO 59

4.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS 64

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 66

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS 67

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, o tema "Qualidade da Energia Elétrica" vem recebendo destacada importância dentro do cenário elétrico nacional.

A má qualidade da energia pode acarretar grandes impactos nos mais distintos grupos de consumidores, a saber, o residencial, o comercial e o industrial. Estes, à luz de maiores conhecimentos de seus direitos previstos pela legislação e também diante do emprego, cada dia maior, de dispositivos altamente sensíveis aos padrões do suprimento elétrico, já não ignoram que o fornecimento da energia deve, necessariamente, ocorrer na forma de um serviço que reúna propriedades como: segurança, continuidade, qualidade e outros.

As concessionárias de eletricidade estão, da mesma forma, preocupadas com os problemas envolvendo a qualidade da energia. Atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança, por vários motivos, tem gerado grandes motivações junto às empresas. Dentre outros fatores, com os movimentos atuais em direção à competitividade entre as concessionárias, a qualidade do fornecimento da energia torna-se assaz importante. Aliada a estes fatores, a existência de uma legislação própria, a qual prevê sanções aos supridores que

não adequarem seus serviços aos índices estabelecidos, contribui para o estudo e pesquisa da qualidade da energia com o intuito de conferir uma melhoria nos padrões da qualidade do fornecimento de forma a assegurar o bom funcionamento dos sistemas elétricos.

1.2 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS MONOFÁSICAS E TRIFÁSICAS

O termo "Qualidade da Energia Elétrica" está relacionado a uma série de fatores que podem afetar e/ou comprometer o suprimento elétrico oferecido aos consumidores. Neste contexto, qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou freqüência da tensão e/ou corrente elétrica caracteriza uma rede elétrica com qualidade comprometida. Destaque deve ser dado à tensão de suprimento, a qual, idealmente, deve ser perfeitamente equilibrada, senoidal, com amplitude e freqüência constantes.

Reconhecendo que os distúrbios que determinam os desvios da qualidade da energia, ou mais especificamente, da tensão, são amplamente conhecidos em vários os setores da sociedade e, em especial, no meio acadêmico, considera-se desnecessário tecer maiores comentários sobre os distintos indicadores de qualidade nesta dissertação. Por tais motivos, as discussões posteriores serão orientadas diretamente ao tema principal da presente pesquisa, qual seja, a questão das distorções harmônicas.

É comum reconhecer que, partindo da barra geradora e caminhando em direção à carga, constata-se um aumento dos níveis de distorção da tensão. Isto se deve, sobremaneira, ao fato que os pontos centrais de geração dos harmônicos se localizam junto às cargas supridas e, muitas vezes, estas são responsáveis por formas de onda de corrente bastante distorcidas [1]. A maioria destes fenômenos ocorre de forma periódica, produzindo componentes múltiplas inteiras da freqüência fundamental do sistema. Daí o termo *harmônicas* para descrever a distorção da forma de onda.

Muito embora a grande divulgação dos conceitos básicos atrelados a esta área de conhecimentos, não é demais lembrar que a distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares localizados no sistema de potência. A figura 1.1 ilustra o caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não linear no qual a tensão e a corrente variam de acordo com a curva apresentada. Enquanto a tensão aplicada é puramente senoidal, a corrente resultante é distorcida. Esta situação ilustra o surgimento das distorções harmônicas nos sistemas elétricos.

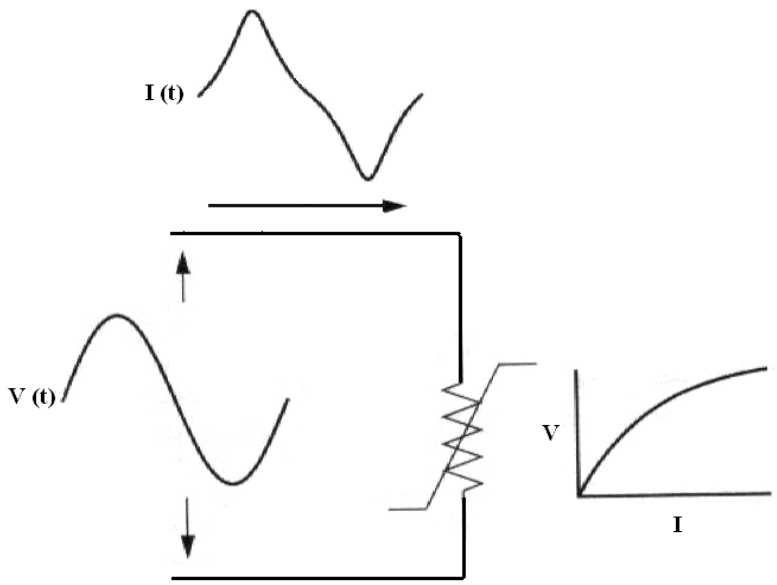


Figura 1.01 - Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não linear.

Também, é amplamente conhecido que uma onda não senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas senoidais puras, cada qual constituída por uma freqüência múltipla inteira da freqüência fundamental da onda original. Esta interpretação advém da conhecida Série de Fourier, a qual é graficamente ilustrada na figura 1.2.

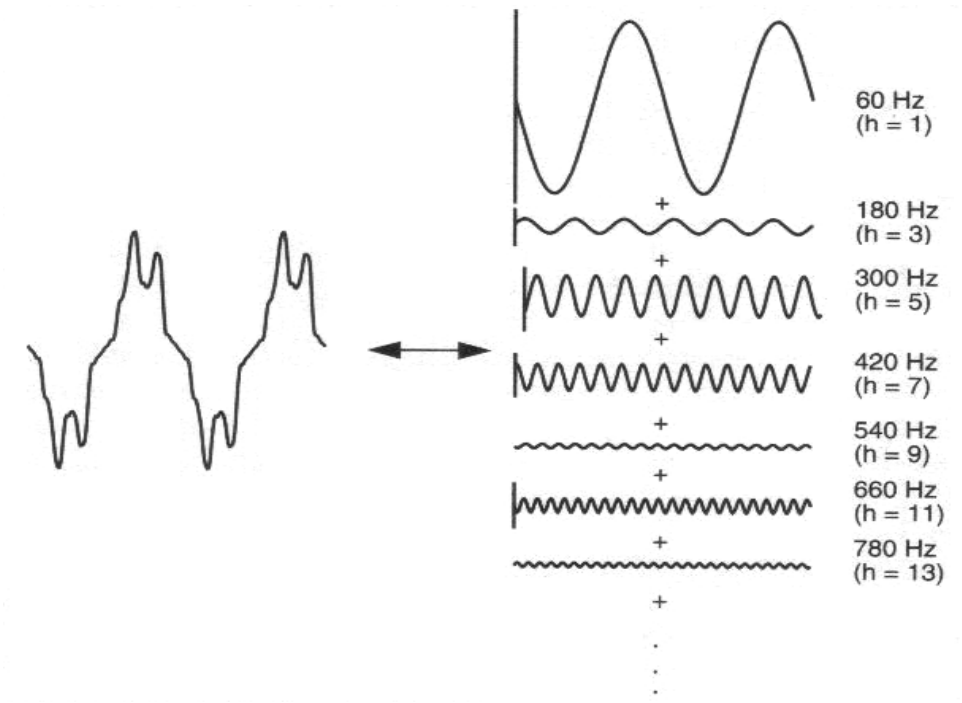


Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da Série de Fourier.

Tradicionalmente, a literatura trata o assunto em pauta considerando tão somente arranjos monofásicos, fato este não consoante com a realidade operacional da maioria das redes elétricas. De fato, quando o assunto envolve sistemas trifásicos, a não ser para os casos em que estes se apresentam totalmente equilibrados e a modelagem monofásica pode ser utilizada, os demais sistemas trifásicos, apresentando-se de forma desequilibrada, exigem procedimentos distintos. Neste particular, o método das componentes simétricas se apresenta como uma excelente ferramenta para a descrição do comportamento de tais arranjos. Este procedimento, também bastante útil nos estudos voltados para a análise de redes, consiste no tratamento de um conjunto de correntes de fase (ou tensões) desbalanceadas em três sistemas balanceados chamados seqüência positiva, seqüência negativa e seqüência zero. Este último sistema assume grande importância para o contexto desta pesquisa, visto que o assunto principal a ser tratado refere-se aos mecanismos para a filtragem de componentes harmônicas de seqüência zero. Estas componentes podem advir de sistemas trifásicos operando sob condições equilibradas e/ou sob condições

desequilibradas. O tema será explorado em maiores detalhes ao longo do trabalho.

1.3 – QUANTIFICAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Um dos índices mais utilizados para a caracterização dos níveis de distorção presentes nos sinais de tensões ou correntes consiste no emprego da denominada "Distorção Harmônica Total". As equações (1.1) e (1.2) sintetizam tais definições:

$$\mathrm{DHV_T} = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{máx}} V_n^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \tag{1.1}$$

$$\mathrm{DHI_T} = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{máx}} I_n^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \tag{1.2}$$

Onde:

$\mathrm{DHV_T}$ = distorção harmônica total de tensão

$\mathrm{DHI_T}$ = distorção harmônica total de corrente

V_n = valor eficaz da tensão de ordem n

I_n = valor eficaz da corrente de ordem n

V_1 = valor eficaz da tensão fundamental

I_1 = valor eficaz da corrente fundamental

n = ordem da componente harmônica

Para algumas aplicações específicas, a literatura recomenda complementar as informações acima através de indicativos individuais para as distorções de tensão ou corrente. Para tanto, mundialmente utiliza-se a conhecida "Distorção Harmônica Individual". As equações (1.3) e (1.4) expressam tais definições.

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} x100\ (\%) \tag{1.3}$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} x100\ (\%) \tag{1.4}$$

Onde:

DHV_I - distorção harmônica individual de tensão.

DHI_I - distorção harmônica individual de corrente.

1.4 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE SEQÜÊNCIA ZERO

Objetivando os interesses deste trabalho, nesta seção é dada atenção especial à presença das denominadas harmônicas triplas, ou seja, aquelas múltiplas da terceira harmônica (h = 3, 9, 15, 21, ...). Estas freqüências se manifestam na forma de componentes de seqüência zero exigindo, para a sua manifestação, a existência de conexões em estrela aterrada para o suprimento e pela carga e, quando isto ocorre, como ilustra a figura 1.3, surge um expressivo carregamento para os neutros dos sistemas trifásicos. Este carregamento de neutro, dentre outros efeitos, constitui-se em grande nocividade para o funcionamento de muitos sistemas.

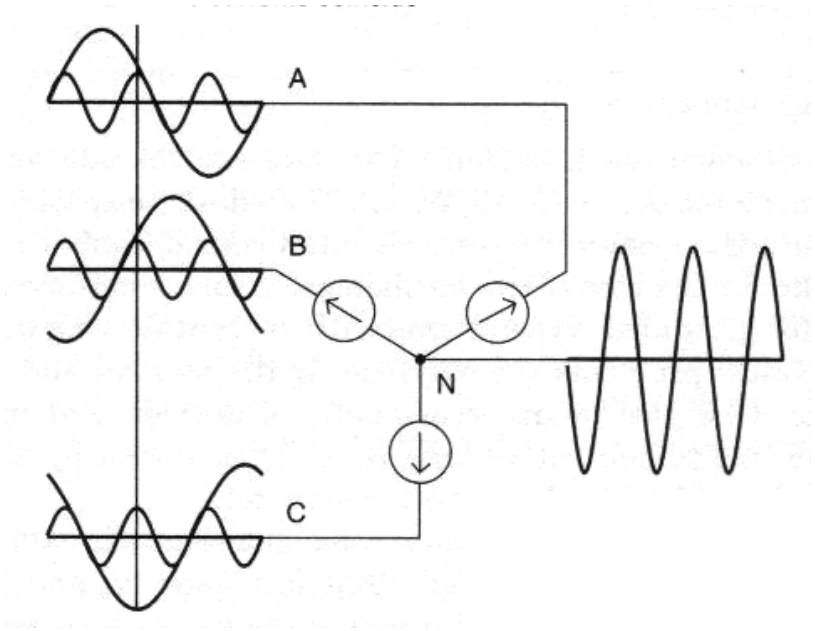


Figura 1.3 - Corrente no condutor neutro de circuitos alimentando cargas não lineares monofásicas.

Muito embora a tônica das discussões tenha sido orientada para o caso de sistemas não senoidais trifásicos e equilibrados, vale observar que as componentes de seqüência zero podem ser ainda incrementadas quando do funcionamento de instalações trifásicas em que a rede e/ou a carga se apresentam desequilibradas. Nestas situações, além das denominadas componentes triplas, há de se reconhecer que as demais freqüências podem também produzir componentes de seqüência com as características da seqüência zero aqui considerada. Caso isto aconteça, o fenômeno da circulação de correntes harmônicas pelo neutro fica fortalecido, sem contar ainda com a freqüência fundamental que também poderá existir.

Dentre os problemas típicos causados pelas harmônicas de seqüência zero pode-se citar, além do sobreaquecimento do condutor neutro, interferências em sistemas de comunicação, diferenças de potenciais entre terra e neutro, etc. Estes motivos, por si só, são de reconhecida importância e, muitas vez, exigem medidas corretivas para a atenuação dos problemas.

1.5 – SOLUÇÕES PARA A ATENUAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O procedimento mais utilizado para a redução ou eliminação das distorções harmônicas tem sido a instalação de filtros passivos, os quais são formados por indutores, capacitores e resistores, configurados de forma a sintonizar a freqüência que se queira eliminar. A referência [2] apresenta as potencialidades e limitações destes dispositivos. Em [3] são apresentadas diversas configurações para os filtros passivos. Estes arranjos são amplamente utilizados por apresentarem, via de regra, os menores custos quando comparados a outros dispositivos de mitigação de harmônicos.

Além dos passivos, uma outra família de filtros, denominada filtros ativos, firmou-se como uma solução tecnicamente viável. Tais dispositivos são baseados em sofisticada eletrônica de potência e seu funcionamento se dá pela injeção de correntes harmônicas de mesma magnitude que as produzidas pelas cargas não lineares, porém com uma defasagem tal que proporcione a compensação harmônica desejada no projeto do equipamento. A referência [3] apresenta algumas configurações de filtros ativos e suas combinações com outros tipos de filtros. Em [4] é apresentada uma configuração utilizada para o cancelamento de correntes no condutor neutro em sistemas de distribuição a três fases e quatro fios, utilizando um transformador delta/estrela e um filtro ativo controlado por chaveamento PWM.

Uma outra possibilidade considerada na literatura baseia-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos. Dentro do contexto do uso destes dispositivos para a redução de distorções harmônicas, as referências [5, 6] apresentam uma configuração do sistema de energia utilizando transformadores defasadores para a mitigação das correntes harmônicas. Um produto comercialmente disponível no mercado internacional é apresentado em [7]. Esta referência não esclarece o princípio funcional do dispositivo, porém o arranjo sugere o uso de unidades

defasadoras. Uma outra estratégia remete ao emprego de um dispositivo eletromagnético de forma a promover uma baixa impedância de seqüência zero, ligado em paralelo com a carga não linear. Em [8], uma configuração para o filtro eletromagnético de seqüência zero é apresentada, todavia, sem tecer maiores comentários construtivos ou operacionais. Em [9, 10, 11] são utilizados transformadores de baixa impedância de seqüência zero em paralelo com a carga geradora de harmônicos, sendo que em [10] é utilizada a ligação delta/estrela e em [11] a ligação utilizada é a zigue-zague. Já as referências [12, 13] apresentam um estudo mais especifico sobre o filtro eletromagnético de seqüência zero, sendo este equipamento o objeto de estudo desta dissertação.

1.6 – AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Uma vez discutidas as soluções atualmente cabíveis ao controle das distorções harmônicas nas redes elétricas e estabelecidas as diretrizes que nortearam a presente pesquisa, vale ressaltar que esta dissertação apresenta os seguintes contribuições direcionadas ao domínio da tecnologia dos dispositivos mitigadores de harmônicos utilizando dispositivos eletromagnéticos:

- Identificação dos princípios funcionais dos filtros eletromagnéticos paralelo, voltados para a atenuação da injeção de componentes harmônicas de corrente de seqüência zero nas redes de alimentação;
- Estabelecimento de um modelo matemático/computacional representativo de arranjos eletromagnéticos fundamentados em relutâncias e forças magnetomotrizes;
- Incorporação do modelo do filtro eletromagnético focado numa base computacional no domínio do tempo, para fins de estudo de desempenho conjunto com uma rede elétrica;
- Utilização de um protótipo de filtro em experimentos voltados para validação da modelagem desenvolvida;

- Realização de testes laboratoriais e computacionais para avaliação de desempenho da proposta desta dissertação no que tange a eficácia do processo de atenuação das distorções.

1.7 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com vistas a atender as metas supracitadas, este trabalho apresenta-se estruturado da seguinte maneira:

Capítulo II – Princípio Operacional do Filtro de Seqüência Zero

Destina-se a apresentar arranjos físicos e eletromagnéticos para o filtro, além de seu princípio de funcionamento.

Capítulo III - Modelagem Computacional do Filtro Eletromagnético de Seqüência Zero

Orientado para a obtenção do modelo do filtro eletromagnético e sua respectiva validação. Apresenta a estratégia de simulação no domínio do tempo, o protótipo utilizado nos ensaios laboratoriais e o *template* utilizado na simulação.

Capítulo IV - Análise de Desempenho do Filtro Eletromagnético de Seqüência Zero

Destinado a apresentar testes de desempenho do protótipo submetido a diferentes características físicas e elétricas do sistema de suprimento;

Capítulo V – Conclusões Gerais

Apresenta as principais conclusões do trabalho como um todo, bem como sugere futuros desenvolvimentos dentro do tema aqui abordado.

Capítulo VI – Referências Bibliográficas

CAPÍTULO II

PRINCÍPIO OPERACIONAL DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como estabelecido no Capítulo I, uma das formas para a atenuação da injeção de componentes harmônicas de seqüência zero nas redes elétricas de suprimento e respectivos neutros fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos. Muito embora o reconhecimento que esta filosofia possa originar diferentes propostas [9, 10, 11], esta dissertação encontra-se direcionada ao emprego da estratégia destacada em [13]. Esta consiste no uso de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se consegue um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de seqüência zero. Este arranjo foi denominado por "Filtro Eletromagnético de Seqüência Zero" e consiste no cerne desta pesquisa.

Dentro deste enfoque, este capítulo tem por objetivo:

- Apresentar o princípio físico do funcionamento dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero;
- Estabelecer as bases matemáticas que mostram a operacionalidade do filtro para as componentes harmônicas de corrente de seqüência nula.

2.2 – PRINCÍPIO FÍSICO DA COMPENSAÇÃO

A figura 2.1 mostra uma instalação típica constituída por uma rede elétrica genérica, uma carga geradora de harmônicos e o filtro paralelo. Através deste arranjo é possível visualizar o mecanismo da eliminação das componentes harmônicas de seqüência zero (em especial a terceira harmônica) quanto a sua circulação ao longo da rede de suprimento. Como se vê, o propósito maior do filtro está em prover meios para que as mencionadas componentes harmônicas fiquem restritas ao circuito composto pela carga e o filtro propriamente dito. Em outras palavras, assim como para o caso dos filtros passivos convencionais, não há uma alteração do conteúdo harmônico produzido pela carga, mas sim, um desvio em seu caminho de circulação.

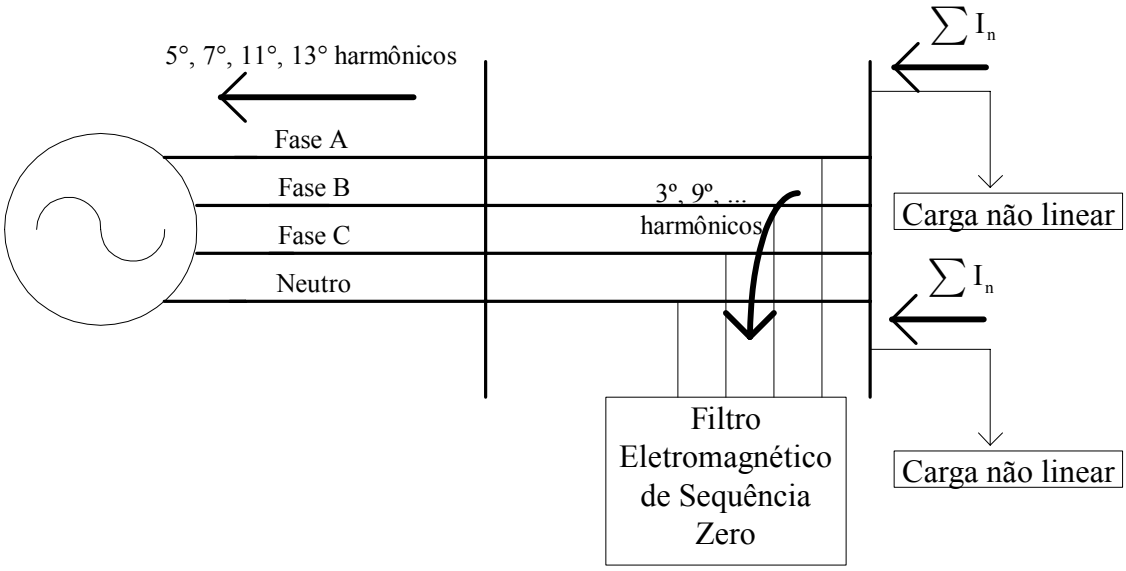


Figura 2.1 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero.

Observando-se o circuito envolvido no processo, fica claro que o desempenho do filtro possui forte dependência com a relação entre a impedância do filtro (em paralelo) e a impedância do sistema, como sugere o circuito equivalente simplificado de seqüência zero ilustrado na figura 2.2.

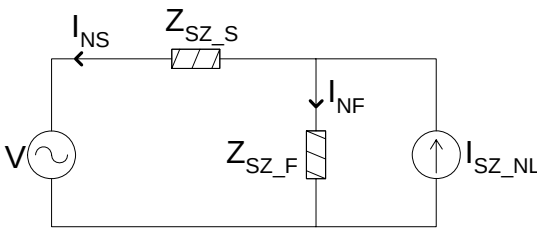


Figura 2.2 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero.

A luz do princípio da superposição, o efeito da corrente de seqüência zero produzida pela carga pode ser descrito por:

$$I_{NF} = \frac{Z_{SZ_S}}{Z_{SZ_S} + Z_{SZ_F}} . I_{SZ_NL} \tag{2.1}$$

Sendo:

I_{SZ_NL} - Corrente de seqüência zero gerada pela carga não linear;

I_{NF} - Corrente de seqüência zero através do neutro do filtro paralelo;

Z_{SZ_S} - Impedância de seqüência zero do sistema de suprimento;

Z_{SZ_F} - Impedância de seqüência zero do filtro paralelo;

A equação anterior revela que, quanto menor a impedância de seqüência zero do filtro, em relação à mesma impedância do sistema de alimentação, maior será sua eficiência em drenar as correntes harmônicas de seqüência zero.

Por outro lado, a corrente resultante no neutro da fonte, após a inserção do filtro paralelo, pode ser calculada por:

$$I_{NS} = \frac{Z_{SZ_F}}{Z_{SZ_F} + Z_{SZ_S}} . I_{SZ_NL} \tag{2.2}$$

Sendo:

I_{NS} - Corrente de seqüência zero através do neutro do sistema.

Mais uma vez, a equação (2.2) mostra que a corrente no neutro do sistema de suprimento será tão menor quanto maior for a impedância de seqüência zero do sistema quando comparada com a impedância de seqüência zero do filtro. Esta situação nem sempre pode ser encontrada na prática, pois dependerá fortemente do local onde o filtro é instalado no sistema elétrico. Desta forma, é conveniente ressaltar que a eficácia de um filtro eletromagnético, nos termos aqui considerados, pode ser fortemente afetada pelas características da rede elétrica à qual o mesmo se encontra inserido. Este assunto voltará a ser explorado nesta dissertação (Capítulo IV).

2.3 – FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA COMPENSAÇÃO

O arranjo final para o filtro, conforme indicado em [13], constitui-se pela composição magnética e elétrica ilustrada na figura 2.3.

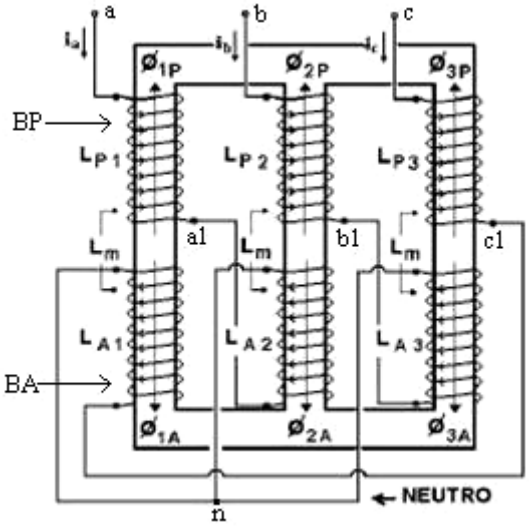


Figura 02.3 - Arranjo físico do Filtro de seqüência zero.

Na figura:

BP, BA - Bobina principal e auxiliar, respectivamente;

$L_{P(1)}$, $L_{P(2)}$, $L_{P(3)}$ - Indutância própria da bobina principal dos núcleos 1, 2 e3, respectivamente;

$L_{A(1)}$, $L_{A(2)}$, $L_{A(3)}$ - Indutância própria da bobina auxiliar dos núcleos 1, 2 e 3, respectivamente;

L_M - Indutância mútua;

Φ_{1P}, Φ_{2P}, Φ_{3P} - Fluxo referente à bobina principal das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

Φ_{1A}, Φ_{2A}, Φ_{3A} - Fluxo referente à bobina auxiliar das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

Sob o ponto de vista magnético, a composição física anterior pode ser vista como ilustrada na figura 2.4.

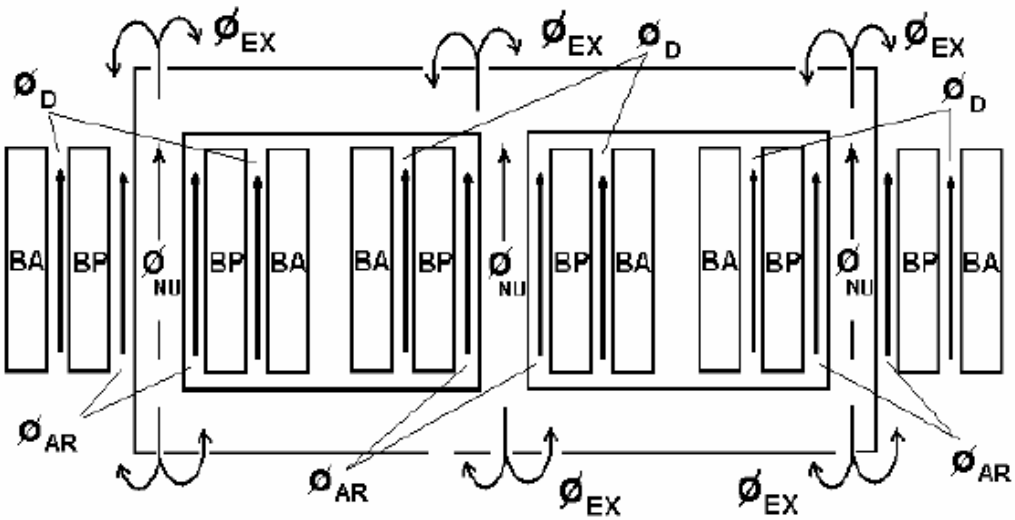


Figura 2.4 - Distribuição magnética para o filtro de seqüência zero.

Φ_D – fluxo de dispersão entre $L_{P(1)}$ e $L_{A(1)}$, $L_{P(2)}$ e $L_{A(2)}$, e $L_{P(3)}$ e $L_{A(3)}$;

Φ_{AR} – fluxo pelo caminho de ar entre o núcleo magnético e $L_{P(1)}$, $L_{P(2)}$ e $L_{P(3)}$;

Φ_{EX} – fluxo entre a culatra superior e a culatra inferior através do ar e/ou tanque;

Φ_{NU} – fluxo equivalente da interação entre os fluxos Φ_{1P} e Φ_{1A}, Φ_{2P} e Φ_{2A}, Φ_{3P} e Φ_{3A}, que circula pelo material ferromagnético.

Como visto, cada coluna é composta por dois enrolamentos, denominados bobina principal (BP) e auxiliar (BA), construídos com o mesmo número de espiras e ligados em zigue-zague. Desta forma, cada coluna magnética apresenta uma força magnetomotriz (FMM) resultante de duas fontes, as quais combinam os correspondentes efeitos da corrente de linha. Esta interação, aliada à considerações construtivas e operacionais do sistema elétrico, deve conduzir a um caminho de baixa impedância para as componentes de seqüência zero. O motivo disto está atrelado ao fato que esta impedância irá concorrer com a impedância harmônica do sistema de fornecimento, servindo como caminho alternativo às correntes enfocadas.

Para se obter uma baixa impedância às harmônicas a serem filtradas e outras propriedades, numa primeira análise, o dispositivo em questão deve possuir e operar sob as seguintes condições:

- Ser suprido por um sistema trifásico equilibrado de tensões;
- As resistências ôhmicas e as indutâncias de dispersão de cada bobina são admitidas como nulas;
- A operação do dispositivo deve ocorrer na região linear;
- Ambos os enrolamentos, para uma mesma coluna, devem possuir indutâncias próprias de igual valor, isto é: $L_{P(1)}=L_{A(1)}=L_{P(2)}=L_{A(2)}=L_{P(3)}=L_{A(3)}$;
- O coeficiente de acoplamento magnético (k) entre os enrolamentos principal e auxiliar é considerado unitário, logo $L_M=L_{P(i)}=L_{A(i)}=L$.

A partir destas premissas e usando a representação no domínio do tempo, as seguintes equações para as tensões fase-neutro podem ser determinadas:

$$v_{an}(t) = V_{aa1}(t) - V_{na1}(t) \tag{2.3}$$

$$v_{bn}(t) = V_{bb1}(t) - V_{nb1}(t) \tag{2.4}$$

$$v_{cn}(t) = V_{cc1}(t) - V_{nc1}(t) \tag{2.5}$$

Substituindo as tensões acima por suas expressões em função das indutâncias e correntes tem-se que:

$$v_{an}(t) = L_{P(1)}.\frac{di_a}{dt} - L_M.\frac{di_c}{dt} - L_M.\frac{di_b}{dt} + L_{A(2)}.\frac{di_a}{dt}) \tag{2.6}$$

$$v_{bn}(t) = L_{P(2)}.\frac{di_b}{dt} - L_M.\frac{di_a}{dt} - L_M.\frac{di_c}{dt} + L_{A(1)}.\frac{di_b}{dt}) \tag{2.7}$$

$$v_{cn}(t) = L_{P(3)}.\frac{di_c}{dt} - L_M.\frac{di_b}{dt} - L_M.\frac{di_a}{dt} + L_{A(1)}.\frac{di_c}{dt}) \tag{2.8}$$

Lembrando que a indutância mútua entre dois enrolamentos é dada por:

$$L_M = k.\sqrt{L_{P(i)}L_{A(i)}} \tag{2.9}$$

Respeitando o pressuposto que k=1, a indutância mútua será igual à indutância principal ou auxiliar (L).

Desta forma, simplificando as equações das tensões fase-neutro, tem-se:

$$v_{an}(t) = L.(2\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} - \frac{di_c}{dt}) \tag{2.10}$$

$$v_{bn}(t) = L.(2\frac{di_b}{dt} - \frac{di_a}{dt} - \frac{di_c}{dt}) \tag{2.11}$$

$$v_{cn}(t) = L.(2\frac{di_c}{dt} - \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt}) \tag{2.12}$$

Convertendo as equações (2.10)-(2.12) para o domínio da freqüência e considerando a aplicação especifica para uma ordem harmônica genérica "n" as tensões fase-neutro são:

$$\dot{V}_{AN_n} = \mathrm{j}\,\mathrm{n}\,\omega\,\mathrm{L}(2\,\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{A}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{B}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{C}_n}) \tag{2.13}$$

$$\dot{V}_{BN_n} = \mathrm{j}\,\mathrm{n}\,\omega\,\mathrm{L}(2\,\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{B}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{A}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{C}_n}) \tag{2.14}$$

$$\dot{V}_{CN_n} = \mathrm{j}\,\mathrm{n}\,\omega\,\mathrm{L}(2\,\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{C}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{A}_n} - \dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{B}_n}) \tag{2.15}$$

Impondo-se que as correntes que circulam pelo filtro sejam de ordem 3 chega-se as seguintes expressões para as tensões fase-neutro:

$$\dot{V}_{AN3} = j3\omega L(2I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3) \tag{2.16}$$

$$\dot{V}_{BN3} = j3\omega L(2I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3) \tag{2.17}$$

$$\dot{V}_{CN3} = j3\omega L(2I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3 - I_3\angle\theta_3) \tag{2.18}$$

De acordo com as equações (2.16), (2.17) e (2.18), as composições fasoriais das correntes harmônicas de ordem 3 resultam em tensões de terceiro harmônico nulas. A interpretação física para o resultado anterior é que para a freqüência em questão a impedância de seqüência zero é igual a zero. Se esta situação ideal ocorrer, toda a corrente harmônica de seqüência zero é desviada para o filtro paralelo.

2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi desenvolvido de forma a apresentar as premissas da mitigação de correntes harmônicas de seqüência zero através do uso do filtro eletromagnético. As partes constituintes e arranjos físicos do dispositivo foram

apresentados. A partir destes arranjos foram tecidos comentários objetivando esclarecer os princípios físicos que norteiam a sua operação e, sequencialmente, através de um tratamento matemático, ficou evidenciado o mecanismo através do qual se processa o surgimento de um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de seqüência zero.

CAPÍTULO III

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Estudos operacionais envolvendo o filtro eletromagnético de seqüência zero, sob condições de regime transitório ou permanente, da mesma forma que para todo e qualquer fenômeno elétrico, podem ocorrer através do uso da simulação digital. Este procedimento permite analisar o desempenho de dispositivos e sistemas elétricos sob variadas condições, a custos baixos, sem a necessidade da construção de protótipos ou sistemas em escala reduzida e com menor esforço de tempo. Diante disso, esse capítulo apresenta um modelo computacional do filtro, valendo-se das vantagens supracitadas.

Dentro deste enfoque, este capítulo contempla os seguintes pontos básicos:

- Apresenta, de forma sucinta, as principais formas atualmente utilizadas para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos a partir de técnicas no domínio do tempo;
- Destaca os recursos pré-existentes, destinados à modelagem de componentes elétricos e magnéticos, conforme requerido pelo equipamento focado nesta pesquisa;

- Promove estudos avaliativos sobre a eficácia e qualidade da modelagem para fins da reprodução de fenômenos de regime permanente relacionados com a operação dos filtros eletromagnéticos.

3.2 – ESTRATÉGIAS PARA A MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA

Diversas abordagens têm sido usadas para a modelagem de transformadores, reatores e outros dispositivos eletromagnéticos [14, 15, 17]. Essas podem ser classificadas em estratégias fundamentadas em: equações elétricas; equações elétricas e magnéticas; e, alternativamente, através de relutâncias magnéticas e forças magnetomotrizes. O simulador computacional utilizado nesta pesquisa faz uso deste último procedimento, o qual exerce grande atração pelas suas vantagens intrínsecas.

A seguir, procede-se a uma breve discussão sobre os princípios que norteiam as metodologias mencionadas acima.

3.2.1 Equações elétricas

O circuito elétrico equivalente fundamenta-se, como é classicamente conhecido, nos seguintes elementos: indutâncias não lineares para representar os circuitos magnéticos das colunas e culatras; indutâncias lineares representando os fluxos de dispersão e resistências para a inclusão das perdas no cobre. Desta forma, os fenômenos magnéticos são traduzidos em componentes elétricos e as tradicionais equações de equilíbrio entre as tensões constituem-se na base da modelagem. Este é o procedimento típico utilizado para representar, por exemplo, os transformadores.

3.2.2 Equações elétricas e magnéticas

Neste contexto o filtro é representado por meio de equações diferenciais e algébricas envolvendo os enrolamentos e os fluxos magnéticos que os acoplam. O procedimento de modelagem faz uso da analogia clássica entre circuitos elétricos e circuitos magnéticos, o que permite derivar as equações nodais que relacionam as forças magnetomotrizes nodais no núcleo do reator às forças magnetomotrizes produzidas pelos enrolamentos. Este procedimento origina uma matriz de relutâncias (ou de permeâncias) relacionando as grandezas: fluxo e força magnetomotriz.

A utilização dessa abordagem para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos implica na necessidade de se escrever as equações diferenciais e algébricas envolvendo os enrolamentos e os fluxos magnéticos que os acoplam e, qualquer alteração na ligação dos enrolamentos requer que as equações sejam reescritas. Adicionalmente, o usuário deverá escolher uma linguagem e uma plataforma para o desenvolvimento do programa de simulação, definindo os tipos de saídas para os dados que serão gerados pelo programa. Sem dúvida, haverá grande demanda de tempo e esforço de programação, contrariando a tendência crescente de uso de uma plataforma computacional voltada especificamente para a simulação de sistemas elétricos, na qual os usuários atêm-se na observação dos fenômenos e na análise dos resultados.

3.2.3 Uso de relutâncias e forças magnetomotrizes

A modelagem do dispositivo nos termos acima mencionados baseia-se na representação do dispositivo através de seus circuitos magnéticos equivalentes, nos quais as relutâncias representam os caminhos do fluxo magnético e as forças magnetomotrizes representam os enrolamentos [17]. Assim, quando uma tensão

é aplicada numa bobina enrolada sobre um núcleo magnético tal que por ela circule uma corrente elétrica, uma força magnetomotriz é gerada no núcleo magnético. Por outro lado, a variação do fluxo magnético em um núcleo pode gerar uma força eletromotriz numa bobina enrolada sobre este núcleo.

O simulador computacional utilizado possui uma variedade de blocos de dispositivos (modelos representados por templates) incorporados e disponibilizados em sua biblioteca, capazes de simular os fenômenos elétricos e magnéticos concomitantemente. Os principais templates que modelam os dispositivos eletromagnéticos são relacionados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Templates magnéticos disponíveis no simulador computacional.

Dispositivo	Nome do *template*
Núcleo magnético linear	*core.sin*
Núcleo magnético não linear	*corenl.sin*
Indutor com acoplamento mútuo	*ml.sin*
Enrolamento	*wind.sin*

O modelo eletromagnético acoplado tem diversas vantagens sobre os modelos matemáticos convencionais que usam somente uma estratégia de equivalentes (elétrico ou magnético). Uma delas reside no fato que diferentes configurações de núcleos magnéticos e tipos de ligações dos enrolamentos podem ser facilmente derivados. Uma outra se fundamenta no fato que esta representação permite a visualização das grandezas elétricas e magnéticas calculadas em qualquer segmento ou parte do filtro. Devido a estas vantagens, este trabalho fará uso desta estratégia para a modelagem do filtro eletromagnético.

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

O primeiro passo para a realização de um estudo computacional no simulador utilizado consiste na criação de uma *netlist*, a qual corresponde a uma lista de chamadas de modelos elétricos e magnéticos, especificando os modelos (*templates*) a serem usados no sistema a ser simulado e como eles estão conectados entre si. Esta etapa define um arquivo texto de entrada para o simulador.

3.3.1 – *Templates* utilizados

Quando o sistema elétrico a ser simulado contém um enrolamento de um transformador, na *netlist* aparecerá, necessariamente, em uma das linhas, uma referência ao *template wind.sin*, o qual é esquematicamente ilustrado na figura 3.1.

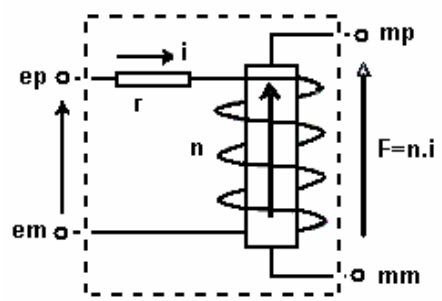


Figura 3.1 – Diagrama esquemático equivalente do template wind.sin.

Os parâmetros principais do *template wind.sin*, destacados na figura anterior, são:

ep, em - Terminais elétricos, ep = positivo e em = negativo;

Mp, mm - Terminais magnéticos, mp = positivo e mm = negativo;

N - Número de espiras da bobina;

R - Resistência elétrica da bobina.

As equações que descrevem o *template wind.sin* são:

$$v = r.i + n.\frac{d\varphi}{dt} \tag{3.1}$$

$$F = n.i \tag{3.2}$$

Sendo:

F - Força magnetomotriz (A-espira);

φ - Fluxo magnético (Wb);

i - Corrente elétrica (A);

v - Tensão aplicada (V).

A corrente elétrica (i) circulando no enrolamento da bobina produz uma força magnetomotriz (F) entre os terminais magnéticos do enrolamento, os quais podem ser ligados aos terminais magnéticos do núcleo. A força magnetomotriz produzida na bobina é aplicada ao núcleo, produzindo um fluxo magnético (φ) cuja intensidade e natureza dependerão das características magnéticas do material e da geometria do núcleo, isto é, de sua relutância magnética (R). A relação entre F e R é dada pela expressão:

$$F = R.\varphi \tag{3.3}$$

Sendo:

R - Relutância do núcleo magnético

Caso a relutância do núcleo seja linear, ela será representada pelo *template core.sin*. Os principais parâmetros requeridos pelo referido *template*

são a área da secção transversal, o comprimento e a permeabilidade do material do núcleo, como mostrado na figura 3.2.

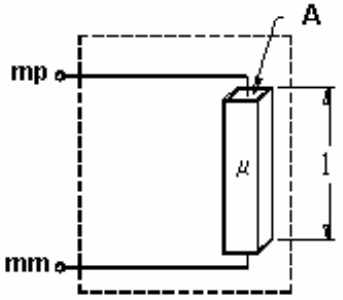


Figura 3.2 - Diagrama esquemático equivalente do template core.sin.

Sendo:

mp, mm - Terminais magnéticos, mp = positivo e mm = negativo;

L - Comprimento do núcleo magnético (m);

A - Área transversal do núcleo magnético (m^2);

μ - Permeabilidade do material do núcleo magnético (H/m).

A relutância magnética pode, de um modo geral, ser expressa pela equação a seguir:

$$R = \frac{l}{\mu.A} = \frac{l}{\mu_r.\mu_0.A} \tag{3.4}$$

Sendo:

μo - Permeabilidade magnética do vácuo (H/m).

μr - Permeabilidade magnética relativa do material do núcleo.

No simulador utilizado, a relutância não linear de um núcleo de material ferromagnético é representada pelo *template corenl.sin*. Assim como a relutância linear, a relutância não linear possui duas conexões (p, m) declaradas como pinos magnéticos. Isto significa que ele é tratado como um elemento

inteiramente dentro do circuito magnético. Além do comprimento e da área do núcleo, outros parâmetros são requeridos pelo *template corenl.sin*:

matl - material do núcleo. Para cada material na biblioteca do programa existe um dado que caracteriza a curva B-H do material;
sf - fator de empilhamento;
ui - Permeabilidade inicial;
uhc - Permeabilidade coerciva;
Bmax - Maior valor de B disponível para o material;
Hmax - Maior valor de H disponível para o material;
Bsat - valor de B na curva B-H que corresponde ao H de saturação;
Hsat - ponto na curva B-H no qual as curvas inferior e superior se encontram e tornam-se quase que indistinguíveis;
Br - valor de B quando h retorna a zero. Este é o ponto no qual a curva superior B-H corta o eixo y;
Hc - força coerciva, valor de H necessário para mover B=br para B=0. É o ponto no qual a curva superior B-H passa pelo eixo x;
ptemp - especifica a temperatura na qual todos os parâmetros acima estão definidos;
tau - especifica o tempo de atraso entre o campo aplicado e o campo efetivo;
B0 - valor do B inicial de offset;
tempc - especifica a temperatura de operação do template corenl;
units - seleciona o sistema de unidades (Gaussiano ou SI).

Os parâmetros Br, Bsat, Hsat, Bmax, Hmax e Hc podem ser retirados da curva de histerese do material magnético utilizado no filtro eletromagnético de seqüência zero.

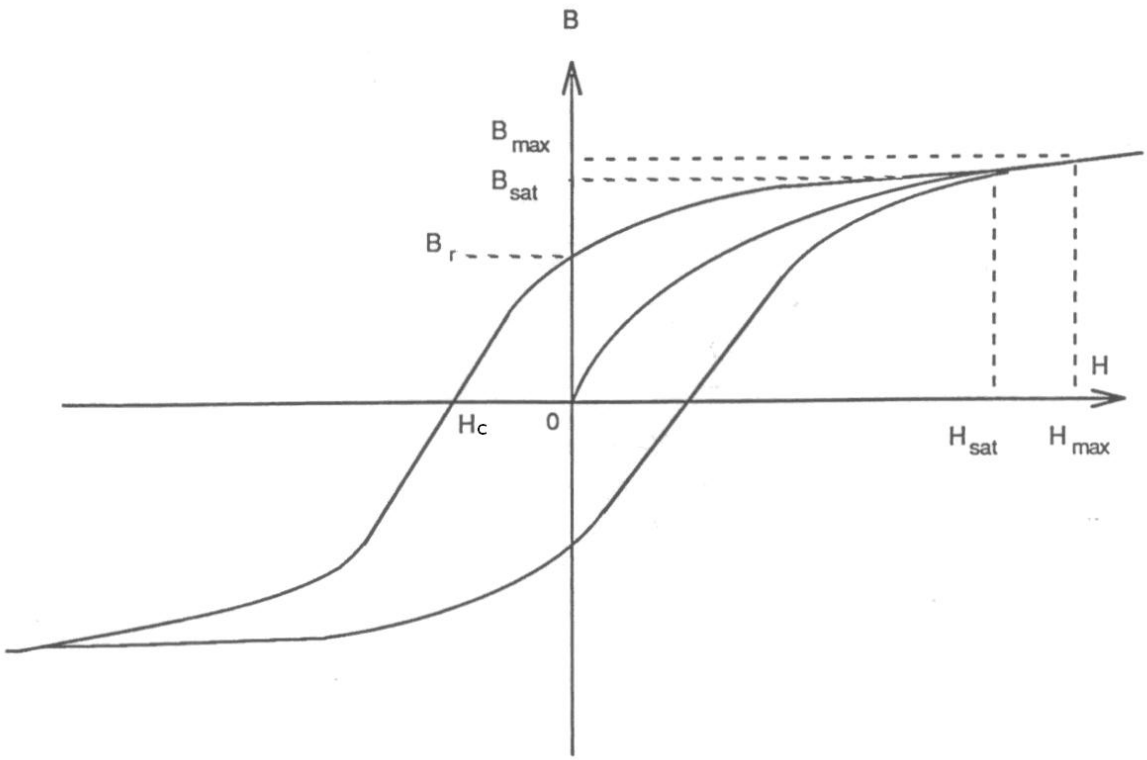


Figura 3.3 – Parâmetros obtidos a partir da curva de histerese.

3.3.2 – Modelo do filtro eletromagnético

O modelo completo do filtro eletromagnético, objeto dos estudos, se estabelece pela combinação dos três tipos básicos de *templates* (*wind.sin*, *core.sin* e *corenl.sin*) [14], permitindo a construção de um novo *template*, se necessário, destinado à representação de vários tipos de filtros que resultam das diferentes ligações dos enrolamentos e configurações de núcleo magnético. A facilidade de se conectar os *templates* torna a implementação de modelos de filtros eletromagnéticos uma tarefa relativamente simples e direta.

Reportando ao arranjo físico do filtro sob consideração, pode-se derivar o circuito magnético equivalente formado pela combinação das relutâncias e FMM's mostrado na figura 3.4. Como se vê, esta última figura substitui os enrolamentos por fontes de fmm e as seções magnéticas por relutâncias. Ainda,

objetivando uma modelagem mais exata, constata-se a inclusão de caminhos magnéticos através do ar, os quais são indicativos das indutâncias de dispersão, antes desconsideradas. As relutâncias em negrito estão associadas com as partes magnéticas sujeitas à saturação enquanto que as demais são representativas das partes não saturáveis (ar).

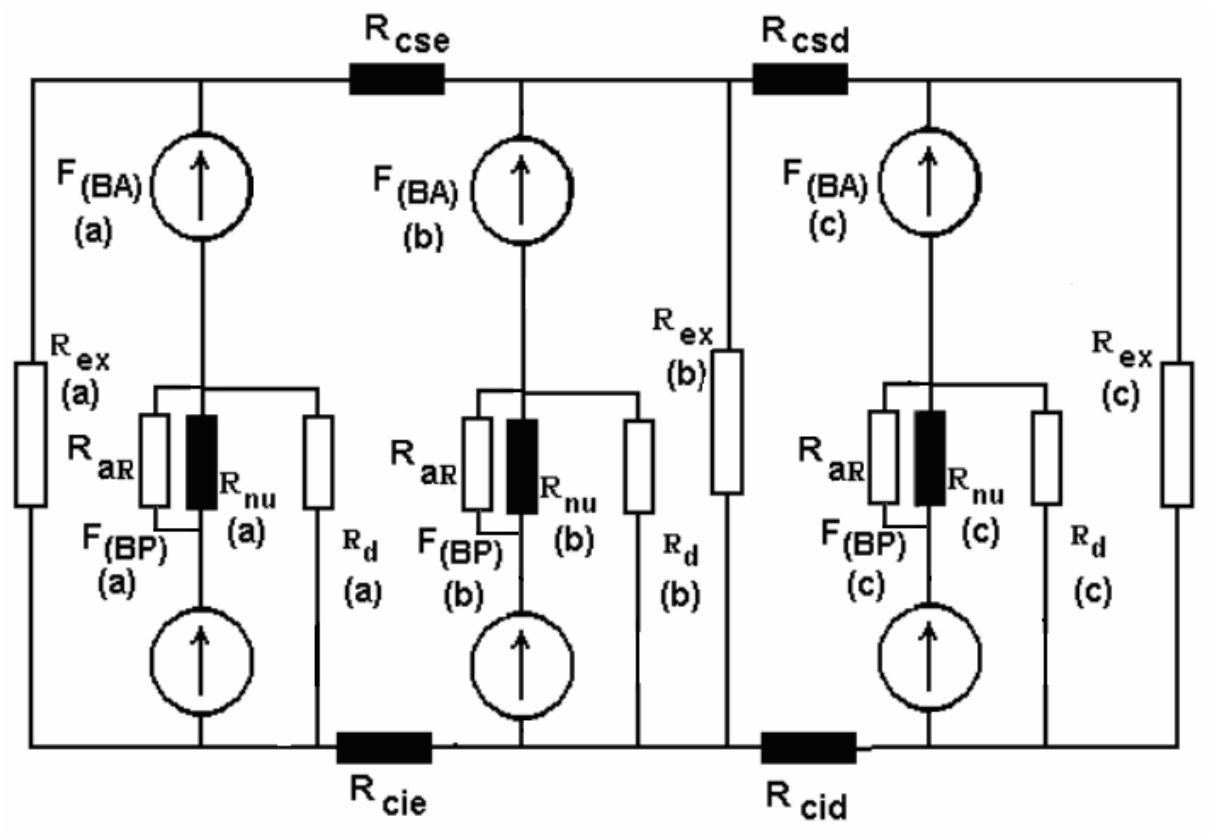


Figura 3.4 – Modelo magnético equivalente do núcleo e enrolamentos.

Onde:

$F_{BP(i)}$; $F_{BA(i)}$ - Força magnetomotriz do enrolamento principal e auxiliar, respectivamente, para cada coluna;

$R_{NU(i)}$, R_{CSE}, R_{CSD}, R_{CIE} e R_{CID} - Relutâncias não lineares correspondentes ao núcleo ferromagnético e culatras;

$R_{EX(i)}$ - Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão entre as culatras superior e inferior, para cada coluna;

$R_{D(i)}$ - Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão equivalente entre os enrolamentos de uma mesma fase;

$R_{ar(i)}$ - Relutâncias lineares representando o espaço de ar entre a coluna de material ferromagnético e o enrolamento interno de cada fase.

A figura 3.5, por sua vez, mostra o modelo eletromagnético em consonância com os recursos disponibilizados pelo simulador utilizado.

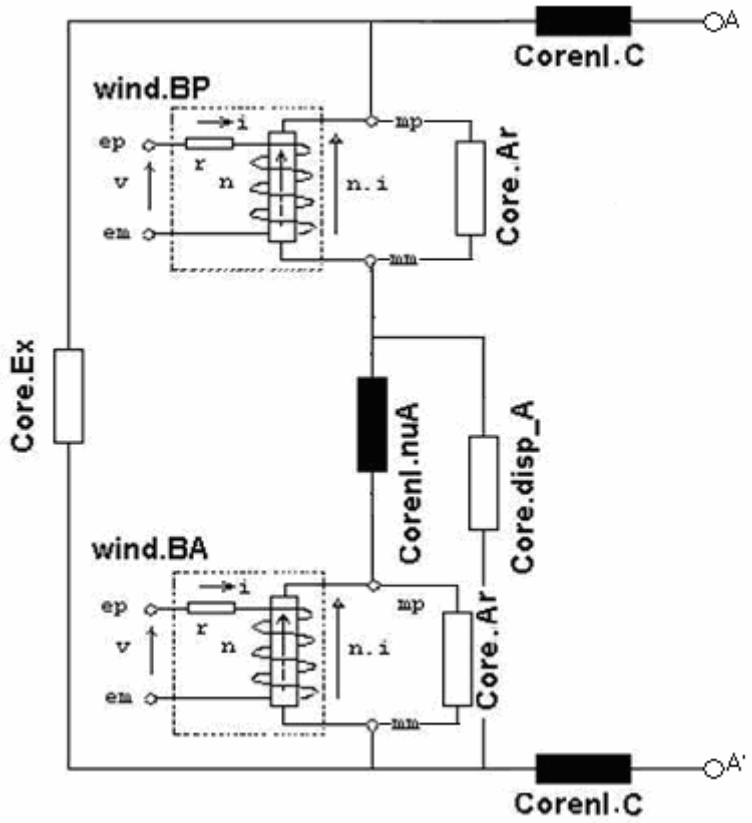


Figura 3.5 – Modelo eletromagnético equivalente da fase A e das culatras para o simulador utilizado.

Para as simulações, foi desprezada a dispersão de fluxo entre as bobinas e o ar, representada pelo *template core.Ar*, tendo em vista que ela assume papel significativo somente quando o núcleo magnético está fortemente saturado, o que não acontece neste caso, já que o dispositivo trabalha na região linear. Ainda, os terminais dos enrolamentos (*templates wind*) ficam acessíveis para a

composição dos arranjos elétricos em zigue-zague exigidos na montagem do filtro eletromagnético.

3.3.3 – Modelagem da histerese

Para fins deste trabalho, como mencionado, far-se-á uso do *template corenl*. Este *template*, como já visto anteriormente, permite a inclusão de dados sobre a magnetização do material utilizado de forma a representar com fidelidade o comportamento do núcleo não linear. Os dados necessários para a modelagem da não linearidade foram colhidos a partir de ensaios no filtro eletromagnético de seqüência zero, conforme apresentado na referência [18].

3.3.4 – *Template* utilizado para a simulação digital

A partir do exposto, foi possível a elaboração do *template* destinado à modelagem do filtro eletromagnético de seqüência zero, ilustrado a seguir. Deve-se ressaltar que os valores numéricos expressam os parâmetros do protótipo empregado. Alguns destes valores foram extraídos de ensaios, medições laboratoriais e outros fornecidos pelo fabricante.

```
# filtro eletromagnético de seqüência zero trifásico ------

# dados nucleo trifasico; nuA=coluna A; nuB=coluna central;
areanu=26.49e-04
compnuA=0.181
compnuC=0.181
compnuB=0.181
compCSE=0.032
compCSD=0.032
compCIE=0.032
compCID=0.032
alt_nu=0.241
area_disp=11.1143e-4
```

```
altbA=0.121
altbB=0.121
altbC=0.121
lar_ex=0.2879
area_szero=18.4229e-4
comp=0,206+0,05+0,05+4*0,03621
compnuEX=0.4011
r1=0.721/2

#enrolamentos-----------------------------------------------

# fase A
wind.PA PAe PAs mPA1 mPA2=n=133, r=r1
wind.AA pc PCs mAA1 0=n=133, r=r1

# fase B
wind.PB PBe PBs mPB1 mPB2=n=133, r=r1
wind.AB pc PAs mAB1 mAB2=n=133, r=r1

# fase C
wind.PC PCe PCs mPC1 mPC2=n=133, r=r1
wind.AC pc PBs mAC1 mAC2=n=133, r=r1

# núcleos ----------------------------------------------------

# núcleo 1
corenl.nuA mPA2 mAA1 = len=compnuA, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

core.dspRdA 0 mPA2=area=area_disp, len=altbA,
ur=1,geo_units=meter

core.dspRexA 0 mPA1=area=area_disp, len=alt_nu,
ur=1,geo_units=meter

# núcleo 2
corenl.nuB mPB2 mAB1 = len=compnuB, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

core.dspRdB mAB2 mPA2=area=area_disp, len=altbB,
ur=1,geo_units=meter

core.dspRexB mAB2 mPB1=area=area_disp, len=alt_nu,
ur=1,geo_units=meter

# núcleo 3
corenl.nuC mPC2 mAC1 = len=compnuC, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,    hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss
```

```
core.dspRdC mAC2 mPC2=area=area_disp, len=altbC, ur=1,
geo_units=meter

core.dspRexC mAC2 mPC1=area=area_disp, len=alt_nu,
ur=1,geo_units=meter


# culatras superiores
corenl.cse mPA1 mPB1 = len=compCSE, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

corenl.csd mPB1 mPC1 = len=compCSD, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

# culatras inferiores
corenl.cie 0 mAB2 = len=compCIE, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

corenl.cid mAB2 mAC2 = len=compCID, area=areanu, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=16412,hmax=8.5,bsat=13528,hsat=5.024,
br=900,  hc=1,ptemp=20,tau=0)],  tempc=20,units=gauss

# relutância de seqüênia zero
core.szeroB mAB1 0=area=area_szero, len=lar_ex, ur=1,
geo_units=meter

# Fim da template
```

3.4 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

A validação do modelo computacional consiste essencialmente em se comparar os resultados extraídos das medições realizadas em laboratório com outros correspondentes obtidos das simulações digitais. Para tanto, um protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero foi utilizado.

A figura 3.6 mostra a fotografia do protótipo utilizado, cujas características fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na tabela 3.2.

Figura 3.6 – protótipo do filtro eletromagnético.

Tabela 3.2 - Características do protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero.

Tensão fase-fase	220 V
Potência trifásica	2000 VA
Número de espiras da BP e BA	133
Área bruta do núcleo	26,49 cm^2
Fator de empilhamento	0,95
Altura da janela	12,1 cm
Altura do núcleo	24,1 cm
Impedância de dispersão	0,1704 Ω

Desta forma, como fonte de suprimento, foi utilizado um sistema trifásico equilibrado com tensão V=220V, e impedância Z_{sist}= 0,4 + j 0,754Ω, alimentando uma carga não linear. Esta última foi constituída por três retificadores monofásicos formando uma unidade trifásica, com o neutro interligado ao neutro do sistema, conforme ilustrado no diagrama simplificado da figura 3.7. Isto permite a circulação dos harmônicos de seqüência zero, tanto nos ensaios laboratoriais quanto nas simulações computacionais.

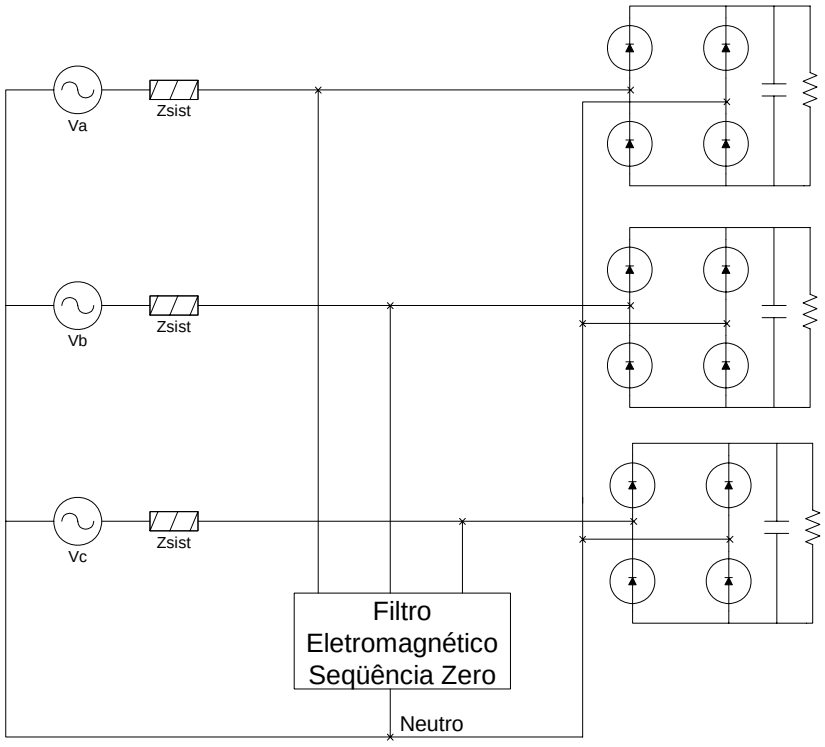


Figura 3.7. Diagrama simplificado para ensaio laboratorial

A figura 3.8 mostra o arranjo laboratorial utilizado para ensaio do protótipo do filtro eletromagnético, seguindo o esquema ilustrado acima. As tensões equilibradas foram obtidas através de uma fonte trifásica controlada HP6834 de 4,5kVA.

Os resultados obtidos para as distintas situações estudadas, como esclarece a tabela 3.3, serão apresentados e discutidos na seqüência.

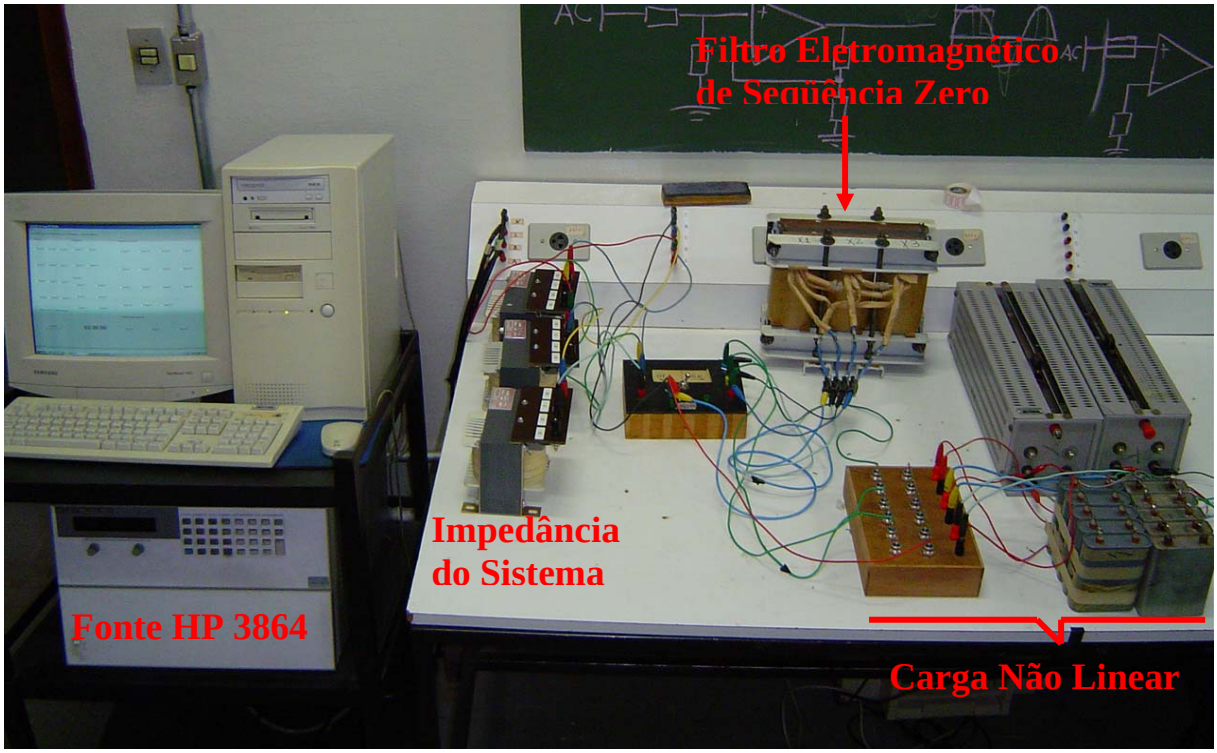


Figura 3.8 – Arranjo experimental para ensaio do filtro eletromagnético.

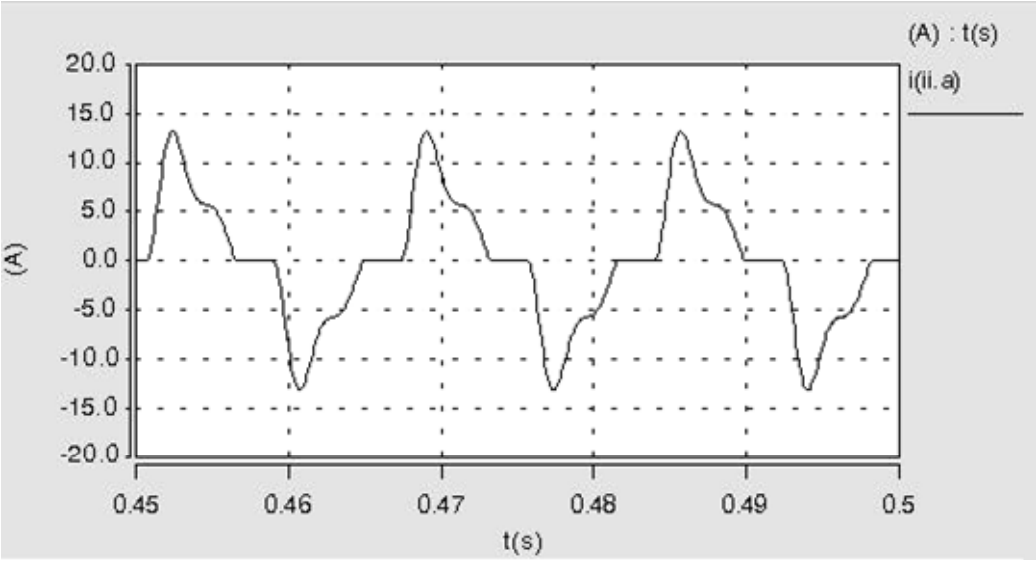
Tabela 3.3 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional

Local da medição	Resultado apresentado	Figura
Alimentador sem a presença do filtro	Corrente fase A	3.9 (a) e (b)
	Corrente fase B	3.10 (a) e (b)
	Corrente fase C	3.11 (a) e (b)
	Espectro harmônico	3.12 (a) e (b)
Alimentador com a presença do filtro	Corrente fase A	3.13 (a) e (b)
	Corrente fase B	3.14 (a) e (b)
	Corrente fase C	3.15 (a) e (b)
	Espectro harmônico	3.16 (a) e (b)
Filtro	Corrente fase A	3.17 (a) e (b)
	Corrente fase B	3.18 (a) e (b)
	Corrente fase C	3.19 (a) e (b)

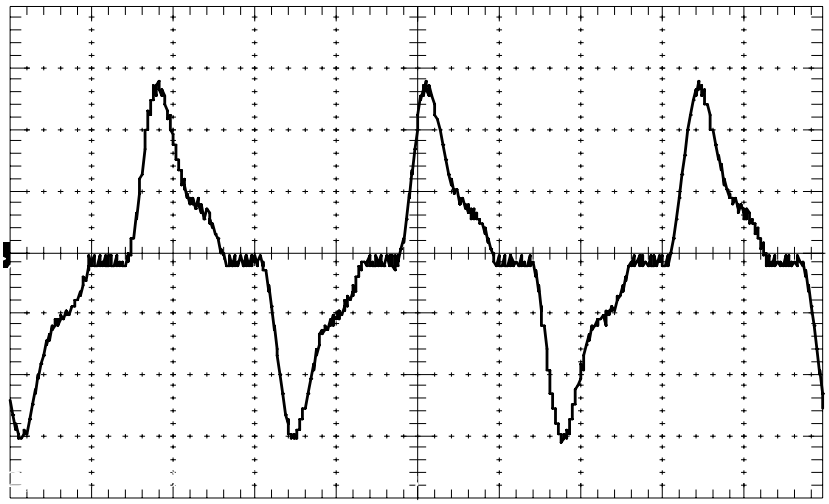
	Espectro harmônico	3.20 (a) e (b)

3.4.1 – Corrente de linha do alimentador – sem filtro

Iniciando, as figuras 3.9, 3.10 e 3.11 apresentam, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do alimentador, sem a presença do filtro eletromagnético. As figuras identificadas como (a) representam os resultados computacionais enquanto que aquelas definidas como (b) expressam os resultados experimentais, cujas escalas são de 5A/Divisão.

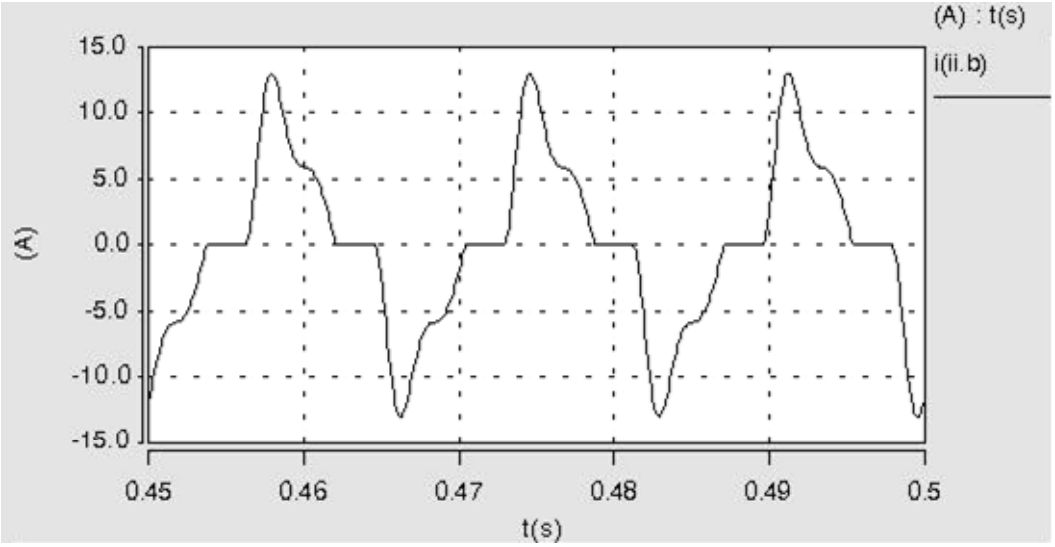


(a) computacional

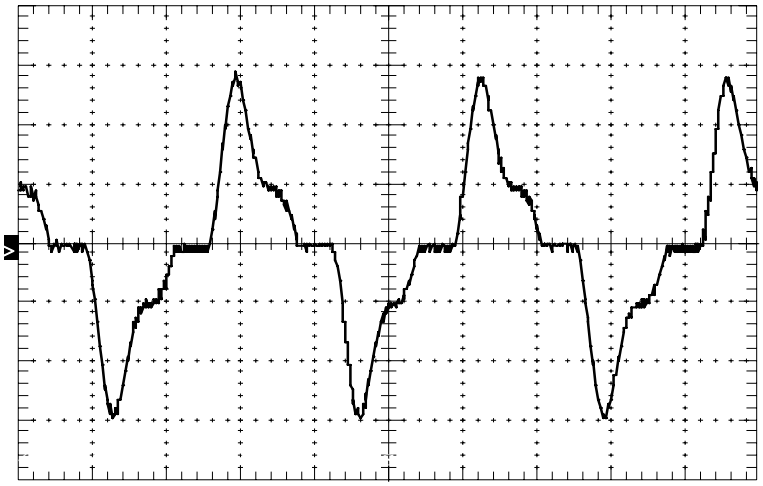


(b) experimental

Figura 3.9 – Forma de onda da corrente na linha A do alimentador, sem a presença do filtro.

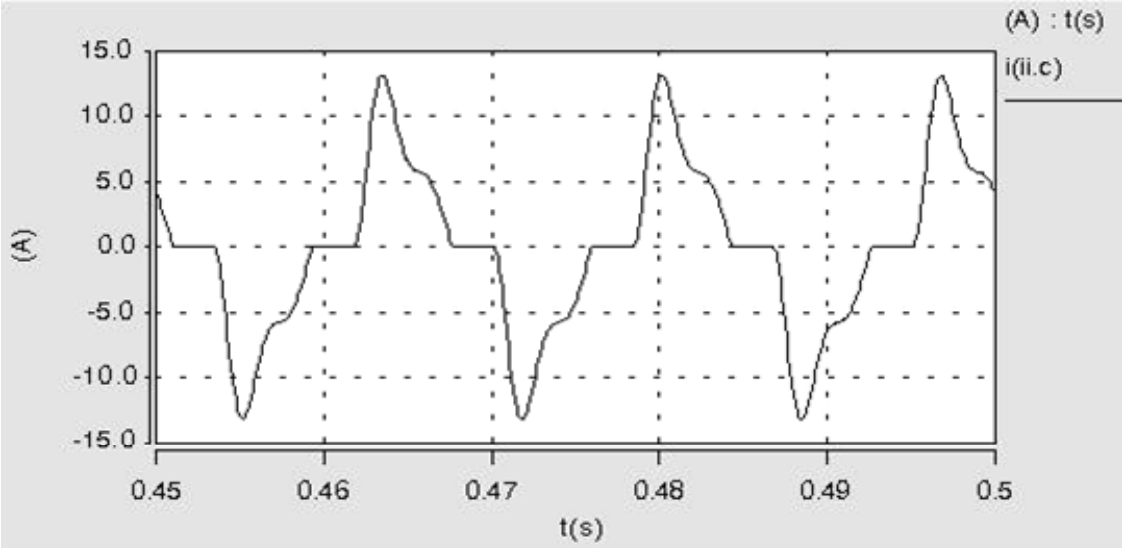


(a) computacional

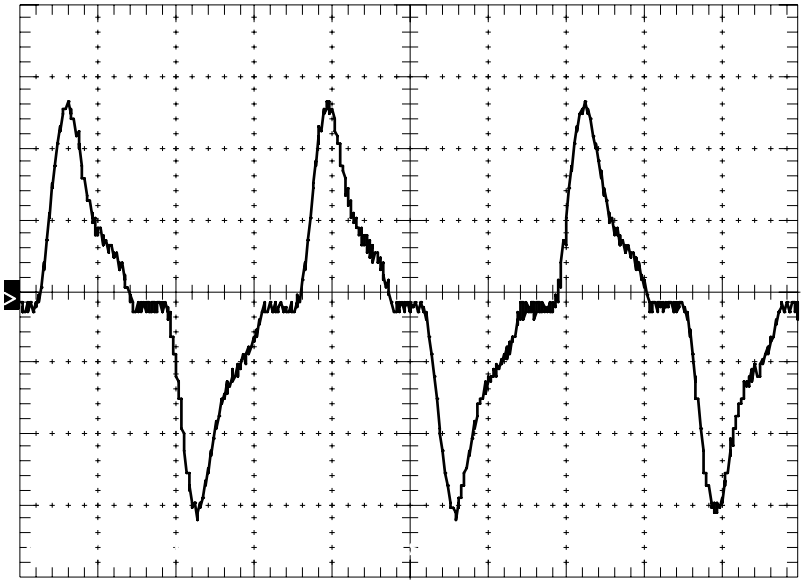


(b) experimental

Figura 3.10 – Forma de onda da corrente na linha B do alimentador, sem a presença do filtro.



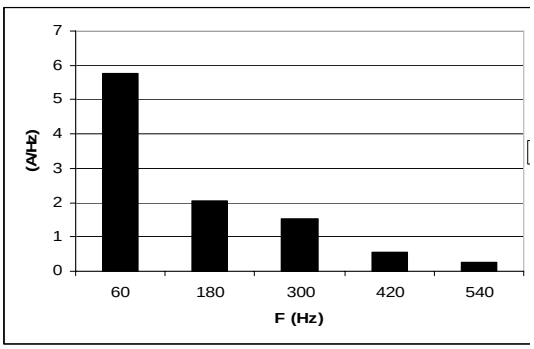
(a) computacional



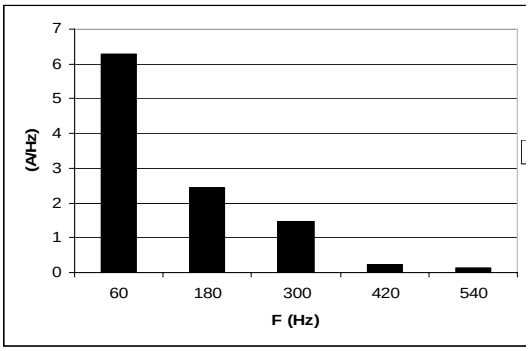
(b) experimental

Figura 3.11 – Forma de onda da corrente na linha C do alimentador, sem a presença do filtro.

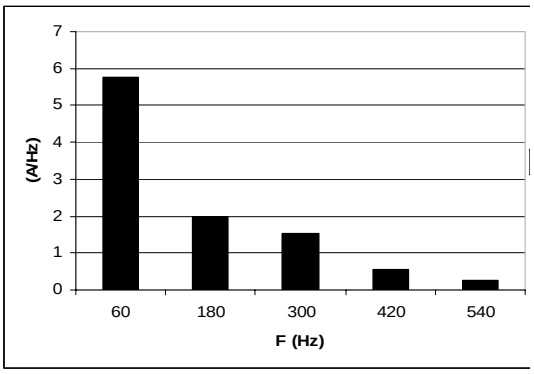
Complementarmente, a figura 3.12 fornece os correspondentes espectros de freqüência para as correntes anteriores. Mais uma vez aquelas associadas com a letra (a) são os resultados computacionais e as (b) com os correspondentes resultados experimentais.



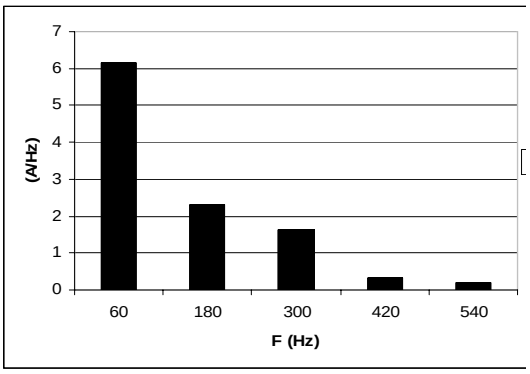
Linha A - computacional



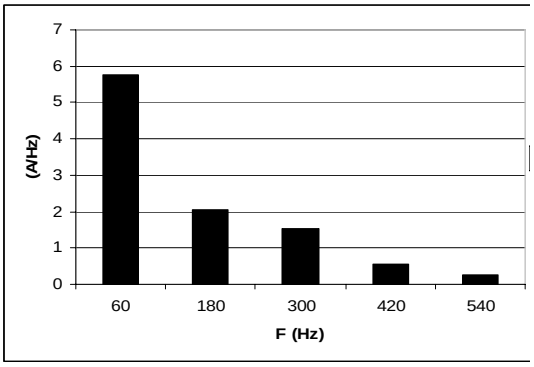
Linha A - experimental



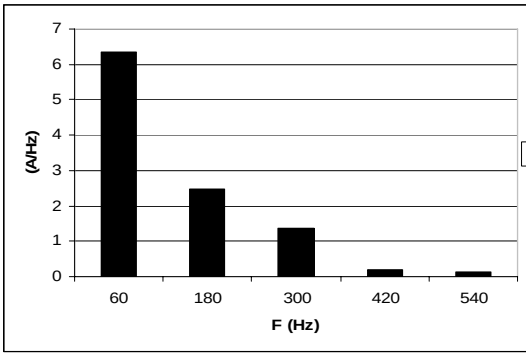
Linha B - computacional



Linha B - experimental



Linha C - computacional

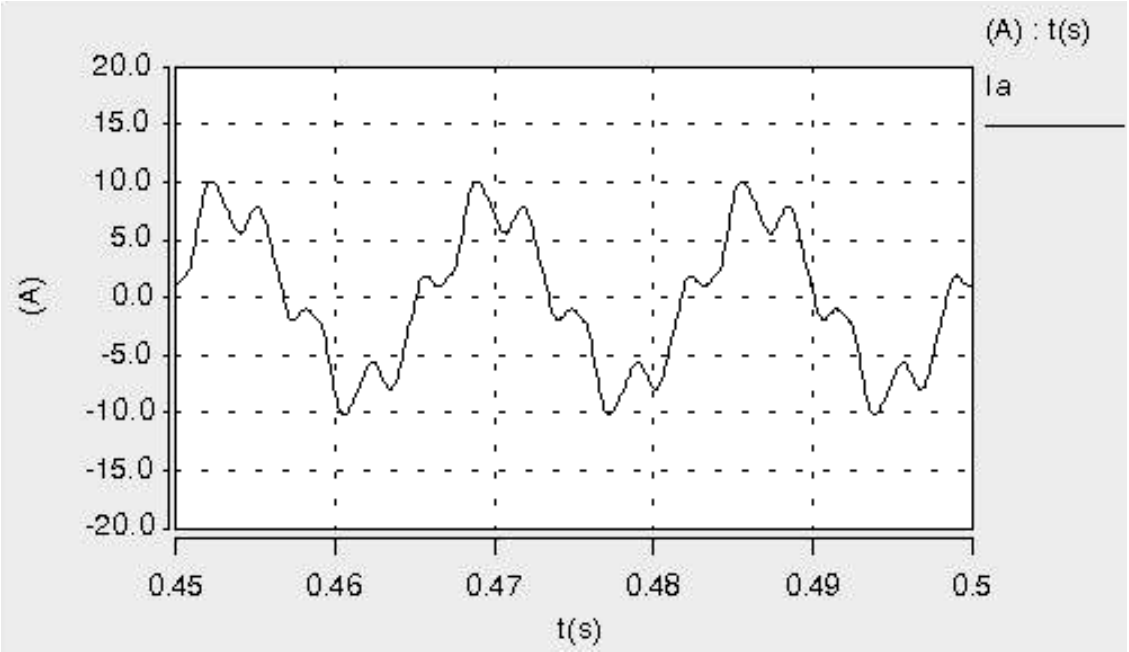


Linha C - experimental

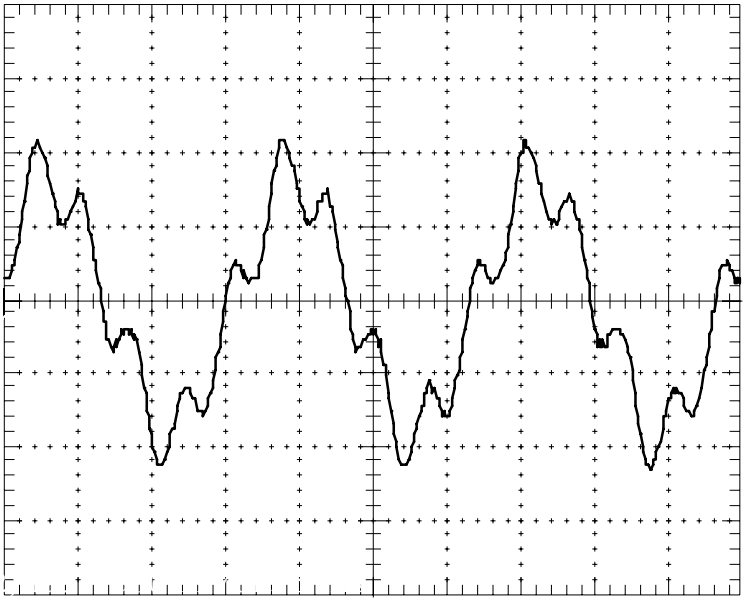
Figura 3.12 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador sem a presença do filtro.

3.4.2 – Corrente de linha do alimentador – com filtro

As figuras 3.13, 3.14 e 3.15 apresentam, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, com a presença do filtro eletromagnético. Novamente, as escalas dos gráficos experimentais são de 5A/Divisão.

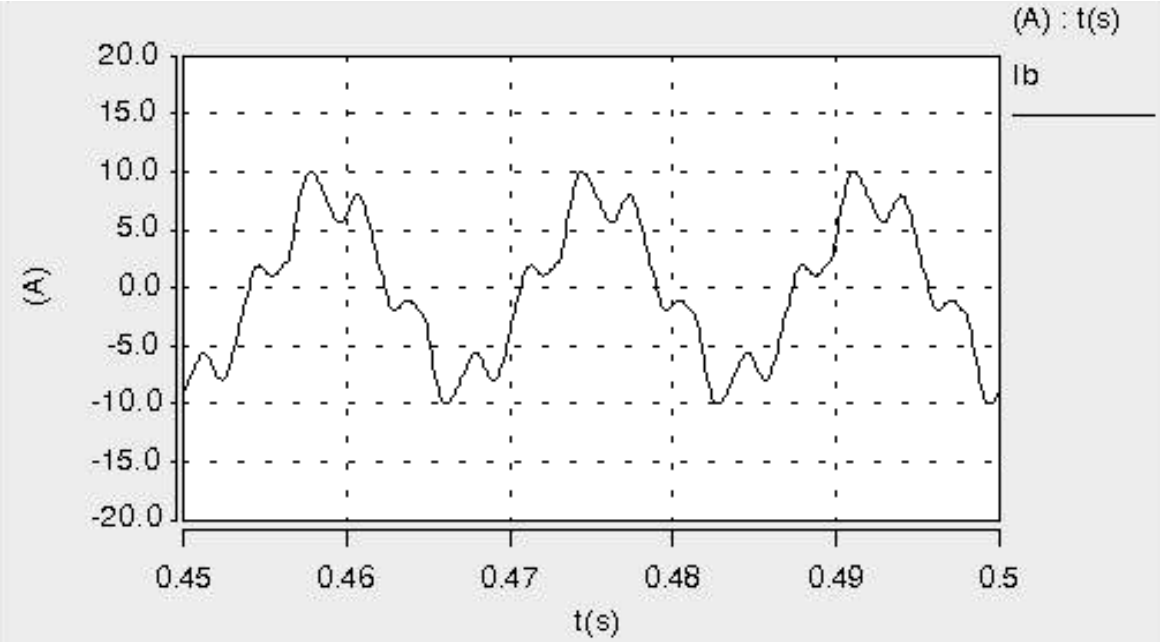


(a) computacional

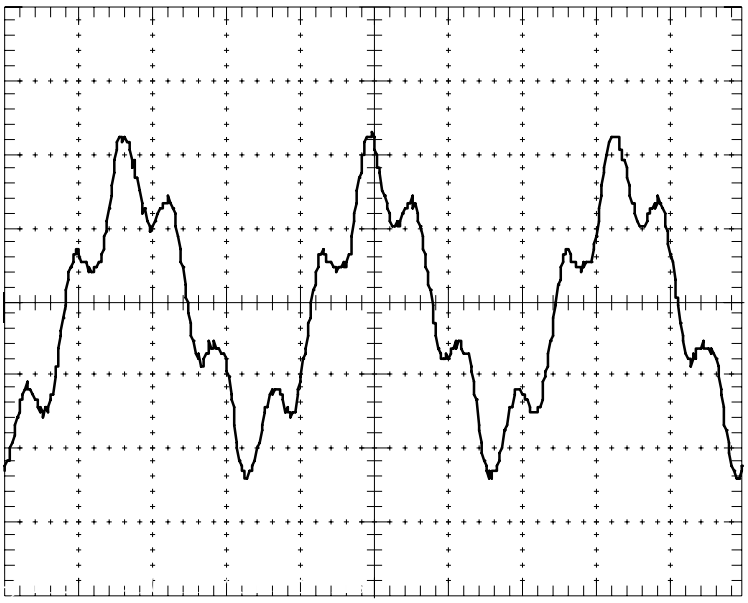


(b) experimental

Figura 3.13 – Forma de onda da corrente na linha A do alimentador, na presença do filtro.

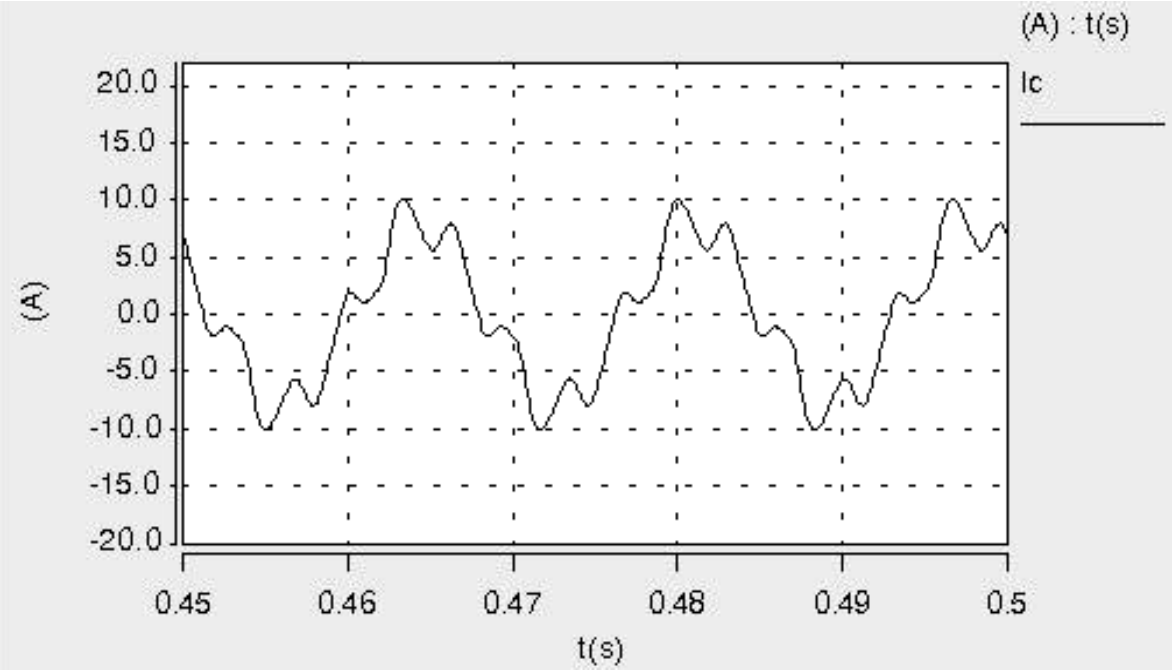


(a) computacional

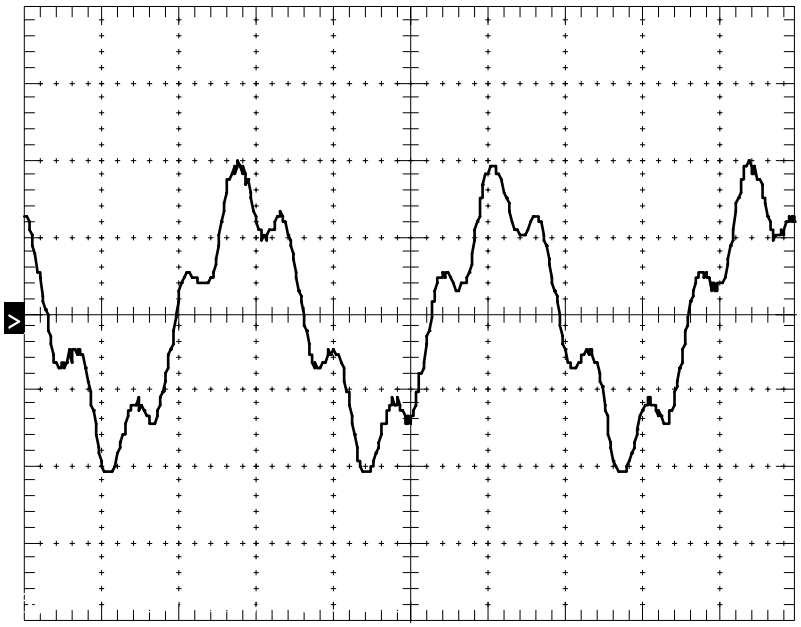


(b) experimental

Figura 3.14 – Forma de onda da corrente na linha B do alimentador, na presença do filtro.



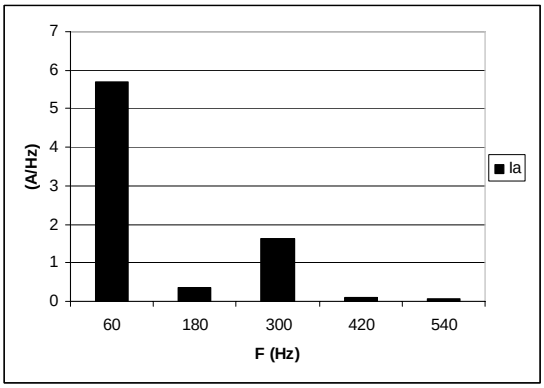
(a) computacional



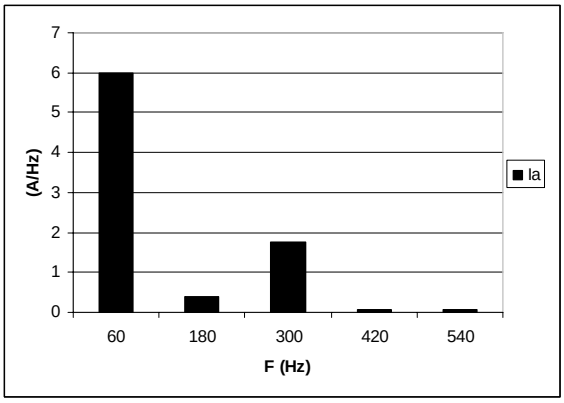
(b) experimental

Figura 3.15 – Forma de onda da corrente na linha C do alimentador, na presença do filtro.

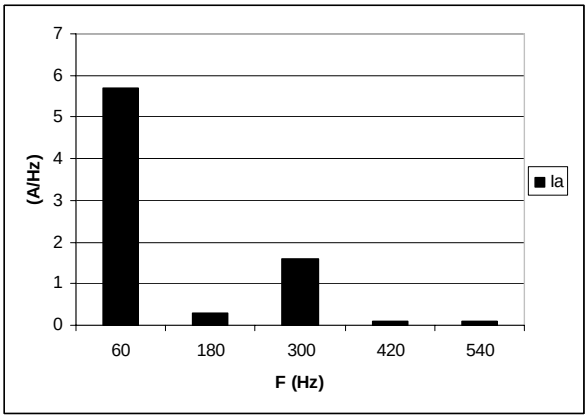
De modo análogo ao caso anterior, a figura 3.16 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes do filtro, obtidos de forma computacional e experimental, respectivamente.



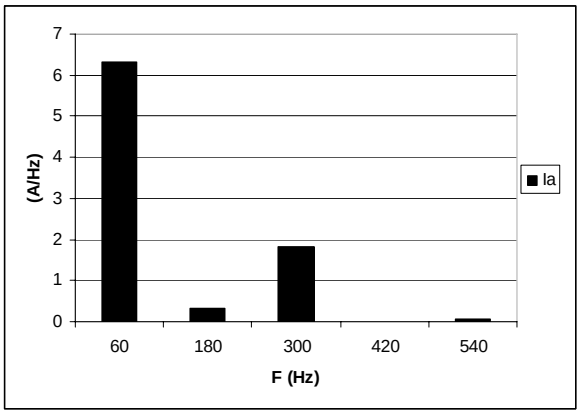
Linha A - computacional



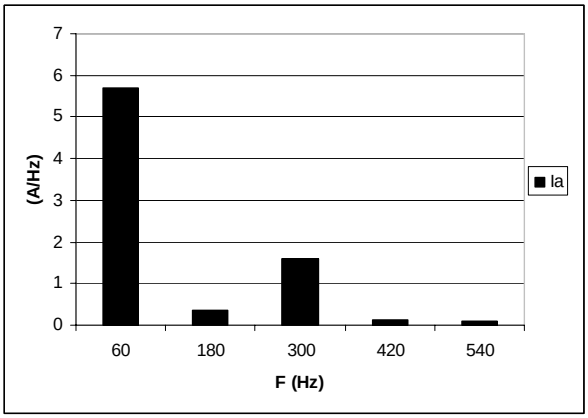
Linha A - experimental



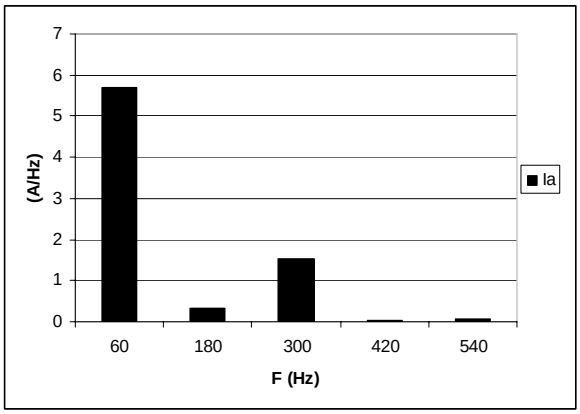
Linha A - computacional



Linha A - experimental



Linha A - computacional

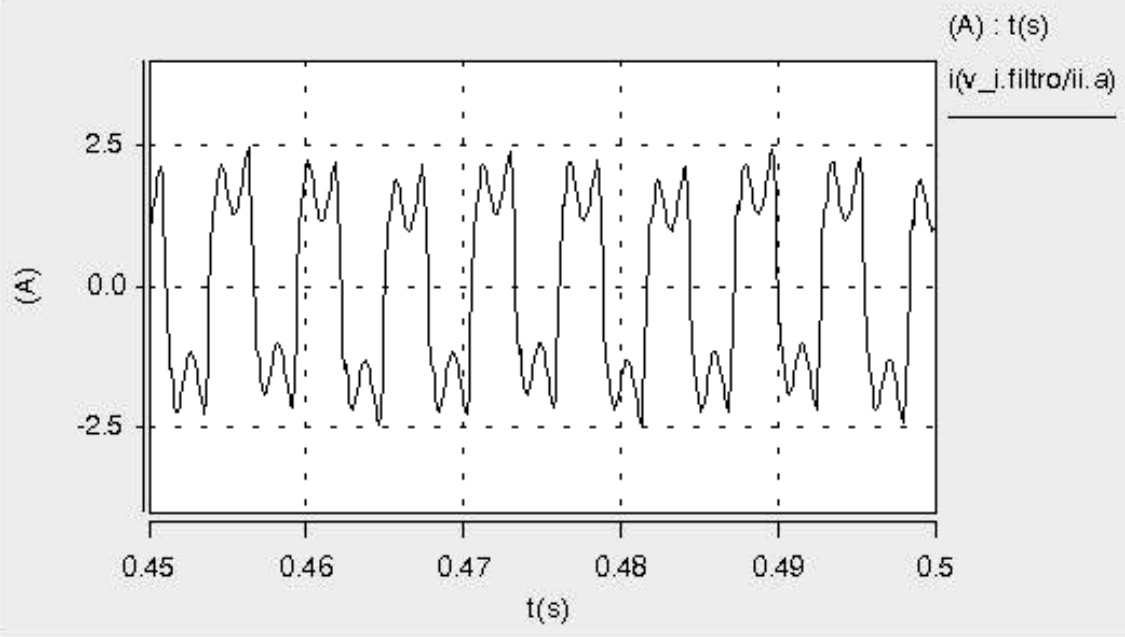


Linha A - experimental

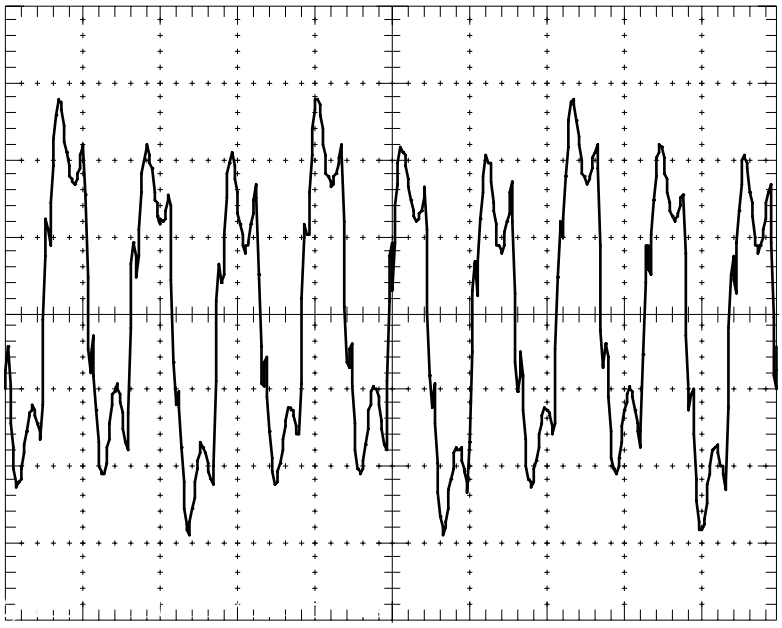
Figura 3.16 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador na presença do filtro.

3.4.3 – Corrente de linha do filtro

Por fim, as figuras 3.17, 3.18 e 3.19 apresentam, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro, quando da sua inserção no sistema. Desta feita, as escalas dos gráficos experimentais são de 1A/Divisão.

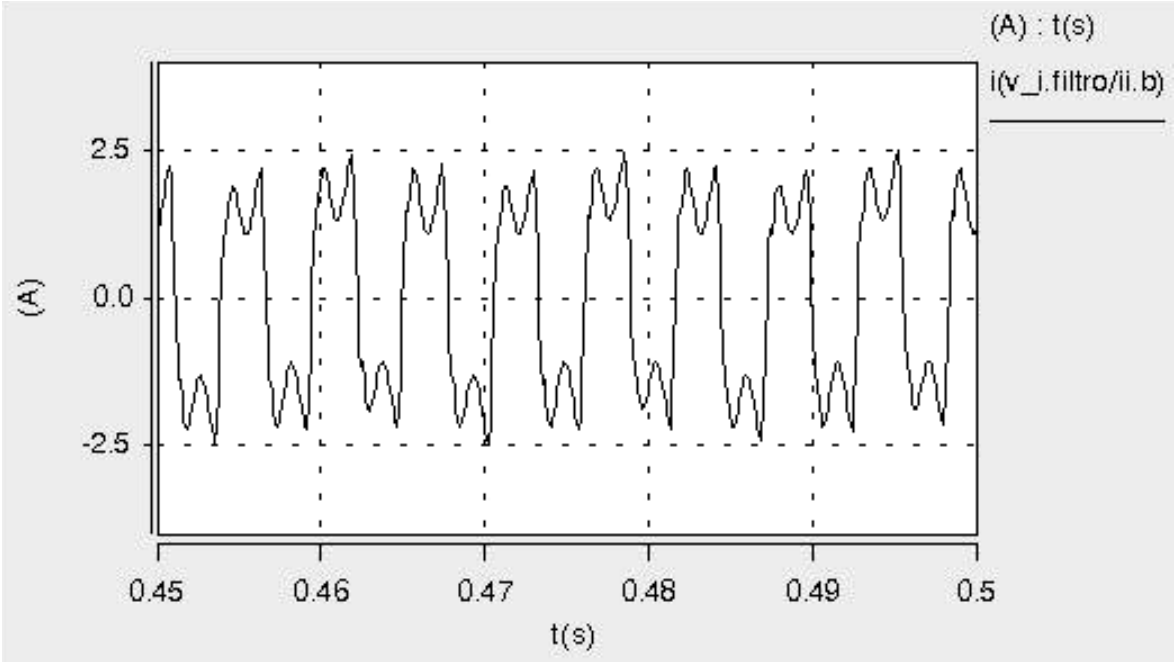


(a) computacional

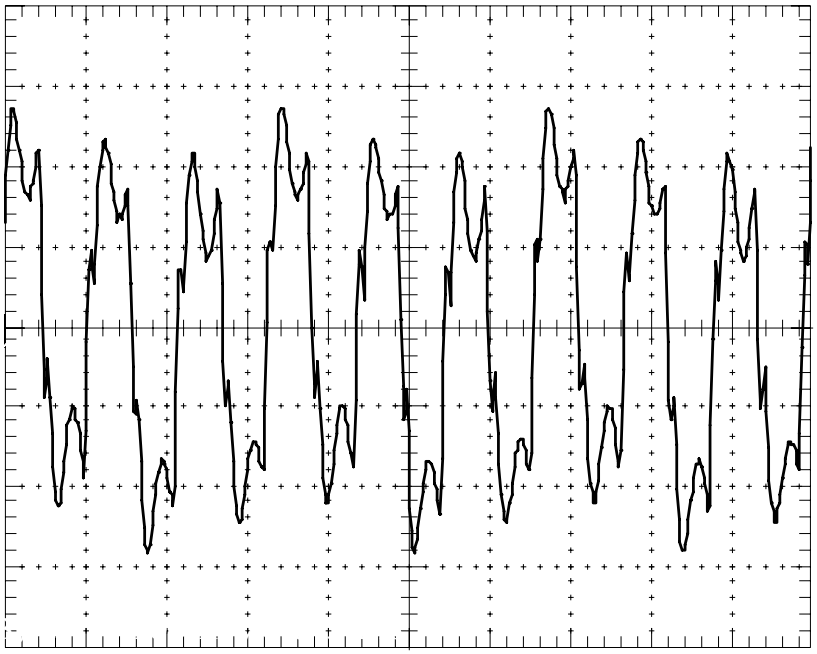


(b) experimental

Figura 3.17 – Forma de onda da corrente na linha A do filtro.

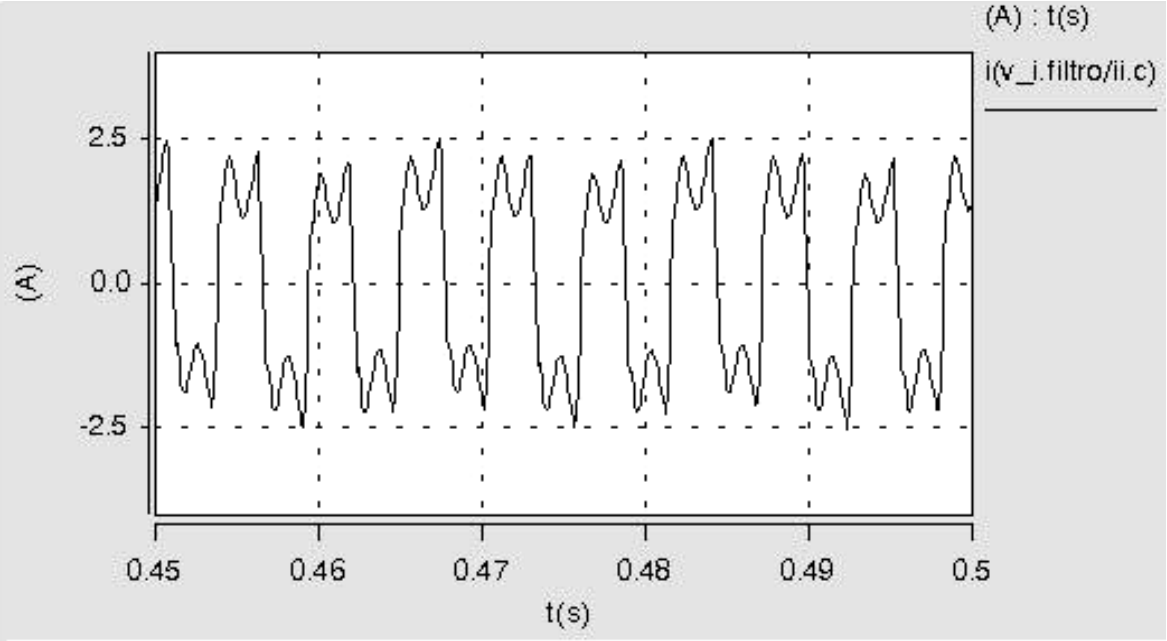


(a) computacional

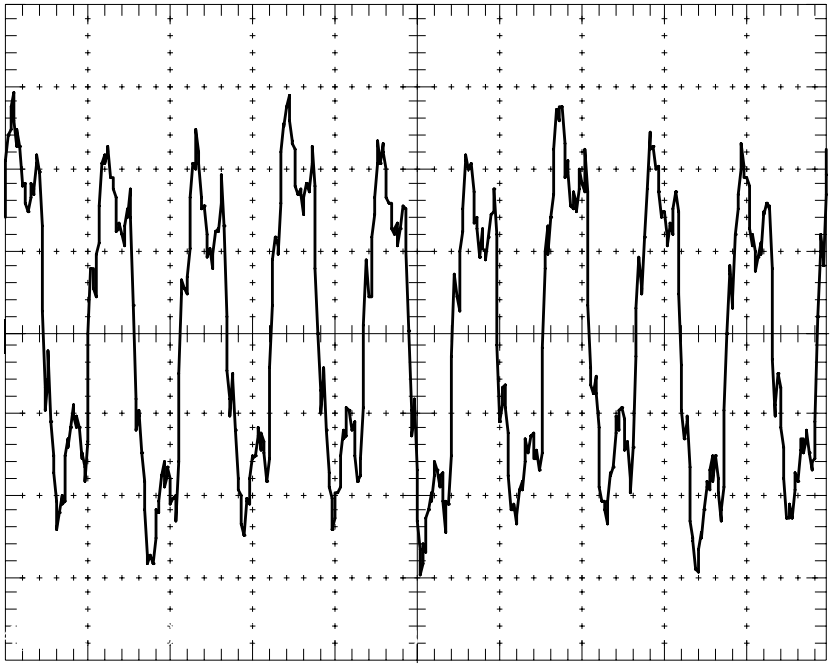


(b) experimental

Figura 3.18 – Forma de onda da corrente na linha B do filtro.



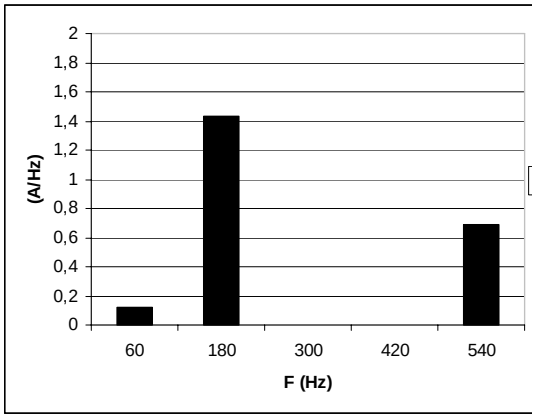
(a) computacional



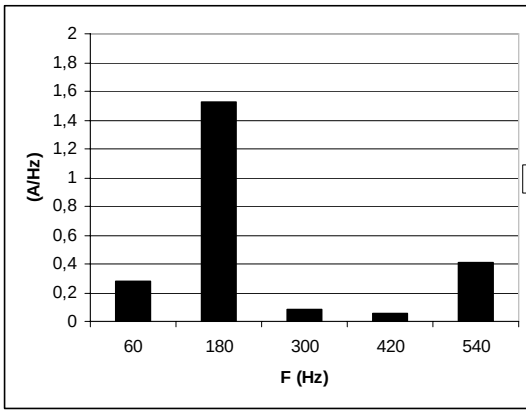
(b) experimental

Figura 3.19 – Forma de onda da corrente na linha C do filtro.

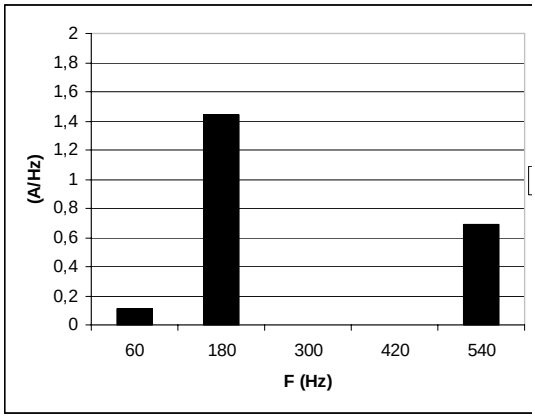
Do mesmo modo anterior, objetivando maior clareza sobre o conteúdo harmônico presente nas correntes de linha do filtro, a figura 3.20 indica os correspondentes espectros harmônicos.



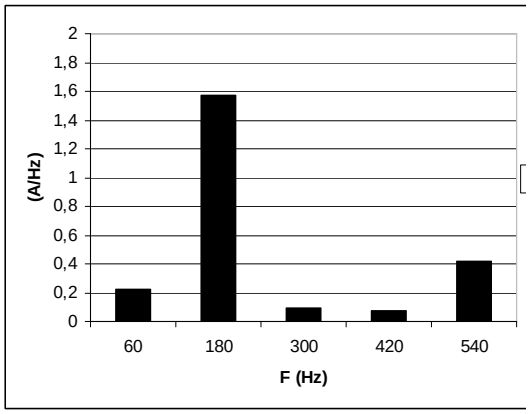
Linha A - computacional



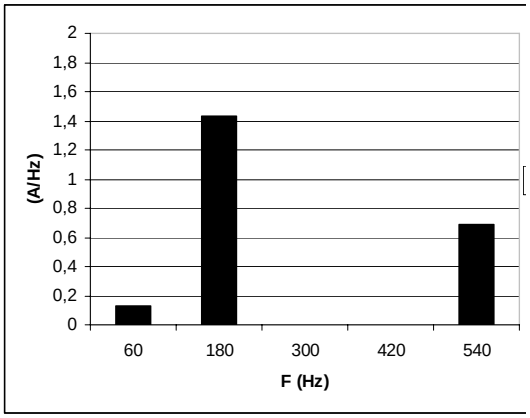
Linha A - experimental



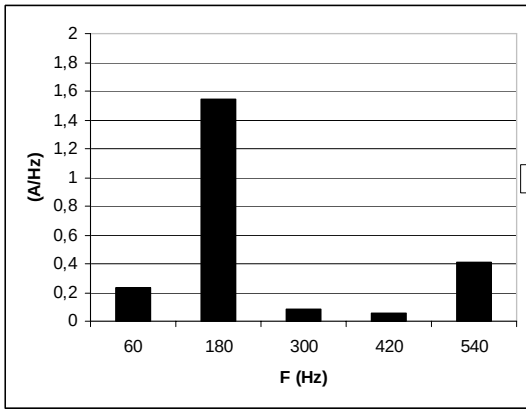
Linha B - computacional



Linha B - experimental



Linha C - computacional



Linha C - experimental

Figura 3.20 - Espectros harmônicos das correntes no alimentador sem a presença do filtro.

3.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados mostrados anteriormente permitem constatar que:

- As correntes harmônicas injetadas na rede, quando da ausência do filtro, apresentam-se com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais em torno de 45,5%;
- Quando da inserção do filtro, a nova distorção total da corrente de linha do lado do supridor passou para 29,8%;
- No que tange ao filtro, quando de sua inserção, constatou-se que o dispositivo absorve um conjunto de componentes harmônicas de seqüência zero responsáveis pela atenuação da injeção harmônica no alimentador;
- Os resultados computacionais e experimentais, de um modo geral, evidenciam uma boa correlação. Isto se manifesta tanto nas formas de onda quando nos valores obtidos. Desta forma, fica enfatizado que o processo de validação da modelagem computacional conduziu a desempenhos que refletem com bom grau de qualidade, a operação do dispositivo focado nesta pesquisa.

Deve-se ressaltar que, embora os resultados computacionais e experimentais apresentem boa concordância, é de se esperar alguns desvios devidos a, dentre outros motivos, imprecisões paramétricas, negligências de componentes parasitas, erros do sistema de medição e aquisição de dados, modelagem de alguns dispositivos como ideais, etc. Estes desvios não comprometam a validade do modelo implementado, face à observância de similaridades bastante significativas.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Capítulo concentrou suas atenções para os aspectos concernentes à representação computacional e validação da estratégia para a modelagem do filtro eletromagnético de seqüência zero.

Com o propósito de validar o modelo computacional, foi montado um arranjo experimental, destinado a testes laboratoriais do dispositivo supracitado. Os resultados dos estudos apresentados e discutidos, realizados dentro de um contexto idealizado, qual seja, sob tensões de alimentação senoidais e equilibradas, permitem constatar que o dispositivo estudado viabiliza um caminho elétrico de menor impedância para as componentes harmônicas de seqüência zero.

Os resultados, finalmente, demonstram a adequação do modelo computacional desenvolvido com o protótipo de filtro eletromagnético previamente construído.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após a validação do modelo apresentada no capítulo anterior, o presente capítulo tem por objetivo avaliar o desempenho do filtro eletromagnético perante diferentes situações dentro sistema de energia elétrica, tais como:

- Instalação do dispositivo em redes com distintas impedâncias internas e;
- Operação do filtro diante de um suprimento caracterizado por tensões desequilibradas, mantendo-se as cargas não-lineares na condição balanceada.

Os estudos serão conduzidos através das abordagens computacional e experimental e seus resultados, além de evidenciar o desempenho do filtro sob as mencionadas condições, também servirão, mais uma vez, como mecanismo de validação da modelagem computacional.

4.2 – ENSAIOS DE DESEMPENHO

Tanto nas simulações quanto nos ensaios será utilizado o mesmo esquema elétrico quando da validação do modelo computacional apresentado no capítulo anterior, qual seja o filtro eletromagnético em paralelo com a carga não linear, sendo ambos alimentados por um barramento infinito.

Quanto aos casos estudados, a tabela 4.1 sintetiza os ensaios feitos sob as distintas condições anteriormente postuladas.

Tabela 4.1 - Síntese das medições utilizadas para avaliação do desempenho do filtro

Condição do Sistema	Resultado apresentado	Figura
Variação da impedância do sistema: **Z_1 = 0,4+j 0,377,** **Z_2 = 0,4+j 0,754,** **Z_3 = 0,4+j 1,131**	Corrente na fase A do alimentador para Z_1, Z_2 e Z_3	4.2 (a) e (b)
	Corrente na fase A do filtro para Z_1, Z_2 e Z_3	4.3 (a) e (b)
	Corrente no condutor Neutro do alimentador para Z_1, Z_2 e Z_3	4.4 (a) e (b)
	Corrente no condutor Neutro do filtro para Z_1, Z_2 e Z_3	4.5 (a) e (b)
Tensões desequilibradas: **V_{an}=129∠0ºV;** **V_{bn}=124,5377∠-122,024ºV;** **V_{cn}=126∠122,024ºV**	Corrente na fase A do alimentador	4.7 (a) e (b)
	Corrente na fase A do filtro	4.8 (a) e (b)
	Corrente no condutor neutro do alimentador	4.9 (a) e (b)
	Corrente no condutor neutro do filtro	4.10 (a) e (b)

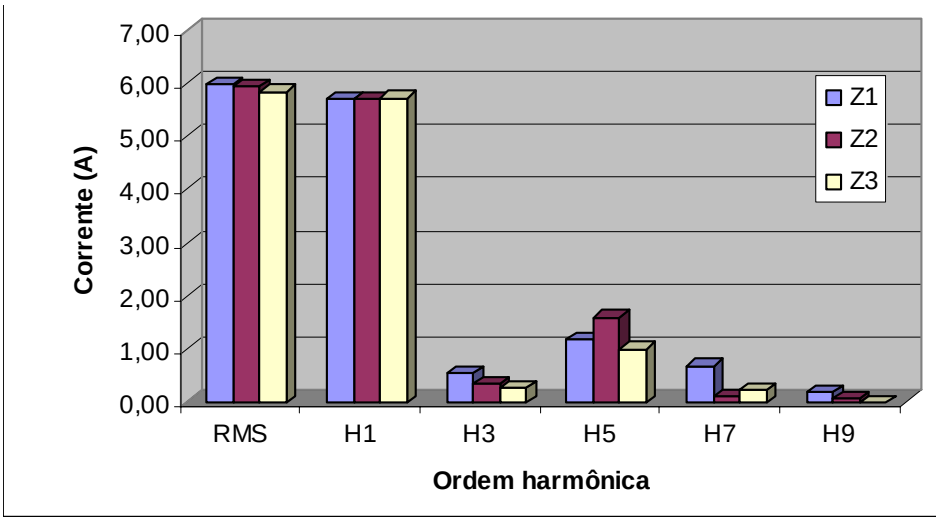
4.2.1 – Variação da impedância do sistema

De forma a analisar o desempenho do filtro eletromagnético de seqüência zero diante de distintas impedâncias da rede de alimentação, procederam-se ensaios experimentais e computacionais variando-se tal parâmetro através da mudança dos taps dos reatores empregados para fins da representação acima referida, como mostrado na figura 4.1. Através deste procedimento foi possível a realização de ensaios sob as seguintes condições para a impedância do alimentador: $Z_1 = 0{,}4 + j0{,}377\Omega$, $Z_2 = 0{,}4 + j0{,}754\Omega$ e $Z_3 = 0{,}4 + j1{,}131\Omega$.

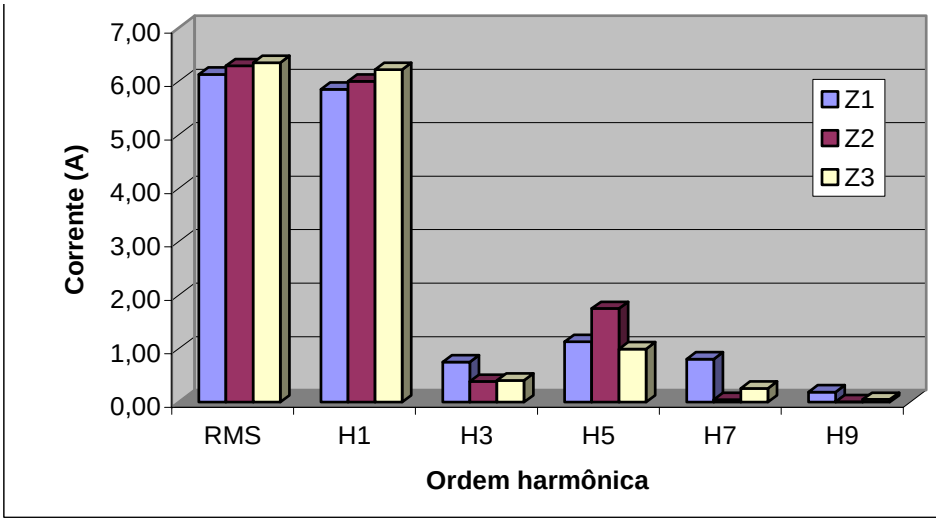
Figura 4.1 – Reator com taps para 1, 2 e 3mH.

(a) Correntes de linha no alimentador e no filtro

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, os valores eficazes (rms) das correntes fundamental e harmônicas da linha A do alimentador e do filtro, para os três valores de impedância do sistema, obtidos de forma computacional e experimental.

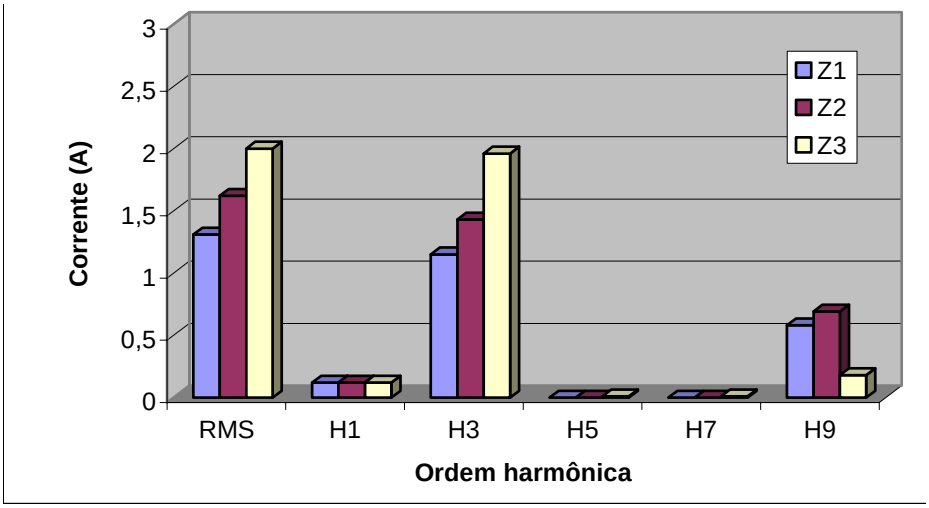


(a) computacional

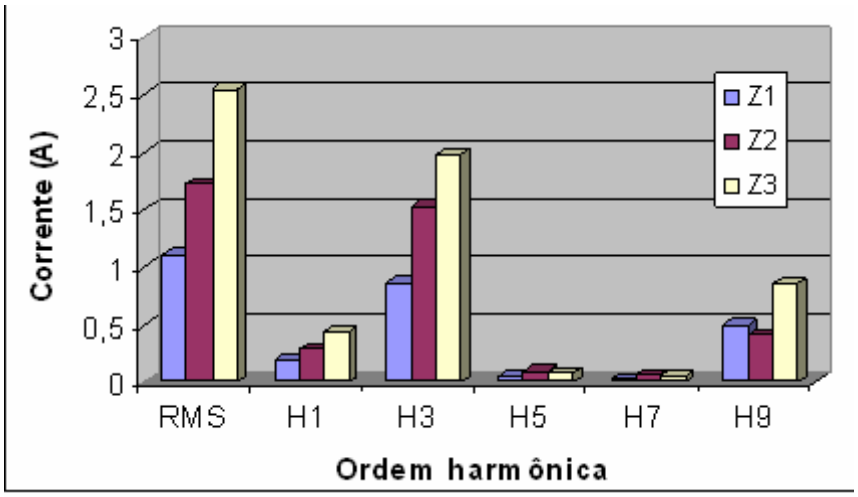


(b) experimental

Figura 4.2 – Corrente na linha A do alimentador para diferentes valores da impedância do sistema.



(a) computacional

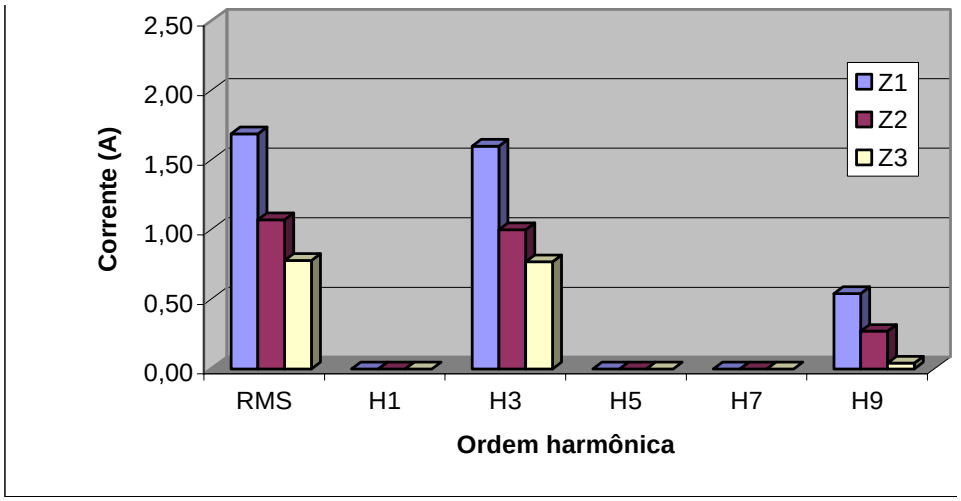


(b) experimental

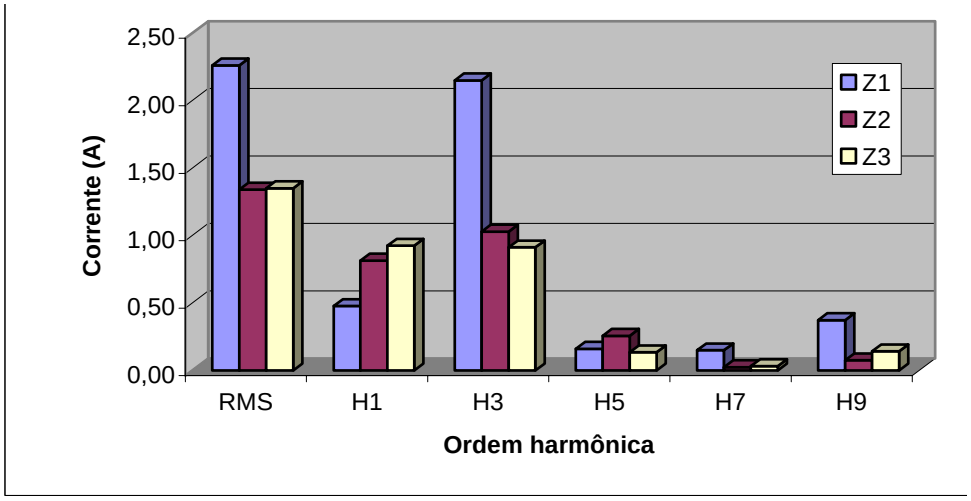
Figura 4.3 – Corrente na linha A do filtro para diferentes valores da impedância do sistema.

(b) Correntes de neutro no alimentador e no filtro

Para as mesmas condições anteriores, as figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, os valores eficazes (rms) da corrente no neutro do alimentador e do filtro.

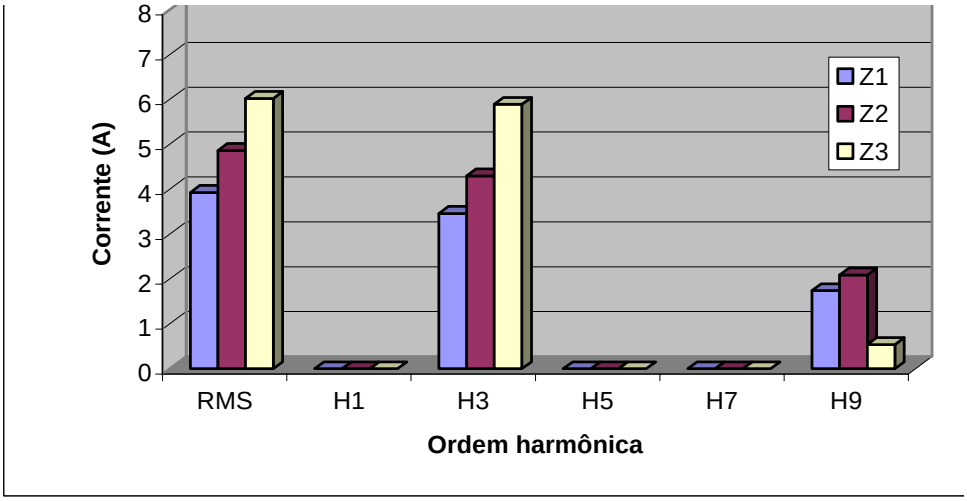


(a) computacional

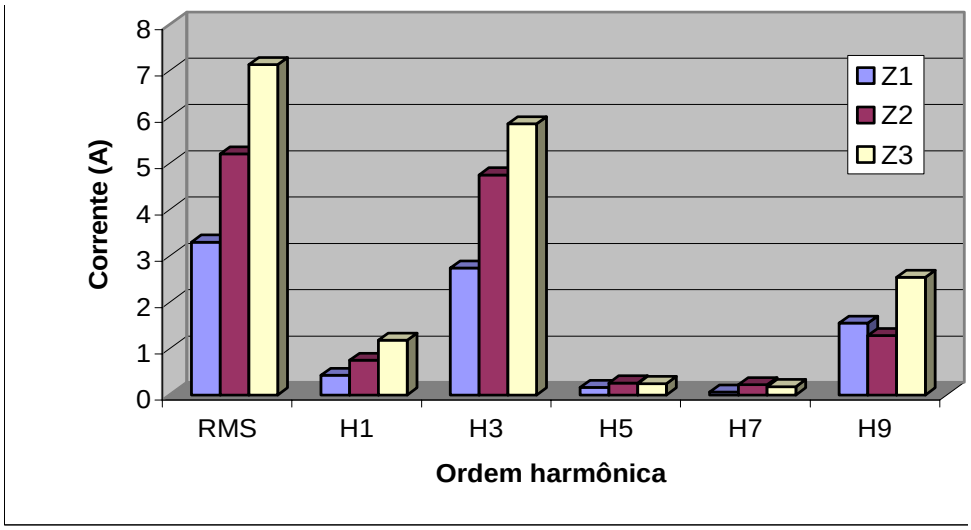


(b) experimental

Figura 4.4 – Corrente no neutro do alimentador para diferentes valores da impedância do sistema.



(a) computacional



(b) experimental

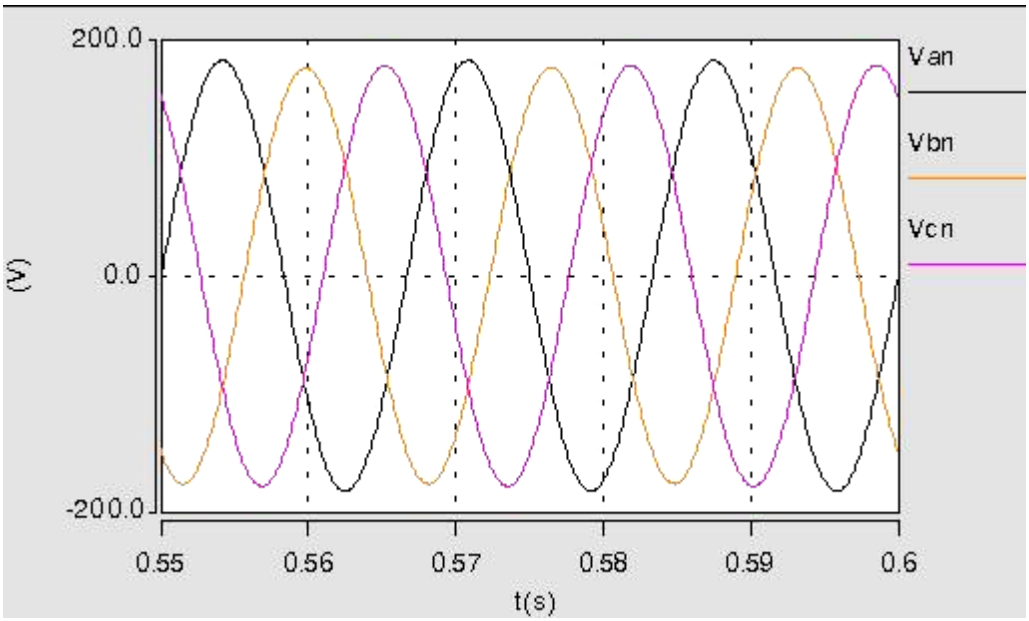
Figura 4.5 – Corrente no neutro do filtro para diferentes valores da impedância do sistema.

4.2.2 – Tensões de fornecimento desequilibradas

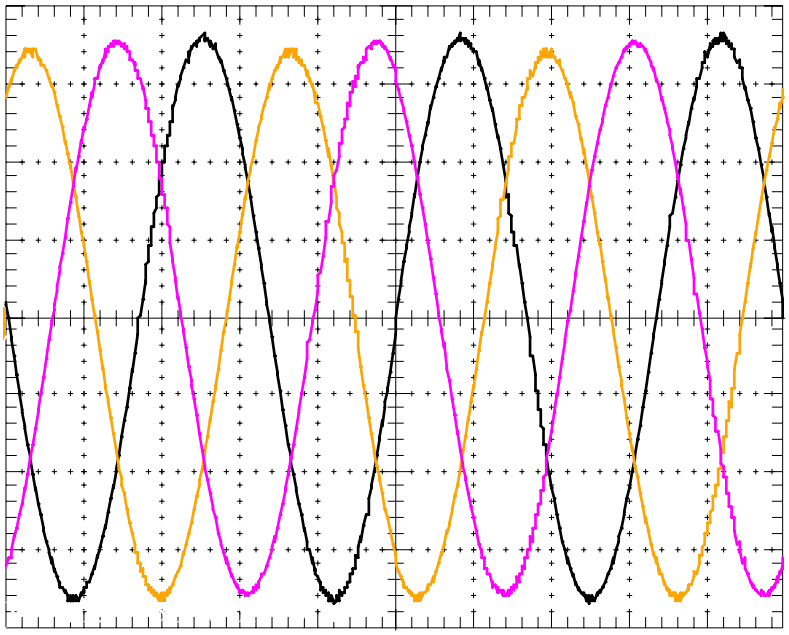
Como estabelecido anteriormente, uma outra situação selecionada para investigação está associada com o desempenho do filtro sob a ação de um suprimento com tensões desbalanceadas. Esta, como se sabe, é uma condição que facilmente se encontra nas redes elétricas reais.

Para que apenas este fator de influência seja evidenciado, a impedância do sistema supridor foi fixada em Z_{sist}=0,4+j0,754Ω e a fonte controlada HP6834 foi programada para fornecer os seguintes valores de tensão: V_{an}=129∠0ºV, V_{bn}=124,5377∠-122,024ºV, V_{cn}=126∠122,024ºV. Estas tensões representam um fator de desequilíbrio de 3% (relação entre a tensão de seqüência negativa e positiva). Também, este conjunto de tensões possui uma componente de seqüência nula em torno de 1,06% da fundamental.

As tensões desequilibradas assim definidas são apresentadas na figura 4.6 (a) e (b), obtidas de forma computacional e experimental, respectivamente. Para o gráfico experimental, a escala é de 50V/Divisão.



(a) computacional

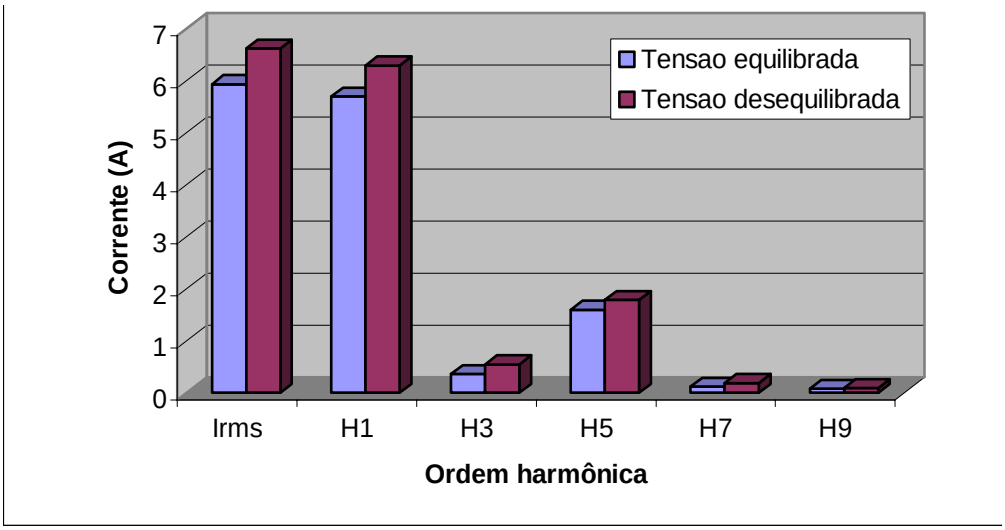


(b) experimental

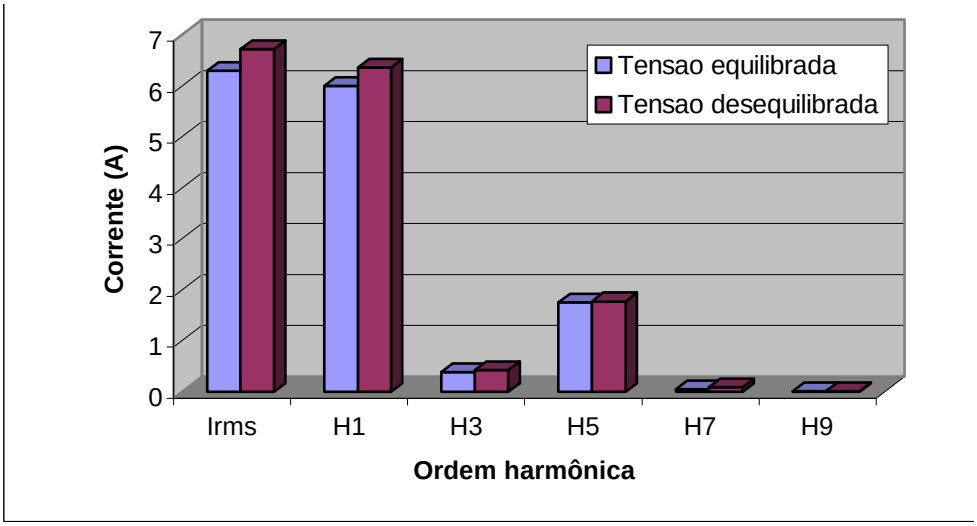
Figura 4.6 – Tensões desequilibradas utilizadas nos estudo.

(a) Correntes de linha – alimentador e filtro

A figura 4.7 apresenta os valores eficazes (rms) da corrente da linha A do alimentador, quando da aplicação da tensão desequilibrada.



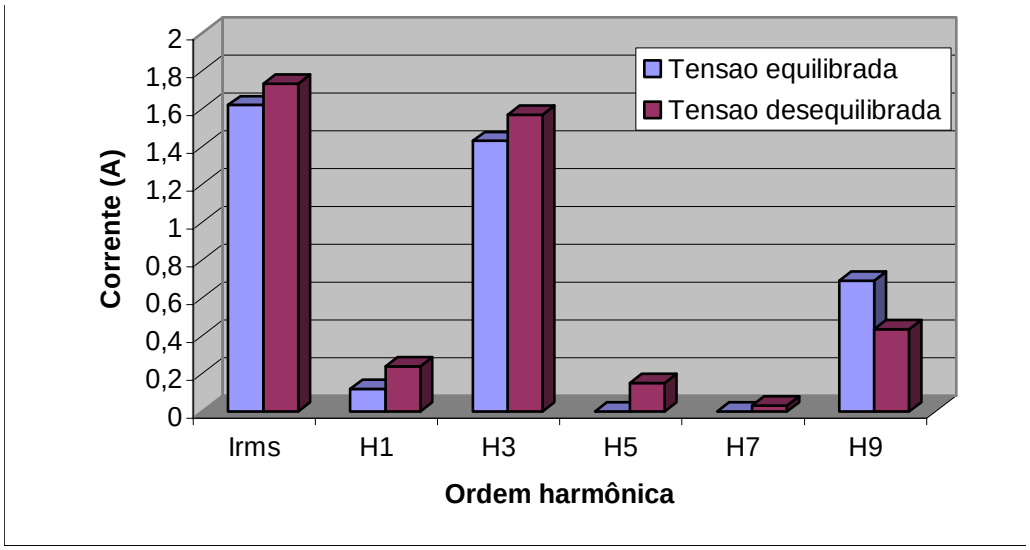
(a) computacional



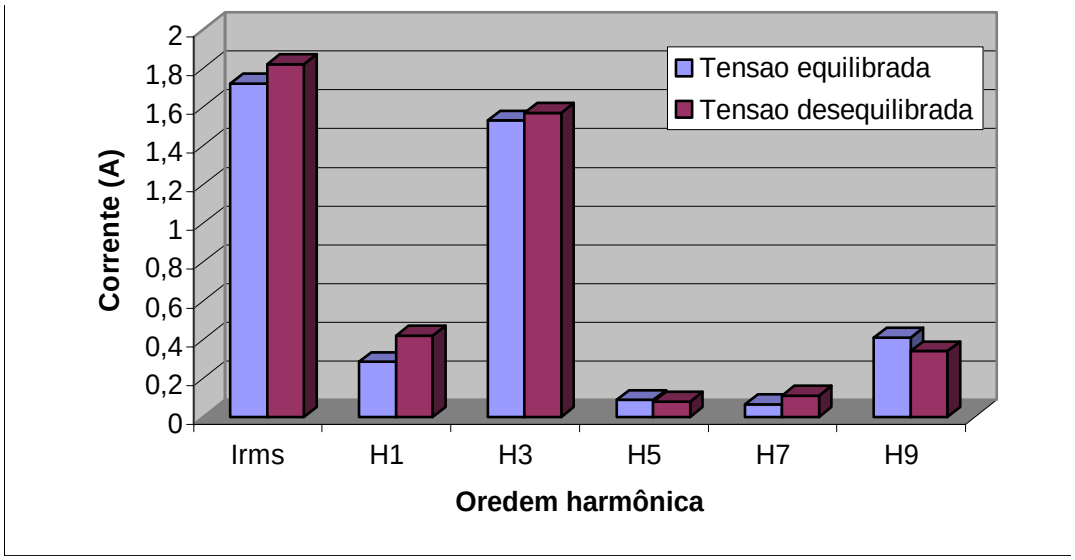
(b) experimental

Figura 4.7 -- Corrente na linha A do alimentador.

A figura 4.8 apresenta os valores eficazes (rms) da corrente da linha A do filtro, quando da aplicação da tensão desequilibrada, obtidos de forma computacional e experimental e sua comparação com o caso equilibrado.



(a) computacional

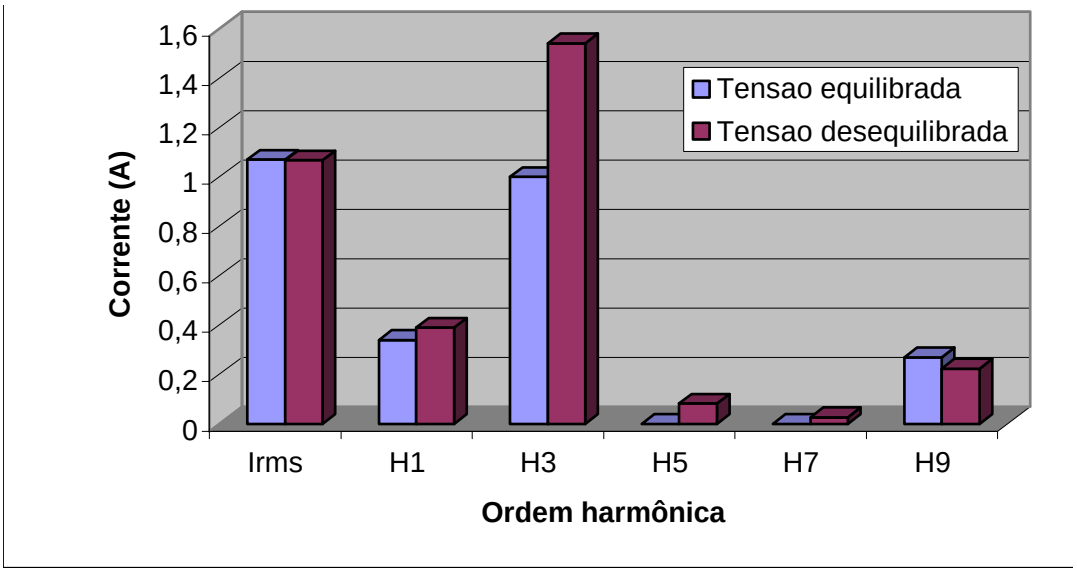


(*b) experimental*

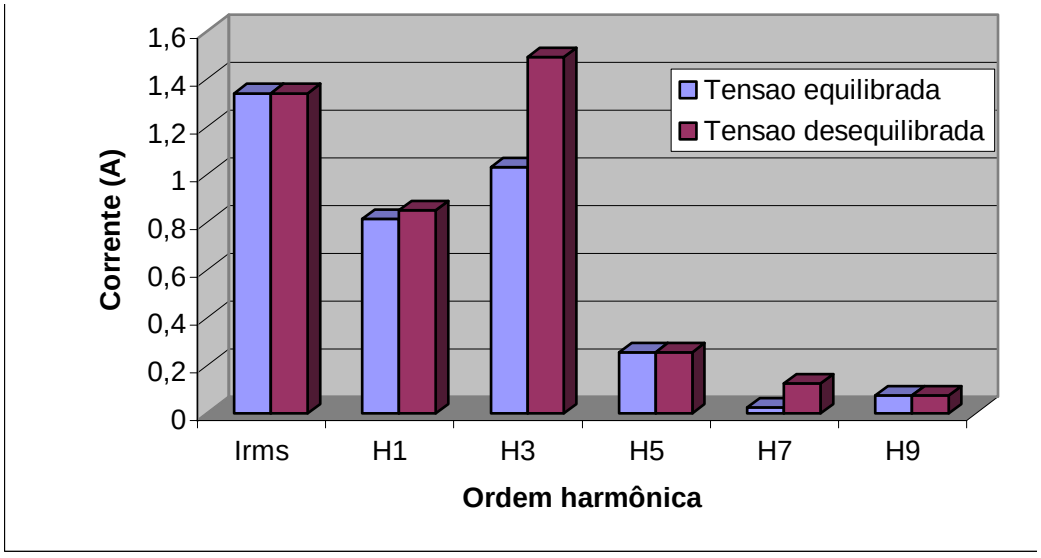
Figura 4.8 - Corrente na linha A do filtro.

(b) Correntes de neutro – alimentador e filtro

A figura 4.9 apresenta os valores eficazes (rms) da corrente do neutro do alimentador, quando da aplicação da tensão desequilibrada, obtidos de forma computacional e experimental.



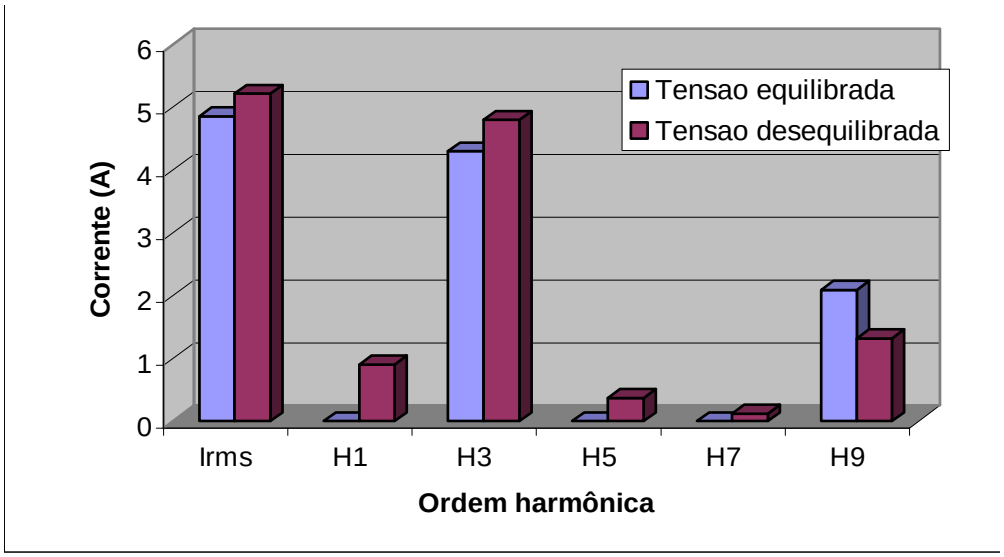
(a) computacional



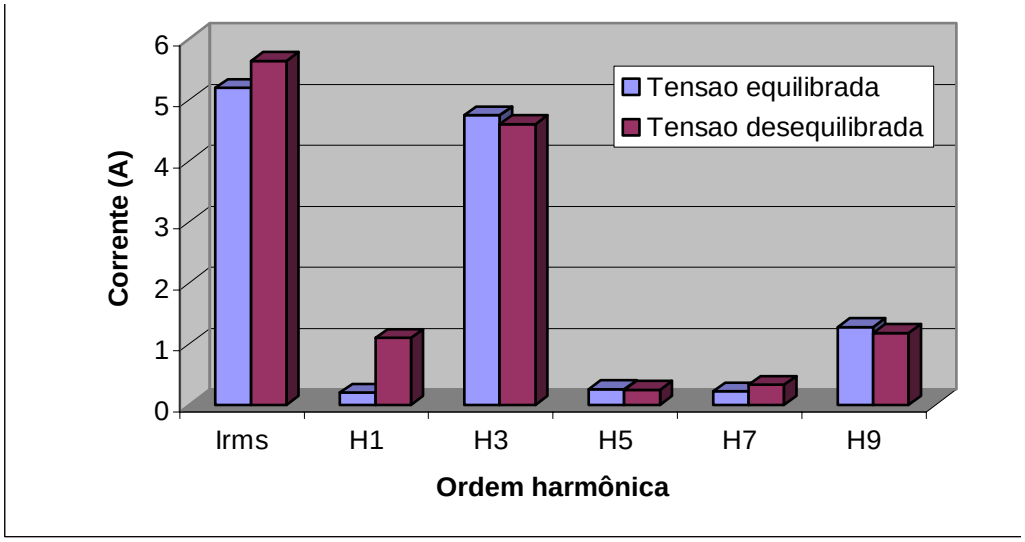
(b) experimental

Figura 4.9 -- Corrente no neutro do alimentador.

Na seqüência, a figura 4.10 apresenta os valores eficazes (rms) da corrente no neutro do filtro, quando da aplicação da tensão desequilibrada.



(a) computacional



(b) experimental

Figura 4.10 - Corrente no neutro do filtro.

4.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados mostrados nas figuras identificadas por 4.2 à 4.10 permitem constatar que:

- Para a variação da impedância do sistema, verificou-se que, como esperado, o desempenho da filtragem tornou-se melhor quando do aumento da mesma, proporcionando uma redução nos valores das correntes circulantes pelo neutro do alimentador;
- Quando da aplicação de tensões desequilibradas, pôde-se verificar que o dispositivo estudado passa a drenar uma maior quantidade de corrente fundamental (de seqüência zero), além de constatar um aumento da corrente de terceira harmônica circulante no neutro do alimentador;
- Com relação à correlação entre os resultados computacionais e experimentais, desta feita sob situações mais críticas que aquelas consideradas no Capítulo III, constatou-se que, de um modo geral, que ainda continua aceitável. Não obstante a isto, vale destacar que esta afirmativa encontra maiores sustentações nos aspectos qualitativos, enquanto que os quantitativos já indicaram, para alguns casos, discrepâncias apreciáveis. Estas diferenças, como visto, foram fortemente influenciadas pelos valores das impedâncias do sistema alimentador (representado através de um reator com taps). Para algumas delas, como o caso em que se empregou o tap 2, os erros constatados entre os resultados computacionais e experimentais foram pequenos. Por outro lado, quando do emprego do tap 3 para o reator, as diferenças se mostraram mais pronunciadas. Isto posto, fica evidenciado que, muito embora a modelagem computacional tenha se mostrado, mais uma vez, apropriada aos fins almejados, existem pontos que ainda merecem maiores investigações. Naturalmente, somado as limitações de qualquer modelo computacional, ficam ainda as próprias imprecisões das medições e dos parâmetros empregados nos estudos teóricos;
- Finalmente, ficou evidenciado que, sob condições não ideais da rede de suprimento, o filtro pode absorver correntes superiores a aquelas previstas e associadas tão somente com a operação da carga não-linear.

Nestas condições, os resultados enfatizaram a necessidade de maiores cuidados no dimensionamento do filtro, em particular quanto às questões térmicas.

4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo explorou o funcionamento do filtro eletromagnético de seqüência zero perante algumas situações passíveis de se encontrar no sistema de energia. A estratégia utilizada para proceder as análises de seu desempenho consistiu em observar, através de ensaios computacionais e laboratoriais, o comportamento do equipamento através das alterações das características do sistema elétrico, tais como alteração da impedância do sistema e o fornecimento de tensões desequilibradas.

O efeito da impedância do sistema, concorrente com a impedância do filtro no processo de filtragem, mostrou-se ser de grande importância, o que enfatiza a necessidade de um estudo detalhado quanto à posição de instalação do dispositivo na rede elétrica.

Por outro lado, as condições de desequilíbrio das tensões impostas neste estudo não afetaram a eficácia do dispositivo no que tange à questão da absorção das correntes harmônicas de seqüência zero. A única questão, já apontada anteriormente, está na possibilidade de maiores efeitos térmicos e os cuidados inerentes a esta condição operacional.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Embora cada capítulo apresente suas conclusões e comentários sobre o assunto enfocado, uma abordagem global dos trabalhos desenvolvidos e resultados atingidos é de fundamental importância a fim de proporcionar uma rápida e sucinta visão das investigações como um todo.

O Capítulo I objetivou oferecer uma abordagem sobre a área da Qualidade da Energia Elétrica, com destaque às distorções harmônicas e os mecanismos voltados para a mitigação deste fenômeno. Neste contexto procedeu-se uma revisão bibliográfica sobre o tema filtros e, em especial, sobre os equipamentos destinados à filtragem de correntes harmônicas de seqüência zero, evidenciando assim, o tema de concentração desta pesquisa e as lacunas ainda existentes neste tópico específico. Por fim, foram estabelecidos os objetivos gerais desta pesquisa de mestrado e apresentada a estrutura geral da dissertação.

O Capítulo II contemplou, especificamente, as premissas do dispositivo focado neste trabalho para a mitigação de correntes harmônicas de seqüência zero, qual seja, o filtro eletromagnético. Foram apresentadas as partes constituintes e arranjos físicos do dispositivo, assim como seu princípio de funcionamento. Complementarmente, foram estabelecidas as bases matemáticas objetivando a demonstração analítica da operacionalidade do

filtro, ficando evidenciado o mecanismo através do qual se processa o surgimento de um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de seqüência zero.

O Capítulo III concentrou-se nas principais formas atualmente utilizadas para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos utilizando técnicas no domínio do tempo, destacando os recursos pré-existentes. Após sucintos comentários sobre as estratégias comumente empregadas, a opção de modelagem feita recaiu sobre aquela através da qual as unidades magnéticas são representadas por uma combinação de relutâncias e forças magnetomotrizes, estando em sintonia com a plataforma computacional empregada para os estudos, a qual se constitui num simulador empregando técnicas no domínio do tempo. Este capítulo também promoveu estudos voltados para a validação da representação do desempenho do filtro quando de sua inserção num sistema elétrico constituído por um suprimento trifásico balanceado e uma carga fortemente produtora de harmônicos. Os estudos focaram, sobremaneira, o desempenho do dispositivo quanto à reprodução de fenômenos de regime permanente. Os resultados evidenciaram uma boa correlação entre os valores computacionais e experimentais, ratificando, assim, a operacionalidade e a adequação do modelo estabelecido. A título de exemplificação numérica, os estudos revelaram uma diminuição da distorção harmônica total de corrente no alimentador de 45,5% para 29,8% quando da instalação do filtro. Vale, todavia observar que tal redução não foi maior pelo fato que tão apenas as componentes de seqüência zero foram filtradas, quais sejam, a terceira e suas múltiplas. Nestas circunstâncias, aquelas de seqüência positiva e negativa continuaram a fluir integralmente para o sistema supridor. Este é o caso das componentes harmônicas de ordem 5, 7, 11, 13...

O Capítulo IV foi destinado a uma análise computacional e laboratorial do desempenho do Filtro Eletromagnético de Seqüência Zero diante de distintas condições impostas para a impedância do alimentador e de

desequilíbrios para as tensões trifásicas. Objetivando maior clareza na interpretação dos resultados, as cargas não-lineares foram mantidas na condição balanceada. Os resultados dos estudos demonstraram que o efeito da impedância do sistema, concorrente com a impedância do filtro no processo de filtragem, mostrou ser de grande importância. Isto orienta para que a especificação de um determinado filtro para uma dada implicação deve, necessariamente, levar em conta este importante parâmetro. Por outro lado, as condições de desequilíbrio das tensões impostas não afetaram a eficácia do dispositivo no que tange à questão da absorção das correntes harmônicas de seqüência zero. A única questão, já apontada anteriormente, está na possibilidade de maiores efeitos térmicos e os cuidados inerentes à esta condição operacional. Com relação à correlação entre os resultados computacionais e experimentais, desta feita sob situações mais críticas que aquelas consideradas no Capítulo III foi verificado que, de um modo geral, há uma boa correlação entre os mesmos. As divergências constatadas entre os desempenhos numéricos computacionais e experimentais foram fortemente influenciadas pelos valores das impedâncias do sistema alimentador (representado através de um reator com taps).

Finalmente, muito embora o reconhecimento das contribuições desta dissertação, o tema ainda oferece grandes desafios para o pleno domínio desta técnica. Dentro destes aspectos, numa primeira análise, recomenda-se que os temas abordados nesta dissertação possam ainda merecer maiores estudos quanto aos seguintes pontos:

- Maiores investigações sobre itens de influência sobre a eficácia no filtro no processo de absorção das correntes a que se destina. Dentre eles: estratégias para o controle da impedância de dispersão através de técnicas de fabricação do filtro, maiores estudos sobre o desempenho do produto frente a cargas desequilibradas, avaliação

de desempenho perante um suprimento de tensões com distorções harmônicas, etc;

- Busca de técnicas complementares voltadas para a melhoria de desempenho do produto desta pesquisa através da operação conjunta com uma unidade bloqueadora a ser conectada em série;
- Otimização do projeto do filtro eletromagnético objetivando a redução de perdas e melhoria das condições térmicas de funcionamento.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W., *Electrical Power Systems Quality – 2nd ed.,* McGraw-Hill, New York, 2003.

[2] Das, J. C., *Passive Filters – Potentialities and Limitations*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/February 2004.

[3] Peng, F. Z., Adams, D. J., *Harmonics Sources and Filtering Approaches – Series/Parallel, Active/Passive, and Their Combined Power Filters*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 7, Issue 4, Pages 18-25, July/August 2001.

[4] *Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 6, November/December 1994.

[5] Ling, P. J. A., Eldridge, C. J., *Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion in a Pc-Rich Environment*, Powersmiths Internatonal Corp, 416-439-1077.

[6] Ratanapanachote, S., Enjeti, P. N., Kang, M., *Auto-Connected Electronic Phase-Shifting Transformer Concept for Reducing Harmonic Generated by Non Linear Loads in Electric Power Distribution System*, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2001.

[7] MIRUS International Inc., *MIRUS Eliminator Series Technical Guide*, Nov 2003.

[8] Souto, O. C. N., *Contribuições à Modelagem de Cargas Elétricas Não Lineares e Propostas para a Redução de Harmônicos*, Uberlândia: UFU, 1995 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).

[9] Dahono, P. A., Widjaya, R. E., Marsi, S., Qamaruzzaman, *A Practical Approach to Minimize the Zero Sequence Current Harmonics in Power Distribution Systems*, Power Conversion Conference Proceedings, 1997.

[10] Hadzer, C. M., Marsi, S., *A Study on Zero Passing Transformer in Harmonics Reduction*, National Power and Energy Conference (PECon) Proceedings, 2003.

[11] Jou, H. L., Wu, J. C., Wu, K. D., Chiang, W. J., Chen, Y. H., *Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

[12] Apolônio, R., de Oliveira, J. C., de Vasconcellos, A. B., de Oliveira, A., Souto, O. C. N., *Filtro Eletromagnético para Harmônicos de Seqüência Zero*, V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2003.

[13] Apolônio, R., de Oliveira, J. C., de Vasconcellos, A. B., de Oliveira, *Three-Phase Electromagnetic Filter for Zero Sequence Harmonics*, VI INDUSCON, 2004.

[14] Apolônio, R., *Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental*, Uberlândia: UFU, 2004 (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).

[15] de Vasconcellos, A. B., *Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos a Reator à Núcleo Saturado no Contexto da Qualidade da Energia*, Uberlândia: UFU, 2004 (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).

[16] Elleuch, M., Poloujadoff M., *A contribution to the modeling of three phase transformers using reluctances*, IEEE Transactions on Magnetics, vol.32, No.2, pp. 335-343, March 1996.

[17] Apolônio, R., de Oliveira, J. C., de Vasconcellos, A. B., Bronzeado, H. S., *The Use of Saber Simulator for Three-Phase Non-Linear Magnetic Devices Simulation: Steady-State Analysis*, VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2003

[18] Fuchs, E. F., You, Y., *Measurement of λ-i Characteristics of Asymmetric Three-Phase Transformers and Their Applications*, Ninth International

Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings. Volume 1, Page(s):91 – 96, Oct. 2000.