

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

DIMENSIONAMENTO BÁSICO DE FILTROS
ELETROMAGNÉTICOS DE SEQUÊNCIA POSITIVA E
NEGATIVA

MARCUS SOLLYVAN MARTINS ALVES

Itajubá, Março de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCUS SOLLYVAN MARTINS ALVES

DIMENSIONAMENTO BÁSICO DE FILTROS
ELETROMAGNÉTICOS DE SEQUÊNCIA POSITIVA E
NEGATIVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Qualidade da Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior

Itajubá, Março de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

A474d

Alves, Marcus Sollyvan Martins

Dimensionamento básico de filtros eletromagnéticos de se_
quência positiva e negativa / Marcus Sollyvan Martins Alves. --
Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

98 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Harmônicos. 2. Mitigação de harmônicos. 3. Filtros. I. Car_
valho Filho, José Maria de, orient. II. Belchior, Fernando Nunes,
coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO II

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da "Dimensionamento Básico de Filtros Eletromagnéticos de
Dissertação: Sequência Positiva e Negativa"

Autor: **Marcus Sollyvan Martins Alves**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
 - (2) Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
 - (3) Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 27 de Março de 2013.

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira
1º Examinador - UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior
3º Examinador (Co-Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

"Errei mais de 9.000 cestas e perdi quase 300 jogos. Em 26 diferentes finais de partidas fui encarregado de jogar a bola que venceria o jogo... e falhei. Eu tenho uma história repleta de falhas e fracassos em minha vida. E é exatamente por isso que sou um sucesso."

Michael Jordan

Agradecimentos

A Deus, por me conceder fé e perseverança durante esta caminhada.

À Universidade Federal de Itajubá juntamente com a Pró-Reitoria de Pesquisa Pós-Graduação por viabilizar meu ingresso ao programa de mestrado.

Ao professor Fernando Nunes Belchior pela grande confiança e por todas as oportunidades e colaborações durante os trabalhos. Obrigado!

Ao professor José Maria de Carvalho Filho pelos ensinamentos e orientação.

Aos meus pais Pedro Paulo Batista Alves e Tereza Martins Alves pela educação, carinho, afeto e apoio que sempre me proporcionaram.

Aos meus irmãos João Pedro, Shirley e Ana Luiza pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos colegas e professores da UNIFEI e UFMT que, durante esta caminhada, tornaram o dia a dia mais agradável para o trabalho.

Aos Carlos Villegas e Guilherme Ramalho, pela amizade e parceria durante o tempo que dividimos bancadas no GQEE.

Aos meus amigos Denisson Queiroz e Aurélio Coelho pela companhia, amizade sincera e conselhos na temporada em que dividimos o mesmo lar.

Aos amigos, Diogo, Marcos e Adriano, pelos momentos de lazer que nos revigorou para seguir na empreitada.

A CAPES, FAPEMIG e ao GQEE pelo apoio estrutural e financeiro.

Por fim, a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão dessa dissertação.

DEDICO ESTE TRABALHO

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais, Pedro Paulo e Tereza, os quais sempre me apoiaram nas escolhas que tomei e me confortaram nos momentos de incerteza.

Resumo

Esta dissertação apresenta considerações de projeto do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa. Este dispositivo é fundamentado no reator a núcleo saturado, e se trata de uma alternativa de redução de níveis harmônicos de correntes de sequência positiva e negativa em uma planta elétrica que apresenta, como carga, um retificador trifásico de seis pulsos não controlado, o qual possui conteúdo harmônico e ângulo de fase conhecidos. Este equipamento tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação, sendo projetado para atuar na região saturada da curva $B \times H$ do material magnético do núcleo, pois deste modo obtêm-se níveis de harmônicos de quinta e sétima ordens compatíveis aos do retificador. Estas harmônicas, provenientes do filtro, têm seus ângulos de fase compatibilizados com auxílio de um elemento defasador resistivo, de forma a se obter a oposição de fase requerida. Essa estratégia resulta na eliminação parcial ou total das harmônicas de maior significância geradas pela carga, ou seja, ordens 5 e 7. Posteriormente, é apresentada a tática para se obter o projeto do filtro. A estratégia se baseia na obtenção das correntes medidas na carga não linear, relação entre essas correntes e as do filtro e por fim, os cálculos dos seus parâmetros. Esse estudo contempla o desenvolvimento de um equacionamento que resulta em um roteiro de projeto do dispositivo em questão. A validação do projeto é feita através de simulação na plataforma ATP – *Alternative Transients Program*. Paralelo a isso, utilizou-se de um protótipo do filtro e montou-se em laboratório um arranjo similar ao sistema simulado, e em ambos os casos, o filtro se mostrou eficaz na diminuição de correntes harmônicas de quinta e sétima ordem. Por fim, fez-se um estudo complementar entre os índices de qualidade da energia e eficiência energética.

Palavras-chave: Correntes harmônicas de sequência positiva e negativa, filtro harmônico, qualidade da energia, filtro eletromagnético.

Abstract

This dissertation presents design considerations of an electromagnetic harmonic filter of positive and negative sequence currents. This device is based on the saturated core reactor, and is an alternative to reduce levels of harmonic currents generated by uncontrolled three-phase six-pulse rectifier, which has harmonic current and phase angle known. This equipment has its core equal to a three-phase transformer without secondary winding. Another difference with transformers its operating point as regards saturation. This equipment is designed to operate in the saturated region of BxH curve generating fifth and seventh order harmonic currents equal to the rectifier. Adjusting the phase angles of the filter harmonic currents with a resistive element it is possible to attenuate those produced by non-linear load. This strategy results in partial or total elimination of greater harmonics generated by the load, which is fifth and seventh orders. Thereafter, is presented the strategic to obtain the design of the filter. The strategy is based on measurement currents obtained from the rectifier, correlate these data with the filter and finally calculate the filter parameters. This study includes the development of the equations that results in an initial filter project. The validation of this design is made by software ATP – Alternative Transients Program. It has also been assembled in the laboratory with similar simulated system using a prototype filter, and in both cases the filter was effective in attenuating harmonic currents of the fifth and seventh orders. Finally, it is made an additional study between power quality and energy efficiency.

Keywords: Harmonic currents of positive and negative sequence, harmonic filter, power quality, electromagnetic filter.

Sumário

Agradecimentos	i
Dedicatória.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades.....	xi
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Estado da arte.....	2
1.3 Contribuições desta dissertação	6
1.4 Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO II.....	8
2. HARMÔNICAS E SUAS FORMAS DE MITIGAÇÃO	8
2.1 Considerações Iniciais	8
2.2 Conceituação de Harmônicas e suas Fontes	9
2.3 Técnicas de Mitigação	11
2.3.1 Aumento do número de pulsos de conversores.....	11
2.3.2 Filtros harmônicos	13
2.4 Considerações Finais	23

CAPÍTULO III	25
3. FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA: FUNDAMENTAÇÃO	25
3.1 Considerações Iniciais	25
3.2 Abordagem Teórica.....	26
3.2.1 Concepção Física.....	26
3.2.2 Circuito Magnético e Princípio de Saturação Magnética	27
3.2.3 Operação do Filtro Eletromagnético.....	29
3.2.4 Retificador de Seis Pulsos Não-Controlado.....	32
3.3 Abordagem Prática de Projeto	34
3.3.1 Etapa I.....	34
3.3.2 Etapa II.....	35
3.3.3 Etapa III	36
3.4 Considerações Finais.....	43
CAPÍTULO IV	44
4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS	44
4.1 Considerações Iniciais	44
4.2 Estratégia de simulação	44
4.2.1 Modelagem do filtro no ATPDraw.....	46
4.2.2 Resultados das Simulações	52
4.3 Procedimentos experimentais	56
4.3.1 Sistemática de monitoramento e medição.....	56
4.3.2 Arranjo Implementado em Laboratório	57
4.3.3 Resultados Experimentais	58
4.4 Qualidade da energia elétrica versus eficiência energética.	64
4.5 Análise das Potências	65
4.6 Considerações finais.....	67

CAPÍTULO V	69
5. CONCLUSÕES	69
5.1 Conclusões gerais e propostas de continuidade	69
REFERÊNCIAS	72
ANEXOS	79
Artigos Publicados e/ou Submetidos	79

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier	10
Figura 2.2 - (a) Arranjo do retificador de 12 pulsos. (b) Arranjo do Retificador de 24 pulsos	12
Figura 2.3 - Diagrama de um circuito RLC série	14
Figura 2.4 - Comportamento da impedância. (a) Magnitude (b) Ângulo de Fase.....	16
Figura 2.5 - Combinações do filtro amortecido. (a) Primeira ordem; (b) Segunda ordem; (c) Terceira ordem; (d) Tipo “C.....	17
Figura 2.6 - Filtro ativo ou APF, na configuração série	19
Figura 2.7 - Princípio de compensação do APF série	19
Figura 2.8 - Esquema da ligação do APF shunt	20
Figura 2.9 - Princípio de compensação do APF Shunt	20
Figura 2.1 - Topologias do filtro híbrido. (a) Unidade ativa e passiva shunt. (b) Unidade ativa série e passiva shunt. (c) Filtro passivo shunt com a carga e unidade ativa em série com o mesmo.....	21
Figura 2.2 - Filtro eletromagnético de sequência zero e seu arranjo típico de instalação	22
Figura 2.3 - Acoplamentos magnéticos das bobinas do Filtro de Sequência Zero.....	23
Figura 3.1 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético	26
Figura 3.2 - Configuração do Filtro Eletromagnético.....	27
Figura 3.3 - Circuito Magnético simples.....	28
Figura 3.4 - Ciclo de Histerese com curva de magnetização CC	29
Figura 3.5 - Representação gráfica da corrente requerida pelo filtro	29
Figura 3.6 - Diagrama fasorial da compensação	30
Figura 3.7 - Arranjo elétrico do processo de compensação	31
Figura 3.8 - Compensação das correntes harmônicas de quinta e sétima ordem	32
Figura 3.9 - Esquema elétrico da ponte retificadora seis pulsos não controlada.....	33
Figura 3.10 - Estratégia traçada para o roteiro de projeto.....	34
Figura 3.11 - Esquema elétrico e foto da ponte retificadora trifásica não controlada	35
Figura 3.12 - Esquema das dimensões do filtro.....	36

Figura 4.4 - (a) Esquema do Reator Twin-Triple implementado no ATPDraw. (b) Esquema elétrico e magnético do reator	45
Figura 4.5 - Filtro eletromagnético implementado no ATPDraw	46
Figura 4.6 - (a) Bloco original do RNS. (b) Bloco desenvolvido do filtro	47
Figura 4.7 - Confronto entre as formas de onda das correntes da carga não linear e filtro.....	52
Figura 4.8 - Corrente após as devidas compensações harmônicas	53
Figura 4.9 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 5ª ordem - Caso Simulado ...	55
Figura 4.7 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 7ª ordem - Caso Simulado ...	55
Figura 4.8 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e análise dos dados.....	56
Figura 4.9 - Esquema elétrico trifásico montado em laboratório	57
Figura 4.10 - Bancada de testes no laboratório	58
Figura 4.11 - Formas de onda das correntes da carga e filtro. Caso experimental.....	59
Figura 4.12 - Forma de onda da corrente da fonte. Caso experimental	60
Figura 4.13 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 5ª ordem - Caso Experimental.....	62
Figura 4.14 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 7ª ordem - Caso Experimental.	62
Figura 4.15 - Tensões de alimentação do arranjo implementado em laboratório.....	62
Figura 4.16 - Índices de distorção da corrente na fonte e percentual de acréscimo de corrente eficaz devido à operação do filtro	65
Figura 4.17 - Potências Envolvidas no Sistema Experimental.....	66

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Quantidade de arranjos de conversores de seis pulsos e as combinações possíveis dos enrolamentos secundários dos transformadores.....	13
Tabela 4.1 - Tabela exemplificada do projeto de um filtro	51
Tabela 4.2 - Dados do sistema simulado.....	52
Tabela 4.3 - Valores em àmpères das correntes fundamentais e harmônicas da simulação..	54
Tabela 4.4 - Percentuais de distorções das correntes do circuito simulado	54
Tabela 4.5 - Dados dos transdutores e DAQ's	56
Tabela 4.6 - Dados do sistema ensaiado	58
Tabela 4.7 - Valores, em àmpères, das correntes fundamentais e harmônicas do ensaio experimental	61
Tabela 4.8 - Percentuais de distorções das correntes do circuito ensaiado	61
Tabela 4.9 - Valores, em volts, das tensões de entrada no sistema ensaiado	63
Tabela 4.10 - Percentuais de distorções das tensões de entrada no sistema ensaiado	63
Tabela 4.11 - Índices de Distorção Harmônica e Acréscimo de Corrente Eficaz na Fonte.	64
Tabela 4.12 - Potências Envolvidas no Sistema Considerado.....	66
Tabela 4.13 - Variação de potências na fonte em relação ao retificador	66
Tabela 4.14 - Fatores de potências do Sistema.....	67

Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades

A	Ampères
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
APF	<i>Active Power Filters</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
B	Densidade de campo magnético
C	Capacitância
CNL	Carga Não Linear
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
D	Potência reativa de distorção
DTHT	Distorção de tensão harmônica total
DIHT	Distorção de corrente harmônica total
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_C	Corrente da carga não linear
I_F	Corrente do filtro
I_S	Corrente no sistema de suprimento
H	Intensidade de Campo Magnético
h	Ordem harmônica
K"	Fator de correção
L	Indutância
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PWM	Pulse-width modulation
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
P	Potência Ativa
Q	Potência reativa de deslocamento
R_S	Resistência do sistema de suprimento
RNS	Reator a núcleo saturado
rms	<i>Root mean square</i>
R	Resistência Elétrica

s	Segundos
S	Potência Aparente
TACS	<i>Transient Analysis Control System</i>
T	Tesla
V_{CA}	Tensão alternada
V	Volts
ω_0	Frequência angular de sintonia.
ω	Frequência angular
Ω	OHMS
μ	Permeabilidade magnética
Φ	Fluxo magnético
α	Multiplicador angular $\alpha = 1 \angle 120^\circ$
θ_h	Angulo de fase da corrente harmônica
V_h	Tensão harmônica de ordem h
V_1	Tensão fundamental
I_h	Corrente harmônica de ordem h
I_1	Corrente fundamental
l_{mag}	Comprimento magnético
I_{CC}	Corrente no elo contínuo da ponte retificadora
V_{CC}	Tensão no elo contínuo
P_{ELOcc}	Potência do dispositivo calculada pelo elo contínuo
Q_F	Potência elétrica do filtro
ρ_{cu}	Resistividade do cobre
l_{cu}	Comprimento da bobina de cobre
\bar{l}_{cu}	Comprimento médio das espiras do enrolamento
Xp'	Reatância indutiva do filtro
K''	Coeficiente de correção $K'' = 1 - \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L_B}{H_B} \right)$
L_B	Espessura da bobina
H_B	Altura da bobina (Comprimento axial da bobina)

S_{FioMin}	Seção transversal mínima do condutor
J	Densidade de corrente
$S_{FioReal}$	Seção transversal comercial do condutor
N	Número de espiras do enrolamento
S_{MAG}	Seção magnética do núcleo do filtro
S_{MAG}'	Seção geométrica do núcleo do filtro
K_L	Coefficiente do núcleo laminado
f	Frequência do sistema
K_{Ench}	Coefficiente de enchimento do núcleo
a	Largura da coluna
L_J	Largura da janela
H_B	Altura do Cobre na Janela
H_J	Altura da janela
d	Distancia entre a bobina e a travessa
S_{cuJ}	Área utilizada pelo cobre na janela
L_B	Largura do cobre na janela
H_T	Altura total do núcleo
L_T	Largura total do núcleo

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O termo “Qualidade da Energia Elétrica” está relacionado a uma série de fatores que podem afetar e/ou comprometer a qualidade do produto e do serviço de suprimento elétrico. Dessa forma, qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracteriza uma rede elétrica com qualidade comprometida.

A má qualidade da energia elétrica 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 deva, necessariamente, ocorrer na forma de um serviço ou produto 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 [1]. Atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança, por vários motivos, tem gerado grandes motivações junto a empresas. Dentre outros fatores, com os movimentos atuais em direção à competitividade entre as concessionárias, a qualidade do fornecimento da energia torna-se, de fato, muito importante.

Aliada a estes fatores, a existência de uma legislação própria, a qual orienta índices de referência aos fornecedores [2], [3] e [1], contribui para o estudo e pesquisa da qualidade da energia elétrica, com o intuito de conferir uma melhoria nos padrões da

qualidade do fornecimento, de forma a assegurar o bom funcionamento dos sistemas elétricos.

Reconhecendo que os distúrbios que determinam os desvios da qualidade da energia, ou mais especificamente, da tensão, são amplamente conhecidos em todos os setores especializados, principalmente no meio acadêmico, considera-se desnecessário tecer maiores comentários sobre os distintos indicadores de qualidade nesta dissertação de mestrado. Por tais motivos, as discussões posteriores serão orientadas diretamente ao tema principal da presente pesquisa, qual seja, mitigação de correntes harmônicas.

1.2. Estado da arte

Os estudos de mitigação harmônica podem ter diversas formas distintas como regulações, desenvolvimento de equipamentos com baixo nível de distorção de corrente, reconfiguração da estrutura do sistema e instalação de equipamentos para supressão harmônica, utilizados em situações onde os requisitos de regulação harmônica não podem ser cumpridos [4] e [8].

Dentre as alternativas relatadas como possíveis estratégias para a eliminação/redução das correntes harmônicas, aquelas associadas aos filtros, passivos, ativos e eletromagnéticos são, comumente, as mais empregadas. Devido a este fato, estas três metodologias serão consideradas com mais detalhes na sequência.

Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos tipo R, L e C, podendo ser conectados em paralelo ou em série ao sistema elétrico. Aqueles conectados em paralelo (derivação, ou *shunt*), têm sido amplamente estudados e aplicados em sistemas elétricos [4]-[10]. Ao longo de vários anos, devido a fatores científicos, tecnológicos e econômicos, esta tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos. Estes dispositivos podem ser classificados em dois grupos: sintonizados e amortecidos. Os filtros em derivação sintonizados são baseados no fenômeno da ressonância, que deve ocorrer para uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas, apresentando, nesta situação, uma baixa impedância resistiva para as mesmas. Os filtros em derivação amortecidos são constituídos por circuitos que oferecem uma baixa impedância ao longo de uma larga faixa de frequência, [11] e [4]. Na prática, são encontradas configurações que combinam o uso de filtros sintonizados para ordens harmônicas individuais (até a 13^a, por exemplo) e

amortecidos para as frequências superiores [11]. Outra função dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para as frequências abaixo da frequência de ressonância, apresentam-se como circuitos capacitivos, sendo, portanto, compensadores de energia reativa na frequência fundamental. Embora estes filtros sejam usados normalmente em sistemas de potência, têm-se, em [12], um exemplo de aplicação e análise de um filtro sintonizado no ponto de conexão de cargas não lineares monofásicas de pequena potência.

Por outro lado, os filtros passivos conectados em série têm sido bem menos enfocados para a filtragem harmônica do que aqueles filtros conectados em derivação, o que pode ser justificado através dos seguintes motivos:

- Produção de correntes harmônicas por parte das cargas não lineares seria inibida no seu ponto de origem;
- Dificuldades relacionadas com o isolamento elétrico dos componentes L e C;
- Altas distorções de tensão nos terminais de saída do filtro;
- Condução de toda a corrente de carga, apresentando, por conseguinte, maior custo dos componentes e da instalação.

Outra alternativa para diminuir a distorção harmônica das correntes consiste na utilização de filtros ativos, constituídos por componentes eletrônicos de potência e de controle analógico e/ou digital. Esta proposta tem evoluído notavelmente, sobretudo a partir de 1980.

Os tipos básicos de filtros ativos são: paralelo, série, série/paralelo combinados e híbridos (que combinam técnicas ativas e passivas). Os métodos de operação dos filtros ativos atuais são fundamentados na teoria das potências ativa e reativa instantâneas [13] e [14].

Os filtros ativos paralelos atuam através de um processo de detecção, sintetização e aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não linear, podendo, ainda, atuar sobre a corrente na frequência fundamental, promovendo a compensação reativa [15], [5], [16]-[22]. Um filtro ativo paralelo típico é composto basicamente por um inversor de tensão ou de corrente, acionado por técnicas específicas de controle [15].

Como mencionado, a combinação de filtros ativos série/paralelo também se apresenta como um procedimento para o controle de harmônicos. Neste particular, a referência [20] apresenta um dispositivo para a compensação simultânea de tensão e

corrente, denominado por UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*), sendo esta denominação advinda do fato que seu circuito de potência se apresenta de modo similar ao do UPFC (*Unified Power Flow Controller*) [18]. Nesta mesma linha, [22] propôs o compensador universal UPLC (*Universal Active Power Line Conditioner*) que engloba todos os conceitos associados com o UPFC e o UPQC num único equipamento.

Existe, também, a filtragem harmônica através da associação dos filtros passivos com os filtros ativos, chamados de filtros híbridos. Esta solução ocorre no sentido de reduzir o custo inicial da instalação e obtenção de maior eficiência na diminuição do conteúdo harmônico [23], [4], [7], [8], [24] e [25].

De uma maneira geral, a utilização de filtros ativos para o controle de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente se apresenta como opção eficiente para tal fim, apresentando, porém, altos custos de implantação e manutenção, inviabilizando, em algumas situações, o uso dos mesmos.

Na sequência são considerados os dispositivos voltados para a compensação de harmônicos baseados em princípios eletromagnéticos. Muito embora a escassa citação bibliográfica sobre esta técnica, ressalta-se que as referências [26]-[29] apresentam uma configuração do sistema de energia utilizando transformadores defasadores para a mitigação das correntes harmônicas de sequência positiva, negativa e zero. Outra estratégia eletromagnética remete ao emprego de um dispositivo capaz de promover uma baixa impedância de sequência zero, conectado em paralelo com a carga não linear. Em [9] e [10], uma configuração para o filtro eletromagnético de sequência zero são apresentadas, todavia, sem tecer maiores comentários construtivos ou operacionais. Em [9] são apresentados resultados computacionais e experimentais bastante consistentes da utilização de um filtro de sequência zero conectado em um sistema elétrico contendo retificadores monofásicos como cargas harmônicas. Esta referência apresenta comparações de desempenho desse filtro diante de diferentes impedâncias do sistema elétrico da qual faz parte e também diante de um desequilíbrio na tensão de suprimento. Avançando nesta direção, a referência [23] apresenta uma alternativa para o aumento da eficiência deste filtro de sequência zero, através do uso de um arranjo conectado em série com a carga não linear, chamado bloqueador de sequência zero. Este tem o objetivo de aumentar a impedância de sequência zero do sistema de alimentação, facilitando, por conseguinte, o caminho de corrente de sequência zero através do filtro em questão. Visando observar o desempenho de filtros de sequência zero quando da presença de condições não ideais de suprimento ou carga alimentada, surge a referência

[30], a qual enfoca, computacionalmente, diferentes condições elétricas do sistema, quais sejam: carga não linear trifásica desequilibrada, carga não linear monofásica, tensão de alimentação desequilibrada e tensão de alimentação distorcida. De uma maneira geral, todas as condições não ideais apresentadas alteraram, de forma negativa, a operação do filtro de sequência zero, desequilibrando as correntes de fase e facilitando o sobreaquecimento do filtro, através da filtragem de componentes de sequência zero de outras ordens harmônicas diferentes daquelas múltiplas de 3.

Enfocando a filtragem de harmônicas de sequência positiva e negativa através de dispositivos eletromagnéticos, as referências [31], [32] propõem um transformador com ligação delta/estrela [32] e delta/zigue-zague [29] como interconexão entre o lado CA e o lado CC de um retificador de 6 pulsos (carga não linear). Para ambos os casos, o retificador deve possuir uma estrutura topológica que atenda os requisitos do sistema de filtragem harmônica, podendo ser inviável em instalações já em funcionamento. Somado a isto, as soluções indicadas nas mencionadas referências pressupõem o uso de estruturas magnéticas envolvendo dois enrolamentos, sendo que, no caso da referência [28] e [29], é utilizada uma conexão zigue-zague, comprometendo significativamente o custo de implantação destas metodologias.

Por fim, a contextualização do tema se completa ao se analisar [30], pois se trata do estudo inicial que motivou esta dissertação. Nessa referência, a abordagem feita pelo autor se refere na obtenção do filtro eletromagnético se baseando na tecnologia empregada no reator a núcleo saturado [33]. Neste estudo [30], a abordagem se restringiu em mostrar os princípios físicos e operacionais deste filtro, bem como sua modelagem no *software* SABER, da *Synopsys Inc.* Em seus resultados, foi comprovado que o comportamento da corrente não linear respeita a sequência positiva e negativa. Com a inserção de um dispositivo defasador, o autor conseguiu manipular as correntes harmônicas e colocou-as em oposição de fase com as correntes harmônicas de um retificador trifásico não controlado, apresentando resultados expressivos na mitigação de harmônicas para esse tipo de carga não linear. Motivado por esses resultados e acreditando em seu aprimoramento, foi desenvolvido o presente estudo, visando as confirmações desse sucesso utilizando outra plataforma computacional, ATPDraw, e uma proposição de metodologia de projeto deste dispositivo.

1.3. Contribuições desta dissertação

Apesar dos resultados alcançados em [30], principalmente no que tange os resultados numéricos da compensação harmônica, ainda existem muitos horizontes a serem desbravados até que o filtro eletromagnético seja de tecnologia plenamente conhecida e aceita, tanto na esfera científica quanto em soluções industriais. Reconhecendo essa questão e dando continuidade ao trabalho [30], esta dissertação tem como objetivo contribuir com os seguintes pontos:

- Apresentação da fundamentação eletromagnética que norteia todo princípio operacional do filtro. Com isso, pode-se relacionar as leis eletromagnéticas com o comportamento do filtro sob condições normais de funcionamento, ou seja, condições que levam o dispositivo a trabalhar saturado;
- Desenvolver uma bagagem matemática que guie o usuário em traçar um roteiro de projeto para o dispositivo em questão;
- Avaliar computacionalmente, em plataforma ATPDraw, as condições operativas do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa, destacando seu desempenho na mitigação de correntes harmônicas oriundas de uma ponte retificadora trifásica não controlada;
- Apresentar resultados provenientes de testes operativos do filtro, realizados em laboratório juntamente com uma ponte retificadora trifásica não controlada alimentando uma carga resistiva.

1.4. Estrutura da dissertação

Diante das propostas supramencionadas, além do presente capítulo introdutório, a dissertação será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

Capítulo II - Harmônicas e suas formas de mitigação

Este capítulo encontra-se direcionado à apresentação do conceito de distorção harmônica e suas formas de mitigação. Será apresentado a conceituação operacional e matemática das técnicas:

- Aumento do número de pulsos de conversores;
- Filtros passivos;

- Filtros ativos;
- Filtro híbrido;
- Filtro eletromagnético de sequência zero;
- Filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa.

Capítulo III - Filtros eletromagnéticos de sequência positiva e negativa: Fundamentação

Este capítulo apresenta, inicialmente, toda a concepção física do dispositivo em questão, foco do estudo de compensação harmônica. Em seguida, é mostrado o desenvolvimento matemático que norteia a tecnologia eletromagnética, a fim da orientação no roteiro de projeto do filtro.

Capítulo IV - Resultados computacionais e análises experimentais

Utilizando-se da base matemática explorada no capítulo anterior, essa seção é responsável por apresentar testes computacionais, em plataforma ATPDraw, e laboratoriais de um sistema composto por fonte de tensão senoidal alimentando, em paralelo, uma carga não linear, constituída de uma ponte retificadora trifásica não controlada, e o filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa.

Capítulo V - Conclusões

Por fim, a apresentação das principais discussões e conclusões gerais dos capítulos que formam o corpo desta dissertação é destacada nesta fase final do trabalho. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

HARMÔNICAS E SUAS FORMAS DE MITIGAÇÃO

2.1. Considerações Iniciais

As distorções nas formas de onda da corrente e da tensão dos sistemas elétricos estão relacionadas, principalmente, à injeção de correntes harmônicas através das cargas elétricas não lineares basicamente resumidas em conversores estáticos de potência, dispositivos de descarga de arco elétrico, dispositivos de saturação magnética, e, em menor grau, máquinas rotativas.

Essas cargas mudam a natureza senoidal da onda de corrente e conseqüentemente a forma de onda da tensão, resultando em correntes de fluxo harmônico no sistema de alimentação CA que podem causar interferências nos circuitos de comunicação, perdas adicionais em transformadores e motores, etc.

Atualmente, devido ao agravamento das perturbações provocadas pelos harmônicos na rede elétrica, a compreensão da sua natureza e dos seus efeitos tornou-se um assunto de grande importância técnica e econômica. A distorção da tensão dos sistemas elétricos devido à presença de harmônicos tem sido agravada nos últimos anos pelas razões já apontadas. Este problema deve ser resolvido e não simplesmente ignorado. Para os consumidores, os harmônicos introduzem graves problemas nos equipamentos elétricos, tanto a nível imediato quanto à longo prazo. Para as concessionárias, a curto prazo as principais conseqüências resumem-se no aumento das perdas elétricas no sistema e, por conseguinte, na diminuição dos lucros. A médio e longo prazos, caso nenhuma providência seja encaminhada no sentido de manter sob

rígido controle os efeitos das distorções harmônicas, o maior desafio será garantir a satisfação dos clientes em um ambiente competitivo entre as empresas do setor.

Diante desse contexto, serão abordados, nessa seção, os conceitos relativos às distorções e suas formas de mitigação mais usuais.

2.2. Conceituação de Harmônicas e suas Fontes

A geração de eletricidade normalmente acontece em frequências constantes de 50 Hz ou 60 Hz e o sinal de tensão gerado pode ser considerável praticamente senoidal. Entretanto, quando essa tensão é aplicada a uma carga de comportamento não linear ocasiona a circulação de uma corrente de mesma característica. Sabe-se que o sistema de suprimento possui impedâncias que percorridas pelas correntes não lineares, quedas de tensão não senoidais ocorrerão na rede produzindo, assim, distorção de tensão nos barramentos.

A análise harmônica se trata do processo de cálculo das magnitudes e fases dos sinais elétricos de frequências múltiplas inteiras da fundamental. Uma metodologia amplamente difundida no estudo de poluição harmônica é a conhecida série de Fourier. Esta, apresentada em (2.1), estabelece uma relação entre uma função no domínio do tempo e no domínio da frequência.

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left(a_h \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_h \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \right) \quad (2.1)$$

Onde a_0 é o valor médio da função $x(t)$, enquanto a_n e b_n , coeficientes da série, são componentes retangulares da $h^{\text{ésima}}$ harmônica, conforme a expressão (2.2).

$$A_h \angle \phi_h = a_h + jb_h \quad (2.2)$$

A Figura 2.1 ilustra, graficamente, o conceito apresentado por Fourier, conforme a expressão (2.1).

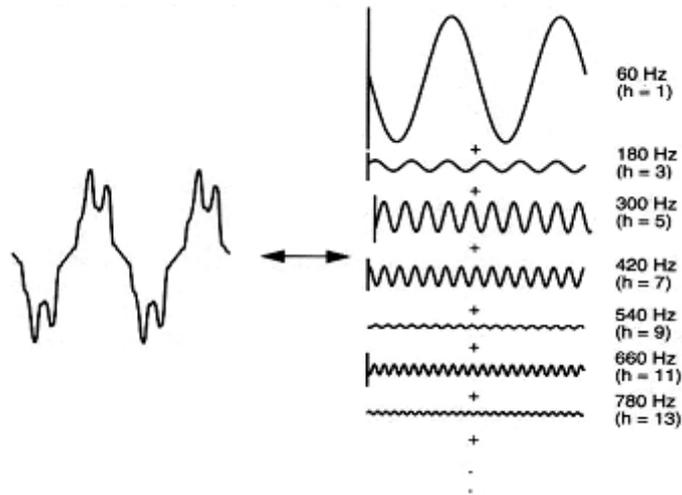


Figura 2.1 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier.

Como forma de quantificar a presença de distorções harmônicas nos sinais de tensões e/ou correntes, utiliza-se da denominada “Distorção Harmônica Total”, sendo esta uma das designações mais utilizadas no meio técnico científico. Utilizando de propostas de convenção adotadas em [34], as equações (2.3) e (2.4) sintetizam tais definições:

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h \geq 2}^{h_{\text{máx}}} (V_h \%)^2} \quad (2.3)$$

$$DIHT = \sqrt{\sum_{h \geq 2}^{h_{\text{máx}}} (I_h \%)^2} \quad (2.4)$$

Onde:

DTHT – distorção de tensão harmônica total [%];

DIHT – distorção de corrente harmônica total [%];

$V_h \% = 100 \frac{V_h}{V_1}$ - tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];

V_h - tensão harmônica de ordem h [V];

V_1 - tensão fundamental [V];

$I_h \% = 100 \frac{I_h}{I_1}$ - corrente harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];

I_h - corrente harmônica de ordem h [A];

I_1 - corrente fundamental [A].

Reconhecendo os efeitos negativos causados pelas componentes harmônicas de tensão e/ou corrente na rede elétrica e seus componentes, bem como objetivando manter os níveis de distorção dentro dos limites recomendados [1], surge à necessidade de medidas preventivas ou corretivas para a redução dos níveis de harmônicos presentes nos barramentos e linhas de um complexo elétrico. Dentro deste contexto, esta dissertação apresentará técnicas de mitigação e filtragem de correntes harmônicas utilizando uma tecnologia já conhecida porém não esgotada, baseada em dispositivos eletromagnéticos.

2.3. Técnicas de Mitigação

As técnicas de mitigação habitualmente encontradas em nossos sistemas são o aumento no número de pulsos dos conversores e o uso de dispositivos de filtragem. A primeira se baseia na mudança da topologia dos conversores CA-CC, visando reduzir a poluição harmônica das correntes solicitadas da rede de suprimento. Já os filtros são responsáveis pela eliminação total ou parcial das correntes harmônicas então presentes na rede.

Visando traçar uma abordagem geral sobre esses métodos, esta seção apresenta breves conceitos sobre as técnicas mais encontradas na prática.

2.3.1. Aumento do número de pulsos de conversores

É de amplo conhecimento que as formas de onda de corrente que circulam nas fases de alimentação dos conversores possuem tendência fortemente não senoidal. Esses sinais possuem um conteúdo elevado de componentes harmônicas e considerando que os retificadores convertem energia CA-CC com grandes potências elétricas, seus efeitos no sistema de suprimento podem causar inúmeros inconvenientes.

Visando reduzir os efeitos dessa poluição harmônica gerada pelos conversores, a estratégia de aumentar o número de pulsos no estágio da retificação se torna uma alternativa aplicável, pois de acordo com [15] as ordens harmônicas presentes nas correntes de linhas respeitam a expressão (2.5).

$$h = p.k \pm 1 \quad (2.5)$$

Onde:

p - número de pulsos dos conversores;

k - constante de número inteiro e positivo (1, 2, 3, ..., ∞).

As topologias empregadas em retificadores de doze, dezoito, vinte e quatro pulsos e etc., consistem na associação de circuitos retificadores de seis pulsos controlados ou não. A Figura 2.2 ilustra os arranjos dos conversores de doze e vinte e quatro pulsos respectivamente.

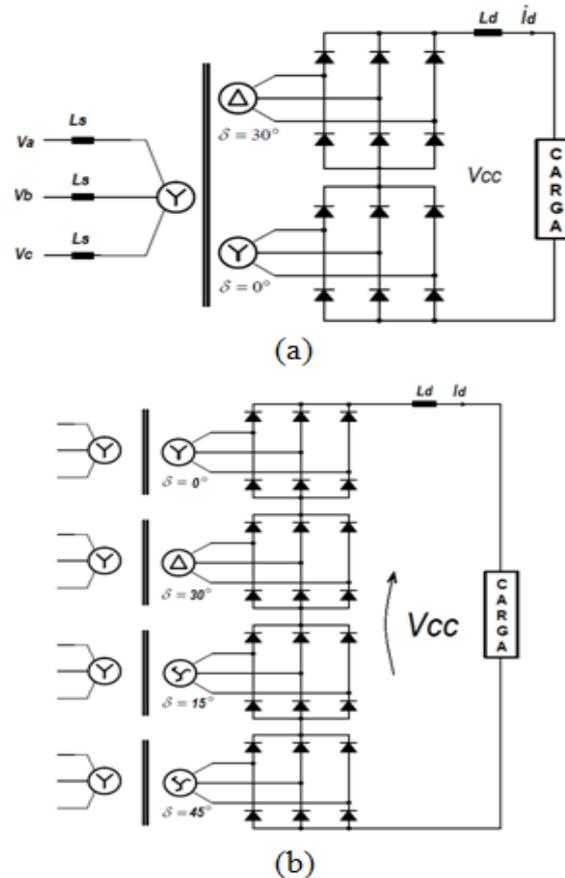


Figura 2.2 - (a) Arranjo do retificador de 12 pulsos. (b) Arranjo do Retificador de 24 pulsos.

Vale destacar que os arranjos de retificadores multipulsos apenas são possíveis devido às defasagens angulares entre as tensões secundárias do(s) transformador (es). Portanto, a quantidade de arranjos de retificadores de seis pulsos e as combinações possíveis dos enrolamentos secundários está resumida na Tabela 2.1 [15].

Tabela 2.1 - Quantidade de arranjos de conversores de seis pulsos e as combinações possíveis dos enrolamentos secundários dos transformadores.

Número de Pulsos	Número de Arranjos de Seis Pulsos e Conexões Típicas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
6	Δ ou Y	-	-	-	-	-	-	-
12	Δ	Y	-	-	-	-	-	-
18	Δ	Y - 10°	Y + 10°	-	-	-	-	-
18	$\Delta + 10^\circ$	$\Delta - 10^\circ$	Y	-	-	-	-	-
18	$\Delta + 20^\circ$	Δ	$\Delta - 20^\circ$	-	-	-	-	-
24	$\Delta + 15^\circ$	Δ	$\Delta - 15^\circ$	Y	-	-	-	-
24	Δ	Y + 15°	Y	Y - 15°	-	-	-	-
24	$\Delta + 7\ 1/2^\circ$	$\Delta - 7\ 1/2^\circ$	Y + 7 1/2°	Y - 7 1/2°	-	-	-	-
30	$\Delta + 12^\circ$	Δ	$\Delta - 12^\circ$	Y + 6°	Y - 6°	-	-	-
36	$\Delta + 10^\circ$	Δ	$\Delta - 10^\circ$	Y + 10°	Y - 10°	Y	-	-
48	$\Delta + 15^\circ$	$\Delta + 7\ 1/2^\circ$	Δ	$\Delta - 7\ 1/2^\circ$	$\Delta - 15^\circ$	Y - 7 1/2°	Y	Y + 7 1/2°

Fonte: **Electric Power Engineering Handbook - Second Edition**

Vale salientar que modelos especiais de transformadores também são empregados no processo de retificação, porém não serão abordados nesse documento.

2.3.2. Filtros harmônicos

Com os avanços na tecnologia e significativas melhorias de dispositivos eletrônicos de potência, as concessionárias estão constantemente pressionadas para fornecer energia de alta qualidade e confiável. Com isso, a implementação dos filtros harmônicos tornou-se um elemento essencial das redes de energia elétrica, e serão apresentadas a seguir algumas dessas alternativas.

2.3.2.1. Filtros Passivos

Como já abordado amplamente pela literatura [8], os filtros passivos são circuitos capazes de separar sinais elétricos de correntes, alterando as características de amplitude e fase desses sinais. Estes apresentam características bastante robustas, fundamentado no princípio da ressonância para realizar a filtragem dos sinais. Deste modo, operam tanto selecionando um determinado sinal como também rejeitando o sinal desejado. A configuração usual deste dispositivo é *shunt* ou série à(s) carga(s).

Esses filtros, como tudo na engenharia, possuem vantagens e desvantagens, porém o arranjo em derivação se mostra mais difundido, principalmente quando se pretende filtrar harmônicas no lado CA de estações de transmissão em corrente contínua, de estações retificadoras industriais, etc.

Os filtros em derivação podem ser divididos em duas características:

- Sintonizados;
- Amortecidos.

A. Filtros Sintonizados

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva, vide Figura 2.3. Para frequências menores que a de sintonia eles são capacitivos e para as frequências superiores são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental, estes filtros funcionam como compensadores de reativo.

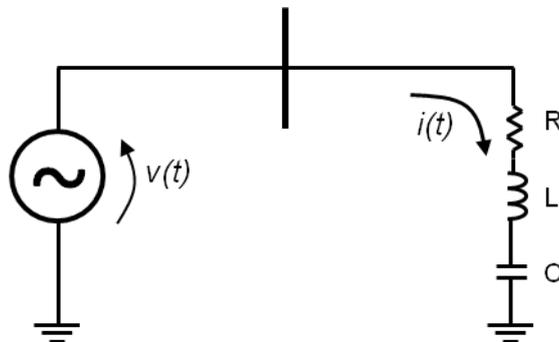


Figura 2.3 - Diagrama de um circuito RLC série.

Utilizando-se do conceito de ressonância série ao circuito da Figura 2.3, cuja impedância complexa é dada pela equação (2.6). Observa-se que, para uma dada frequência da fonte a impedância será puramente resistiva.

$$Z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.6)$$

Onde:

ω - Frequência angular da fonte de alimentação do sistema [rad/s];

R - Valor da resistência [Ω];

L - Valor da indutância [H];

C - Valor da capacitância [F].

Da expressão (2.6) obtêm-se a magnitude e o ângulo da impedância, conforme as equações (2.7) e (2.8).

$$|Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.7)$$

$$\Phi(\omega) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

$|Z(\omega)|$ - Módulo da impedância complexa em função da frequência angular;

$\Phi(\omega)$ - Ângulo da impedância complexa em função da frequência angular.

A condição de ressonância, conforme equação (2.9), possibilitará a determinação da frequência que anulará a parte imaginária de $Z(\omega)$.

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (2.9)$$

Desenvolvendo a expressão (2.9) obtêm-se a frequência de sintonia do filtro, ou frequência característica do circuito RLC, conforme a equação (2.10).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_0 \quad (2.10)$$

Onde:

ω_0 : Frequência angular de sintonia.

Observa-se, de acordo com a expressão (2.7), que, na frequência característica, a magnitude da impedância será apenas a parcela resistiva, conforme ilustrado na Figura 2.4 (a). Quanto ao ângulo de fase dessa impedância, de acordo com a expressão (2.8), esse possui valores negativos para frequências abaixo da sintonizada, caracterizando o comportamento capacitivo do filtro. Já para as frequências superiores, os ângulos são positivos e, portanto, comportamento indutivo da impedância do dispositivo. A Figura 2.4 (b) ilustra esse comportamento do ângulo de fase da impedância.

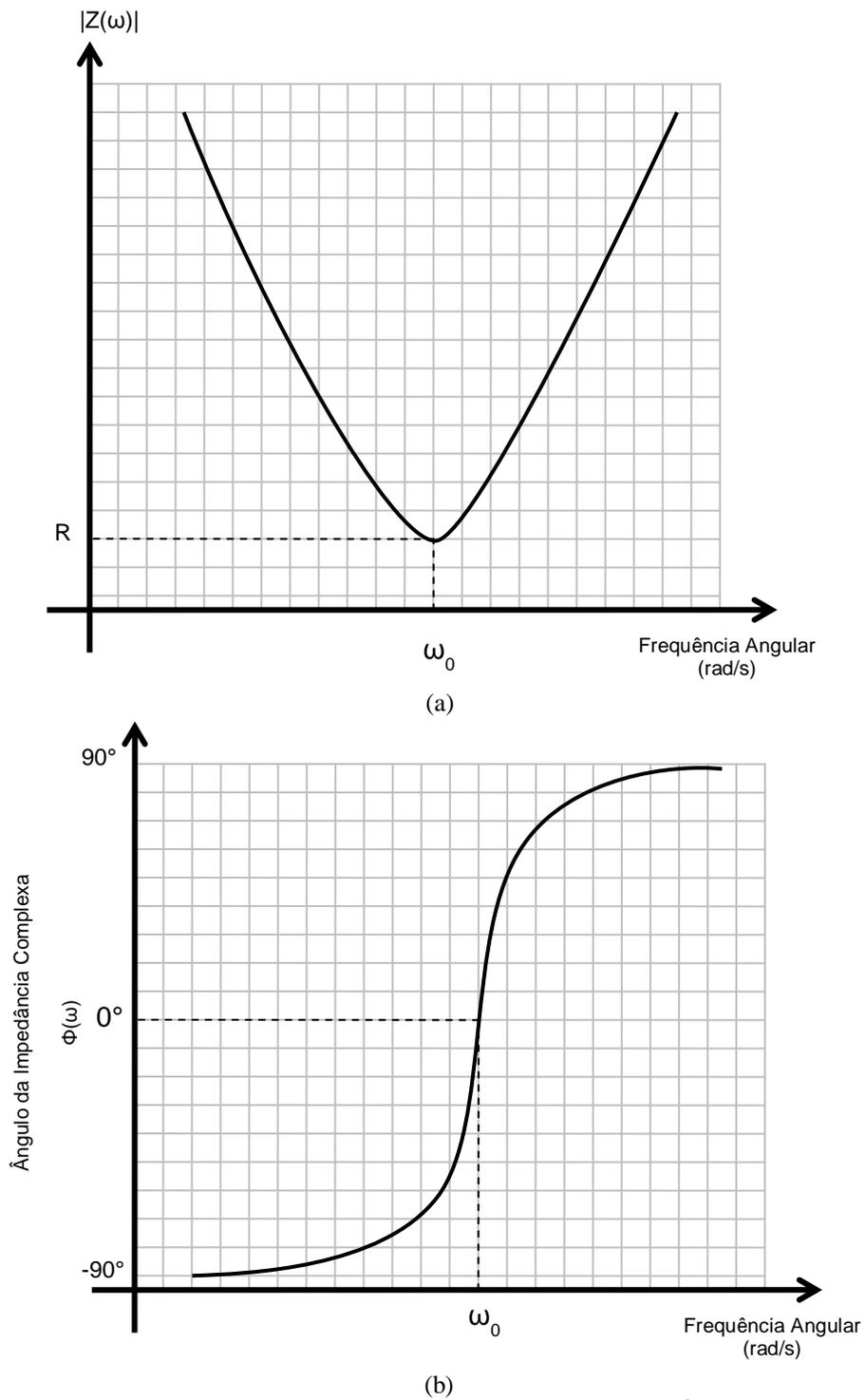


Figura 2.4 - Comportamento da impedância. (a) Magnitude (b) Ângulo de Fase.

Vale comentar que para o correto dimensionamento do filtro sintonizado, outros aspectos terão de ser verificados, como fator de qualidade e fator de dissintonia, não abordados nesta dissertação [11].

B. Filtros Amortecidos

Assim como o dispositivo apresentado no subitem A, os filtros amortecidos são circuitos formados por elementos R, L e C em diversas combinações. Porém, neste caso, este oferece baixa impedância sobre uma larga faixa de frequência. Outra característica deste equipamento é apresentar impedância predominantemente capacitiva nas baixas frequências e comportamento resistivo nas frequências superiores.

Existem essencialmente, quatro combinações possíveis para os filtros amortecidos, e são ilustradas na Figura 2.5.

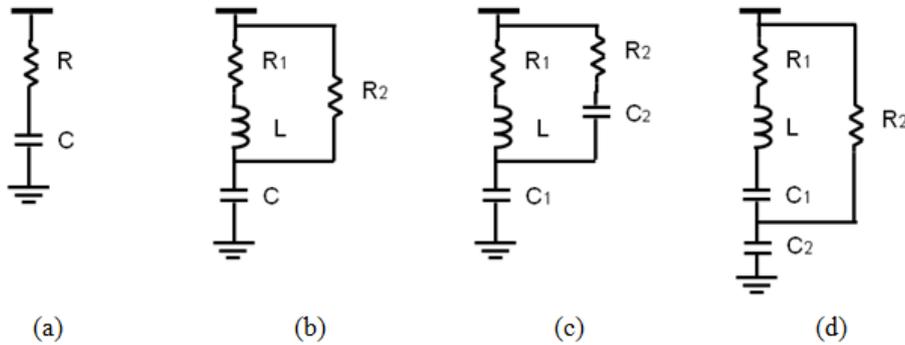


Figura 2.5 - Combinações do filtro amortecido. (a) Primeira ordem; (b) Segunda ordem; (c) Terceira ordem; (d) Tipo “C”.

De acordo com a literatura [7] o filtro de primeira ordem não é utilizado por necessitar de grandes capacitores e pela excessiva perda de energia, razão pela qual não será apresentado seu equacionamento. Já aos demais arranjos, serão apresentados, de maneira sucinta, as expressões que regem suas respectivas impedâncias, conforme equações (2.11)-(2.13).

- Filtro amortecido de segunda ordem:

$$Z_{2^\circ}(\omega) = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R_1 + j\omega L} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

- Filtro amortecido de terceira ordem:

$$Z_{3^\circ}(\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} + \left(\frac{1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} + \frac{1}{R_1 + j\omega L} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

- Filtro amortecido tipo “C”:

$$Z_C(\omega) = \frac{1}{j.\omega.C_2} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + j.\omega.L + \frac{1}{j.\omega.C_1}} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

A vantagem do dispositivo de segunda ordem é promover melhor filtragem, no entanto apresenta consideráveis perdas na frequência fundamental. O de terceira ordem apresenta baixas perdas na frequência fundamental e fraco desempenho na filtragem comparado com o de segunda ordem e o tipo “C”. Esse último, por sua vez, possui desempenho na filtragem intermediário e proporciona menores perdas em baixas frequências.

Vale ressaltar que a exemplo dos conceitos apresentados do filtro sintonizado, para o correto dimensionamento dos filtros amortecidos existem outros fatores a serem considerados no âmbito de projeto [11].

2.3.2.2. Filtros Ativos

A evolução técnica, nos últimos anos, proporcionou o aumento significativo da potência nominal e a velocidade de comutação dos dispositivos eletrônicos dos filtros ativos de potência, também chamados *Active Power Filters* (APF) [35] e [17].

Um APF é um conversor eletrônico que produz e injeta, no sistema elétrico, componentes harmônicas necessárias para cancelar os harmônicos de corrente de uma carga ou de um conjunto de cargas. Além da compensação harmônica, a estratégia de controle viabiliza incluir outros alvos para mitigação, como a potência reativa ou até mesmo para equilibrar as correntes de carga assimétrica.

Uma vantagem dos filtros ativos em confronto com filtros passivos se dá pelo fato da resposta dinâmica às mudanças do conteúdo harmônico da(s) carga(s), enquanto que os filtros passivos são fixos na sua resposta. Uma desvantagem se refere ao alto custo de implementação, sendo inviável na maioria das vezes às aplicações em instalações de pequeno porte [7].

A. APF Série

O dispositivo nessa configuração, conforme ilustrado pela Figura 2.6, é conectado ao sistema através de um transformador de acoplamento, cuja tensão de

compensação, v_c , é usada para cancelar as harmônicas de tensão da(s) carga(s), por exemplo, estações retificadoras com alta capacitância nos elos CC.

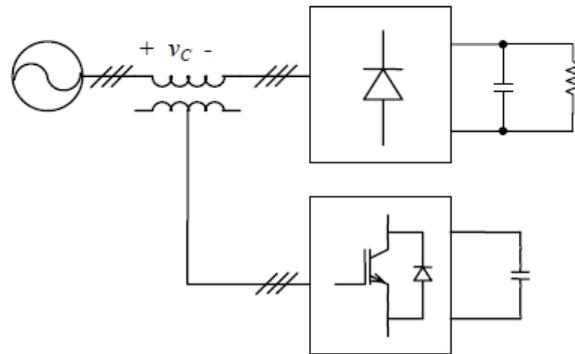


Figura 2.6 - Filtro ativo ou APF, na configuração série.

Para melhor compreensão quanto ao princípio de compensação descrito acima, vide Figura 2.7. Percebe-se que o APF fornece uma tensão de compensação através do transformador de acoplamento que cancelam as harmônicas de tensão geradas pela corrente da carga, onde v_L é a tensão na carga, v_c é a tensão do filtro e v_s a tensão na fonte [44].

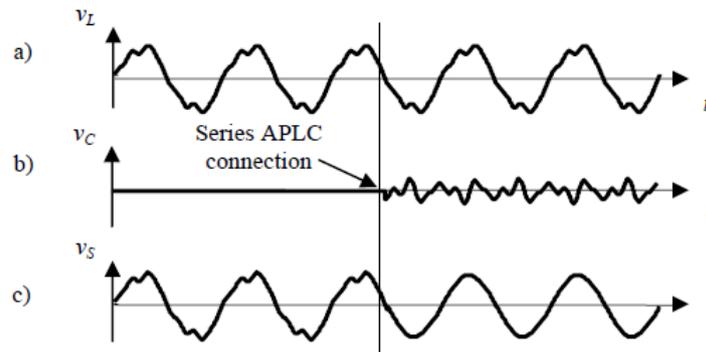


Figura 2.7 - Princípio de compensação do APF série.

B. APF *Shunt*

Essa configuração se trata da configuração mais usual [8], e a Figura 2.8 ilustra seu arranjo elétrico típico, cuja carga não linear é um retificador não controlado e o APF conectado no ponto de acoplamento comum (PAC) para compensar as componentes harmônicas de corrente.

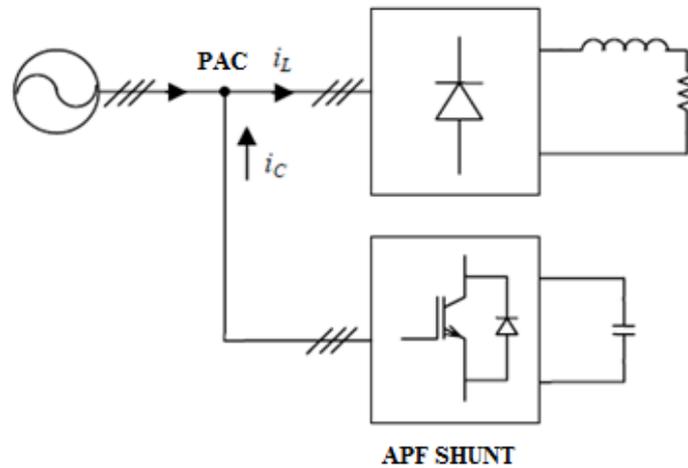


Figura 2.8 - Esquema da ligação do APF *shunt*.

Similarmente ao APF Série, a Figura 2.9 demonstra o princípio básico de compensação deste dispositivo, onde V_s é tensão da fonte, i_s corrente da fonte, i_c corrente injetada do APF Shunt e i_L é a corrente da carga não linear antes e depois da filtragem.

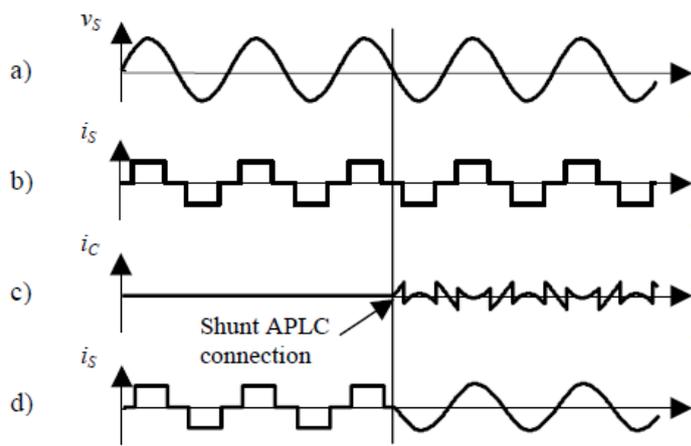


Figura 2.9 - Princípio de compensação do APF *Shunt*.

2.3.2.3. Filtro Híbrido

Combinando os conceitos descritos nos dispositivos de filtragem de tecnologia ativa e passiva, têm-se os filtros híbridos. Esse dispositivo consiste em destinar a unidade passiva para drenar os harmônicos mais relevantes da(s) carga(s) e o ramo ativo dedicado a melhorar o desempenho do conjunto passivo e/ou cancelar outras componentes harmônicas. Como resultado, a potência nominal da unidade ativa é reduzida, amortizando o custo total do conjunto sem perda significativa eficiência. Outro aspecto importante a se considerar com a utilização dessa tecnologia é a

minimização dos problemas de ressonância do filtro com a impedância do sistema de suprimento.

As Figura 2.10 (a), (b) e (c), ilustram as topologias mais usuais deste equipamento.

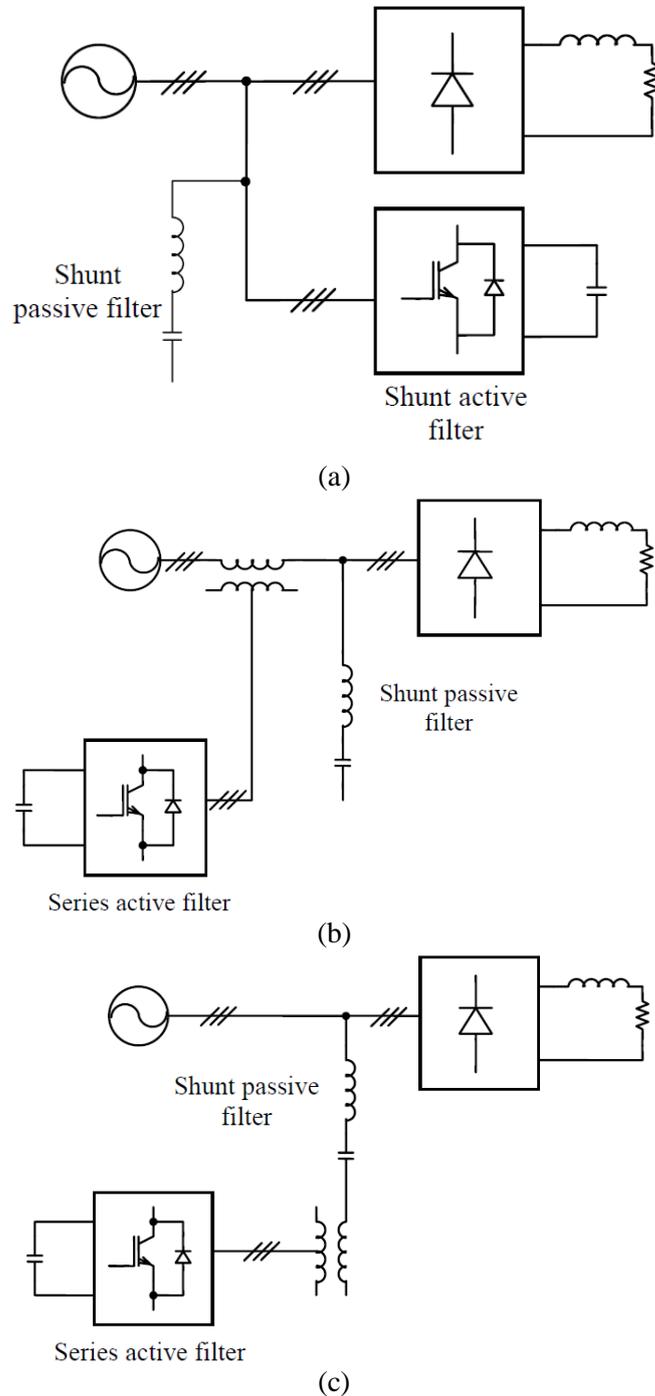


Figura 2.10 - Topologias do filtro híbrido. (a) Unidade ativa e passiva *shunt*. (b) Unidade ativa série e passiva *shunt*. (c) Filtro passivo *shunt* com a carga e unidade ativa em série com o mesmo.

2.3.2.4. Filtro Eletromagnético de Sequência Zero

Instalações que possuem predominância de cargas não lineares monofásicas apresentam correntes de linha distorcidas, com elevado conteúdo harmônico múltiplo de três. Nessas circunstâncias, o filtro eletromagnético de sequência zero [30], [23], se torna uma alternativa aplicável na redução/eliminação dessa poluição.

O processo de filtragem consiste na utilização de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se obtém um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância quando se comparado ao restante do circuito elétrico ao qual pertence o dispositivo [23], Figura 2.11.

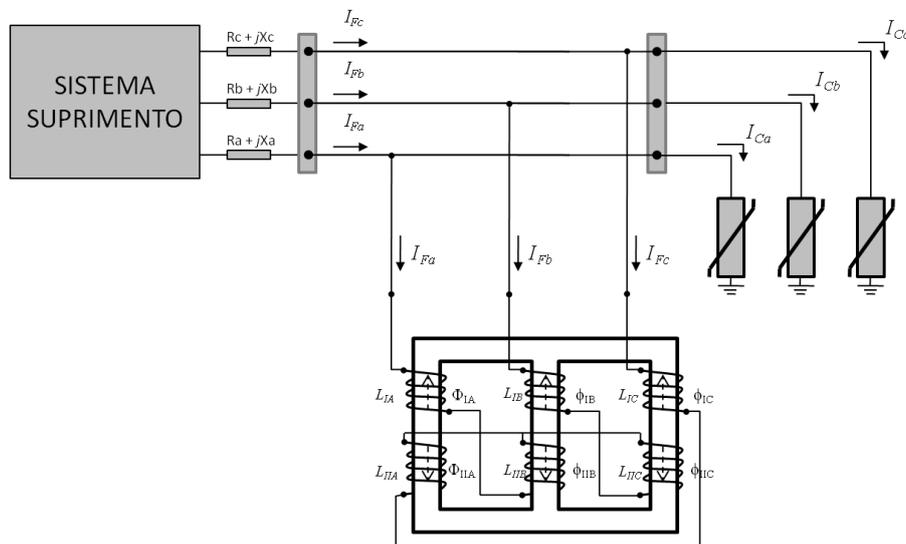


Figura 2.11 - Filtro eletromagnético de sequência zero e seu arranjo típico de instalação.

O objetivo do dispositivo em questão, assim como ao dos filtros ressonantes, é oferecer um caminho de baixa impedância para determinadas ordens harmônicas e para isso se baseia na compensação interna dos harmônicos de ordem três e seus múltiplos. O filtro é constituído, por duas bobinas com o mesmo número de espiras por fase, e dispostas em um núcleo magnético comum, sendo que, os enrolamentos superiores são interligados em zigue-zague aos enrolamentos inferiores.

Será omitida, neste texto, qualquer relação matemática do dispositivo mencionado, podendo ser encontrado em [23]. A Figura 2.12 ilustra os acoplamentos magnéticos entre as três bobinas alimentadas por um sistema trifásico qualquer.

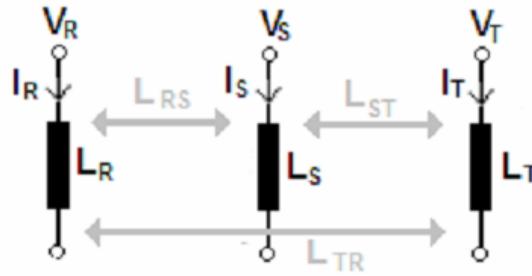


Figura 2.12 - Acoplamentos magnéticos das bobinas do Filtro de Sequência Zero.

Onde:

V_R, V_S, V_T : Tensões trifásicas de Alimentação;

I_R, I_S, I_T : Correntes do Filtro de Sequência Zero;

L_R, L_S, L_T : Indutâncias próprias dos enrolamentos;

L_{RS}, L_{ST}, L_{TR} : Indutâncias mútuas entre os enrolamentos.

2.3.2.5. Filtro Eletromagnético de Sequência Positiva e Negativa

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de sequência positiva e negativa fundamenta-se em um reator a núcleo saturado trifásico [30] e [33]. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação a ser discutido no capítulo três. Brevemente, este equipamento tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não linearidade da curva $B \times H$ do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação. Toda conceituação e desenvolvimento matemático deste dispositivo é o foco principal desta dissertação e será abordado nos próximos capítulos.

2.4. Considerações Finais

Com vistas ao controle das distorções harmônicas, o uso de dispositivos mitigadores é cada vez mais utilizado em plantas industriais, visando manter os índices dessa "poluição" em patamares regulares e, por conseguinte, um nível seguro da

qualidade da energia nos sistemas de suprimento. Portanto, o presente capítulo ilustrou, de maneira sucinta, técnicas encontradas nas práticas de controle e atenuação de correntes harmônicas. Além dessas técnicas conhecidas foi apresentada uma ideia geral do filtro eletromagnético de correntes harmônicas de sequência positiva e negativa, alvo desse estudo. Nos próximos capítulos todos os aspectos operacionais e de projeto serão apresentados, além da comparação entre os ensaios experimentais e as simulações computacionais.

CAPÍTULO III

FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA: FUNDAMENTAÇÃO

3.1. Considerações Iniciais

Como estabelecido no capítulo anterior, uma das formas para a atenuação da injeção de componentes harmônicas de corrente em redes elétricas de suprimento fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos. Este dispositivo produzirá correntes harmônicas de sequência positiva e negativa e após o ajuste nos seus ângulos de fase, as respectivas harmônicas produzidas pelo retificador seis pulsos não controlado serão compensadas.

Desta forma, este capítulo, cerne desta dissertação, abordará os principais aspectos associados ao filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa, utilizado para a atenuação de correntes harmônicas das sequências de fase supramencionadas. Dentre eles:

- A concepção física do dispositivo, contemplando o circuito magnético e o princípio da saturação magnética;
- A maneira como o filtro eletromagnético atenua as harmônicas de corrente de sequência positiva e negativa, a partir de uma carga elétrica definida, qual seja, um retificador trifásico de 6 pulsos não-controlado;

- As etapas a serem seguidas objetivando projetar um filtro de tal natureza, contemplando cálculos vinculados aos parâmetros físicos, magnéticos e elétricos.

3.2. Abordagem Teórica

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de sequência positiva e negativa, conforme Figura 3.1, fundamenta-se em um reator a núcleo saturado trifásico, como abordado na referência [33]. Este, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação, similarmente ao princípio físico a de um filtro ativo. Para isto, o conteúdo gerado deve apresentar a mesma magnitude, porém ângulos de fase opostos ao conteúdo harmônico produzido pela carga não linear a ser compensada, que neste trabalho se refere a uma ponte retificadora trifásica não controlada.

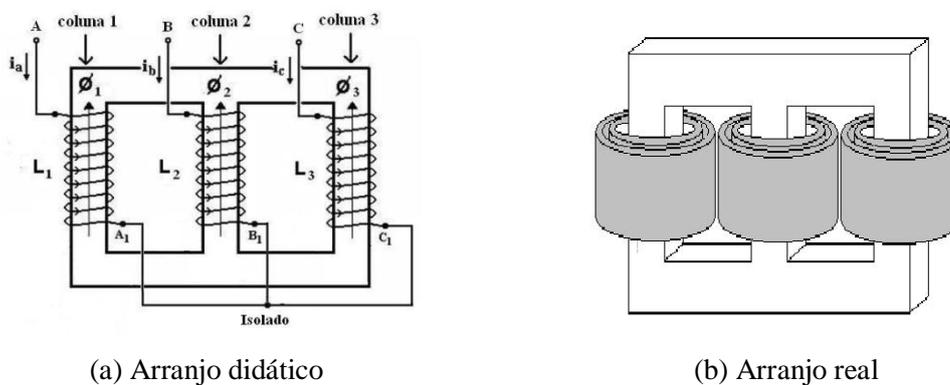


Figura 3.1 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético.

3.2.1. Concepção Física

Construtivamente, este equipamento tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário, conforme Figura 3.1. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não linearidade da curva $B \times H$ do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação [30].

Avançando na direção da topologia do dispositivo eletromagnético utilizado para compensação das componentes harmônicas de sequência positiva e negativa, a Figura 3.2 destaca duas possibilidades. Numa primeira, a conexão é em estrela aterrada, fato este que viabiliza a produção de componentes harmônicas de sequência zero em adição às demais. Na segunda, com a eliminação do aterramento do neutro, apenas as componentes de sequência positiva e negativa passam a existir. Essa segunda configuração fora utilizada no presente estudo.

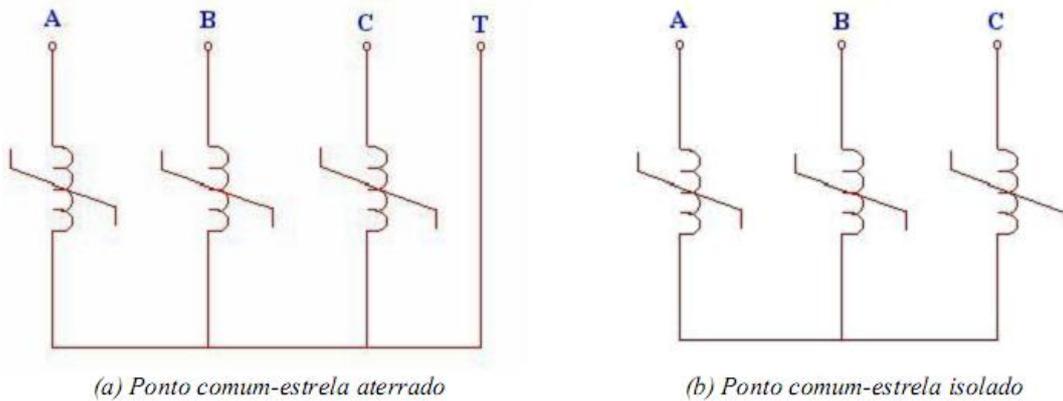


Figura 3.2 - Configuração do Filtro Eletromagnético.

No aspecto do material magnético usa-se, normalmente, aço-silício de grãos orientados laminado a frio que apresenta as seguintes características:

- Alta permeabilidade magnética na região não saturada;
- Efeito desprezível de histerese;
- Baixa permeabilidade na região saturada.

3.2.2. Circuito Magnético e Princípio de Saturação Magnética

O circuito magnético trata-se apenas de uma estrutura que, em sua maior parte, é composta por material magnético de permeabilidade elevada. A presença desse material de alta permeabilidade tende a fazer com que o fluxo magnético seja confinado aos caminhos delimitados pela estrutura, do mesmo modo que, em um circuito elétrico, as correntes são confinadas aos condutores [36].

O circuito magnético do filtro, semelhante ao mostrado na Figura 3.3, é projetado com intuito de que a força magnetomotriz aplicada produza um campo magnético capaz de saturar seu núcleo, o que é alvo de abordagem mais detalhada no item 3.2.3.

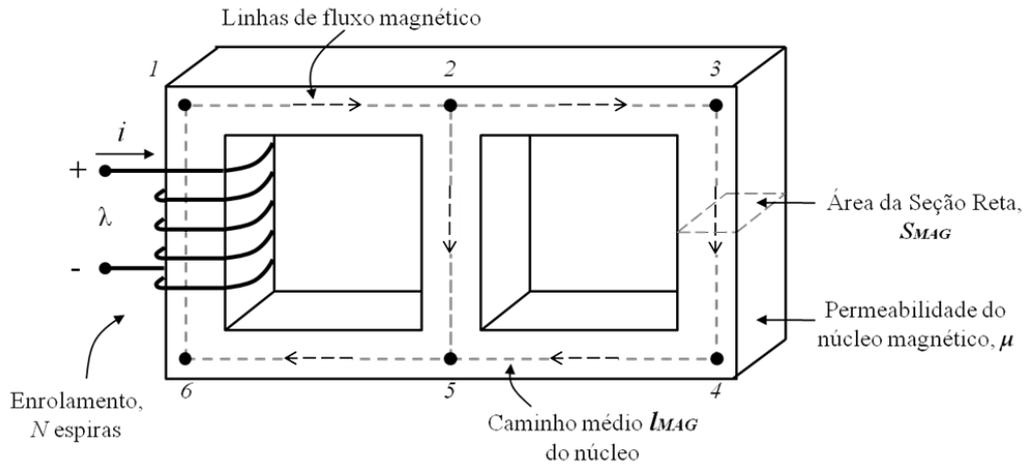


Figura 3.3 - Circuito Magnético simples.

A expressão originada de uma das *Equações de Maxwell* que relaciona a FMM e a intensidade de campo magnético é dada pela equação (3.1).

$$N \cdot I_n = H_n \cdot l_{mag} \quad (3.1)$$

Onde N é o número de espiras e I_n a corrente em ampères. Já no segundo termo, H_n é intensidade de campo magnético em todo percurso de l_{mag} , que possui unidade de metro.

O fluxo magnético Φ que é estabelecido na área da seção reta do núcleo do filtro é dado pela expressão (3.2).

$$\phi = B \cdot S_{MAG} \quad (3.2)$$

Tendo como unidades, weber para a densidade de campo B e metro quadrado para a área da seção reta S_{MAG} .

A intensidade de campo magnético H e a densidade de fluxo magnético B se relacionam através da propriedade do material do núcleo, a permeabilidade magnética μ , conforme a expressão (3.3). Esta, normalmente possui característica não linear a diferentes níveis de excitação, portanto, a representação usual entre as grandezas envolvidas em (3.3) se dá pela curva $B \times H$, conforme a Figura 3.4.

$$\phi = \mu \cdot H \quad (3.3)$$

Em unidades do SI, H é ampère por metro, B em weber por metro quadrado ou Tesla (T) e μ em weber por ampère-espira-metro ou Henry por metro.

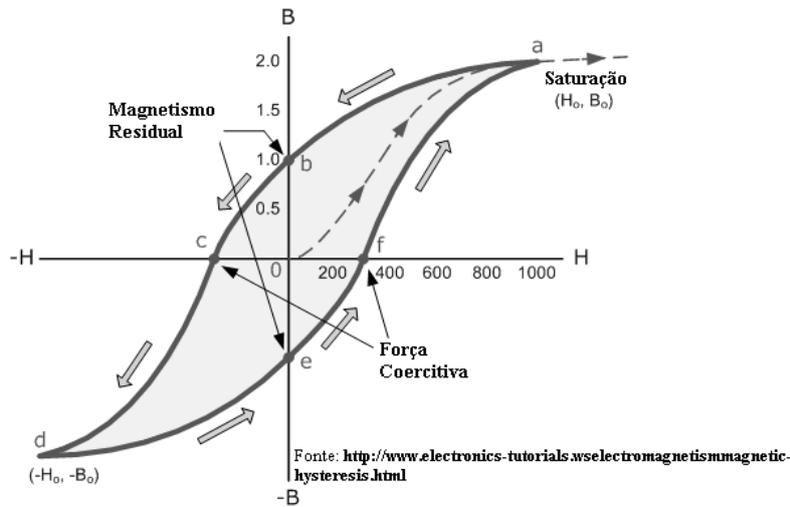
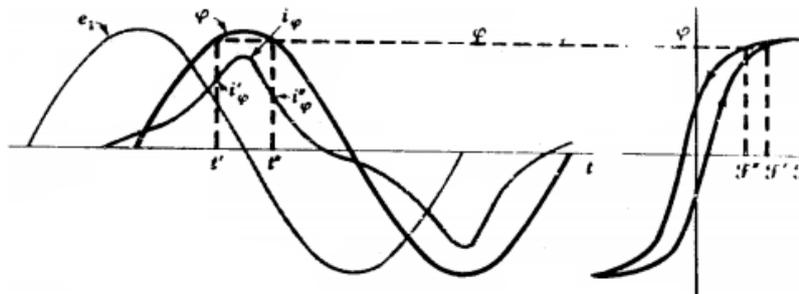


Figura 3.4 - Ciclo de Histerese com curva de magnetização CC.

O princípio de saturação magnética é esteio principal para o entendimento do modo de operação do dispositivo estudado. A seguir constam abordagens teóricas que viabilizam a melhor compreensão do processo de compensação harmônica.

3.2.3. Operação do Filtro Eletromagnético

Submetendo o equipamento a uma tensão de alimentação que produza uma densidade de campo magnético que sature o seu núcleo, a forma de onda da corrente requerida apresenta característica fortemente não linear. A Figura 3.5 ilustra graficamente a forma de onda da corrente de suprimento do filtro para o caso de neutro aterrado, ou seja, onde a forma de onda do fluxo permanece linear, pois isolando o neutro o fluxo magnético é distorcido e a corrente não possuirá componentes de sequência zero.



Fonte: A.E. Fitzgerald; Chales Kingskey Jr.; Alexander Kusko. Máquinas Elétricas

Figura 3.5 - Representação gráfica da corrente requerida pelo filtro.

De acordo com [37], ao decompor esse sinal de corrente pela série de Fourier, obtêm-se componentes harmônicas de ordem apenas ímpares. Estando o dispositivo na configuração estrela isolado, circulará pelo circuito apenas correntes harmônicas de ordem $6k \pm 1$, ou seja, de sequência positiva e negativa.

Diante disso, o processo de compensação se dá quando se manipula essas harmônicas geradas pelo filtro colocando-as em oposição de fase com as produzidas pelo retificador trifásico não controlado [30]. Essa estratégia resulta na eliminação parcial ou total das harmônicas de maior significância geradas pela carga, ou seja, ordens 5 e 7. Vale ressaltar que esse conteúdo harmônico do retificador trifásico não controlado do tipo CSI é constante, considerando a alimentação estática [38], e a intensidade dessas harmônicas respeita as expressões (3.4)-(3.6).

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{CC} \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots \right) \quad (3.4)$$

$$i_b = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{CC} \left(\cos(\omega t - 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t - 120^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t - 120^\circ) + \dots \right) \quad (3.5)$$

$$i_c = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{CC} \left(\cos(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos 7(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{11} \cos 11(\omega t + 120^\circ) + \dots \right) \quad (3.6)$$

Onde:

i_a , i_b e i_c - Correntes trifásicas de linha do retificador trifásico não controlado;

I_{CC} - Corrente no elo contínuo do dispositivo;

Para manipular as harmônicas do filtro e colocá-las em oposição de fase em relação as suas respectivas correntes do retificador, utiliza-se um elemento resistivo em série com o dispositivo de filtragem. A Figura 3.6 exemplifica esse deslocamento forçado que será efetuado no fasor de maior significância, ou seja, o de quinta ordem conforme (3.4) -(3.6). A Figura 3.7 evidencia todo arranjo do processo de filtragem.

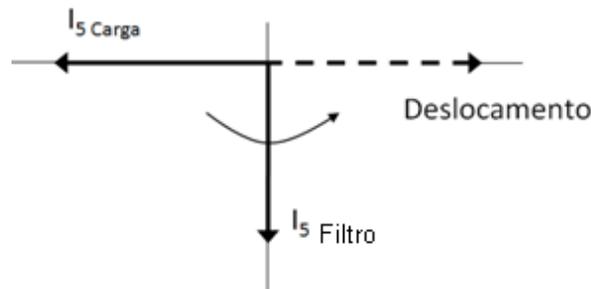


Figura 3.6 - Diagrama fasorial da compensação.

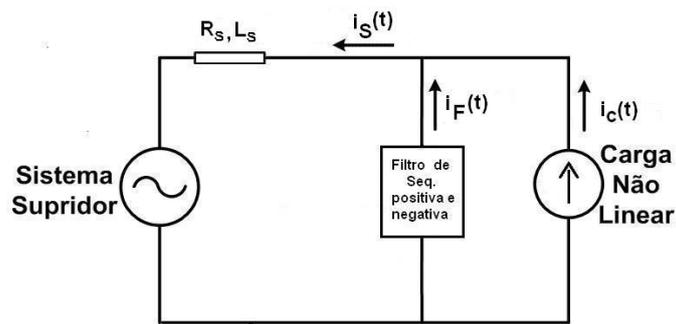


Figura 3.7 - Arranjo elétrico do processo de compensação.

Onde:

R_s, L_s - Impedância do sistema de suprimento;

$i_s(t)$ - Corrente harmônica resultante injetada no sistema de suprimento;

$i_F(t)$ - Corrente harmônica injetada pelo Filtro de Sequência Positiva e Negativa;

$i_C(t)$ - Corrente harmônica proveniente da carga não linear.

Em termos matemáticos, as correntes harmônicas geradas pela ponte retificadora e o filtro eletromagnético são mostradas nas equações (3.7) e (3.8).

$$i_C(t) = i_{C1}(t) + i_{C5}(t) + i_{C7}(t) + i_{C11}(t) + \dots \quad (3.7)$$

$$i_F(t) = i_{F1}(t) + i_{F5}(t) + i_{F7}(t) + i_{F11}(t) + \dots \quad (3.8)$$

Focando a compensação nas harmônicas de quinta e sétima ordem, têm-se as expressões (3.9)-(3.12).

$$I_{C5} = I_{C5} \angle \theta_{C5} \quad (3.9)$$

$$I_{F5} = I_{F5} \angle \theta_{F5} \quad (3.10)$$

$$I_{C7} = I_{C7} \angle \theta_{C7} \quad (3.11)$$

$$I_{F7} = I_{F7} \angle \theta_{F7} \quad (3.12)$$

As expressões (3.13)-(3.16) corroboram com o princípio de compensação esclarecido acima.

$$|I_{C5}| = |I_{F5}| \quad (3.13)$$

$$\theta_{C5} = (\theta_{F5} \pm \pi) \quad (3.14)$$

$$|I_{C7}| = |I_{F7}| \quad (3.15)$$

$$\theta_{C7} = (\theta_{F7} \pm \pi) \quad (3.16)$$

O confronto entre as harmônicas de maior significância é o processo de compensação utilizado pelo dispositivo estudado e mostrado de maneira idealizada na Figura 3.8.

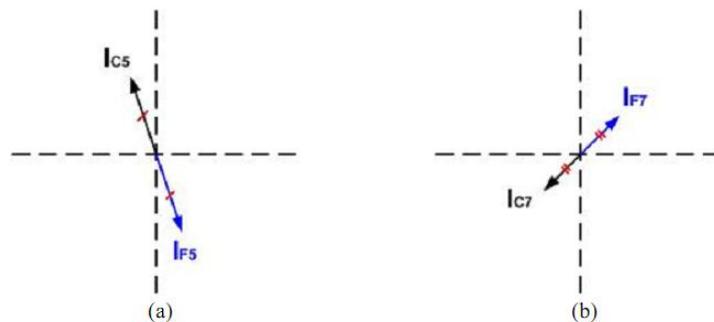


Figura 3.8 - Compensação das correntes harmônicas de quinta e sétima ordem.

3.2.4. Retificador de Seis Pulsos Não-Controlado

Como brevemente apresentado anteriormente, as pontes retificadoras trifásicas são os circuitos de entrada dos conversores de frequência, podendo ser controladas ou não, de acordo com o tipo de inversor. As não controladas são usadas nos inversores alimentados em tensão dos tipos PWM e Multi-estágios, portanto facilmente encontradas em plantas industriais [38].

Reconhecendo, pois, a importância deste dispositivo, o enfoque dessa seção é analisar resumidamente o embasamento matemático desta unidade não controlada, sob ponto de vista de carga não linear que terá seu efeito de harmônicas mitigado pelo dispositivo proposto.

O circuito de potência de um retificador trifásico controlado é apresentado na Figura 3.9. Nesta representação estão omitidos os circuitos de proteção das chaves semicondutoras, os chamados circuitos *snubbers*.

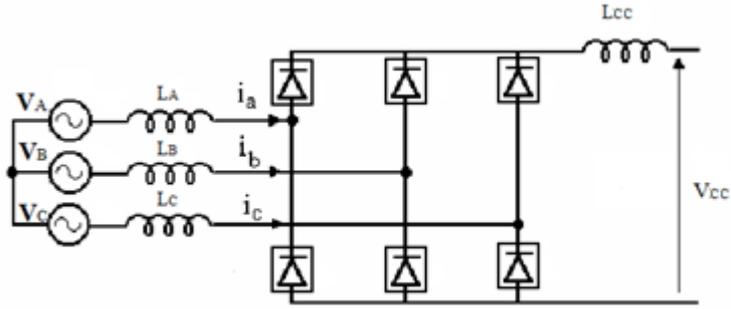


Figura 3.9 - Esquema elétrico da ponte retificadora seis pulsos não controlada.

Através da teoria clássica [15] e [38], é possível mostrar que as formas de ondas das correntes de entrada possuem tendência retangulares, quando se considera a indutância do lado CC de valor infinito e as indutâncias do lado CA nulas e o conteúdo harmônico é dado por (3.17).

$$h = p.k \pm 1 \quad (3.17)$$

Onde:

k - número de pulsos dos conversores;

Algumas formulações básicas (3.18)-(3.20), serão apresentadas para melhor compreensão do funcionamento deste conversor estático [15] e [38].

$$V_{CC} = 1,35 \times V_n \quad (3.18)$$

$$I_{CC} = \frac{P_{ELOcc}}{V_{CC}} \quad (3.19)$$

$$I_C = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{CC} \quad (3.20)$$

Onde:

V_n - Tensão RMS fase-fase do sistema alternado [V];

V_{CC} - Tensão no elo contínuo [V];

I_{CC} - Corrente no elo contínuo [A];

P_{ELOcc} - Potência do dispositivo definida pela carga no elo CC [W];

I_C - Corrente de suprimento do conversor de seis pulsos [A].

A seguir dessa sinopse, será apresentado análises detalhadas de projeto do filtro abordado.

3.3. Abordagem Prática de Projeto

Com vistas à obtenção do modelo matemático proposto como roteiro de projeto para simulação computacional e construção de um protótipo, a teoria utilizada será análoga com a teoria de circuitos magnéticos aplicados em transformadores [40] e reatores a núcleo saturado [1], [33], [30] e [40].

A estratégia traçada para se determinar as diretrizes de cálculo se baseia na obtenção de dados da carga não linear, relação entre essa carga e o filtro e por fim, os cálculos dos seus parâmetros, como ilustrado na Figura 3.10.

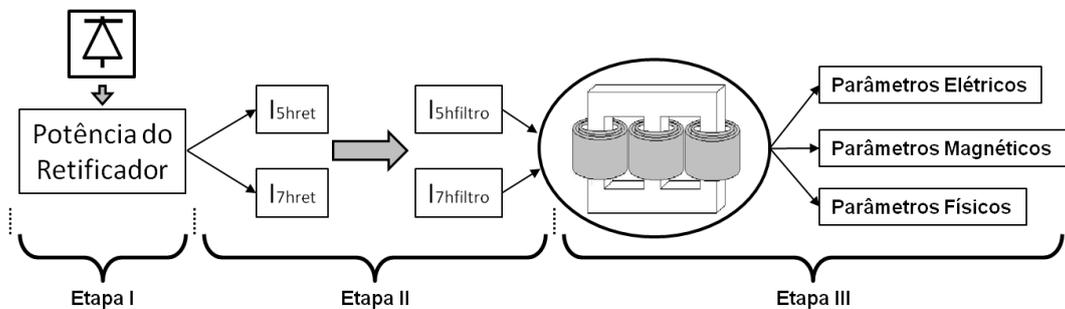


Figura 3.10 - Estratégia traçada para o roteiro de projeto.

Resumidamente, basta conhecer a potência do retificador CSI para se conseguir determinar os parâmetros do filtro para um ambiente virtual e de projeto e construção de protótipos, como apresentado subsequente. A medição, desta maneira, das correntes de linha de um retificador trifásico se tornam essenciais para a obtenção dos parâmetros necessários para a construção do filtro harmônico foco desta dissertação.

3.3.1. Etapa I

A etapa I se caracteriza em conhecer a potência do retificador trifásico, que para este caso, se trata de uma ponte não controlada, como ilustrado na Figura 3.11.

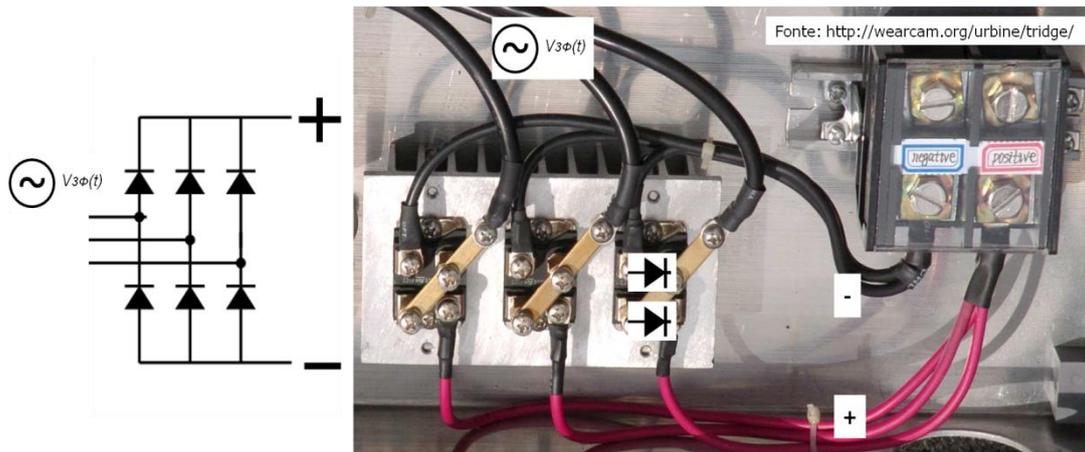


Figura 3.11 - Esquema elétrico e foto da ponte retificadora trifásica não controlada.

Essa potência é o parâmetro de entrada e, de acordo com [38], o comportamento do conteúdo harmônico das correntes solicitadas da fonte é constante para uma alimentação simétrica e balanceada e estão regidas pelas expressões (3.4)-(3.6), oriundas da série de Fourier [15].

Obtendo a decomposição das correntes requeridas da fonte e quantificando suas harmônicas de maiores magnitudes, entra-se na segunda etapa.

3.3.2. Etapa II

A estratégia aqui adotada se trata da relação entre as magnitudes dos fasores das harmônicas de quinta e sétima ordem do filtro e da carga não linear, conforme os conceitos de compensação harmônica do filtro, apresentados na seção 3.2.3 e ilustradas na Figura 3.8.

Assume-se, de maneira idealizada, valores das harmônicas de quinta e sétima ordem do filtro iguais as da carga para posteriormente se aplicar a defasagem nesses fasores do filtro, viabilizando a compensação total ou parcial dessas harmônicas na rede, conforme equações (3.9)-(3.16).

Obtendo as magnitudes das harmônicas do filtro, passa-se para o desenvolvimento matemático dos seus parâmetros.

3.3.3. Etapa III

Visando elucidar todos os cálculos que englobam a estratégia de projeto do dispositivo proposto, serão apresentados os equacionamentos que determinam seus parâmetros elétricos, magnéticos e físicos. A Figura 3.12 resume, graficamente, as grandezas ponderadas.

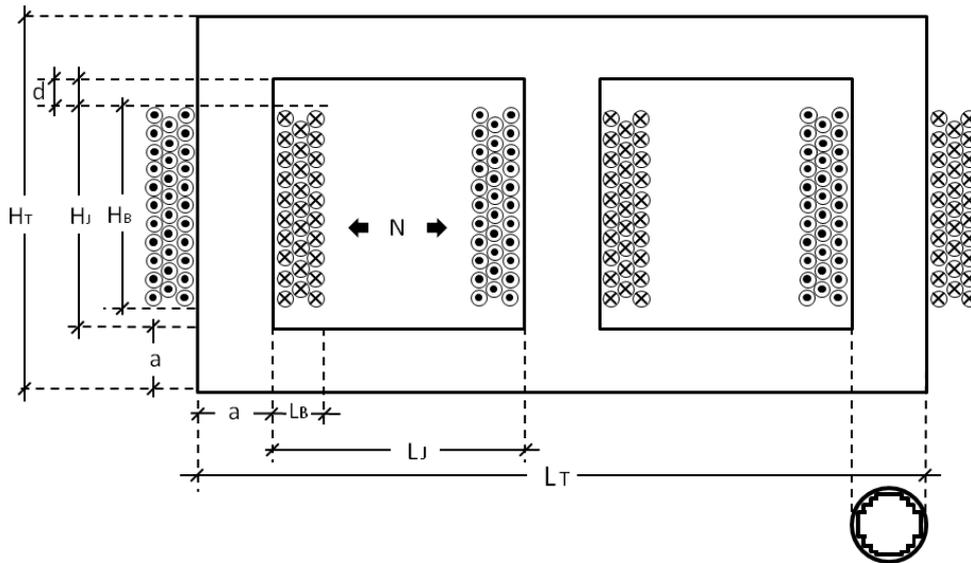


Figura 3.12 - Esquema das dimensões do filtro.

3.3.3.1. Parâmetros Elétricos

A. Corrente Nominal

Como parâmetro elétrico inicial a ser calculado obtêm-se a corrente nominal do dispositivo como (3.21).

$$I_F = \frac{Q_F}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (3.21)$$

Onde:

I_F - Corrente nominal do filtro em [A];

V_n - Tensão do sistema em [kV];

Q_F - Potência elétrica do filtro em [kVAr]. Assume-se a potência como reativa por se tratar de um dispositivo eletromagnético.

B. Resistência do Enrolamento

Utilizando os dados dos cabos e dos cálculos das dimensões físicas pode-se determinar a resistência do enrolamento de acordo (3.22).

$$R_N = \frac{\rho_{cu} \cdot l_{cu}}{S_{FioReal}} \quad (3.22)$$

Onde:

ρ_{cu} - Resistividade do cobre [$\Omega \cdot m/m^2$];

l_{cu} - Comprimento da bobina de cobre [m];

C. Reatância Indutiva do Enrolamento

A expressão (3.23) se baseia inicialmente no cálculo da reatância de dispersão em transformadores, de acordo com [41], porém, para o caso deste trabalho, se considera a dispersão nula devido às características construtivas do filtro.

$$Xp' = 7,9 \cdot \frac{f \cdot \overline{l}_{cu} \cdot N^2}{H_B} K'' \cdot L_B \cdot 10^{-8} \quad (3.23)$$

Onde:

Xp' - Reatância indutiva do filtro [Ω];

\overline{l}_{cu} - Comprimento médio das espiras do enrolamento [cm];

K'' - Coeficiente de correção, dado por: $K'' = 1 - \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L_B}{H_B} \right)$;

L_B - Espessura da bobina em [cm];

H_B - Altura da bobina (Comprimento axial da bobina) em [cm].

D. Seção Mínima do Condutor

Utilizando a densidade de corrente em fios de cobre nu e a corrente nominal do dispositivo obtêm-se, através de (3.24), a seção mínima do condutor.

$$S_{FioMin} = \frac{I_F}{J} \quad (3.24)$$

Onde:

S_{FioMin} - Seção transversal mínima do condutor [mm²];

J - Densidade de corrente [a/mm²].

E. Seção Real do Condutor

A seção real do condutor da bobina deve ser maior igual ao calculado em (3.25).

$$S_{FioReal} > S_{FioMin} \quad (3.25)$$

Onde:

$S_{FioReal}$ - Seção transversal comercial do condutor [mm²].

F. Número de Espiras

Considerando a frequência da tensão de alimentação e sua magnitude juntamente com os dados de densidade de campo e a área do núcleo que será saturada, calcula-se, de acordo (3.26), o número de espiras que gerará a força magnetomotriz que levará o núcleo a sua saturação projetada.

$$N = \frac{V_N}{4,44 \cdot f \cdot S_{MAG} \cdot B} \quad (3.26)$$

Onde:

N - Número de espiras do enrolamento [esp];

B - Densidade de campo magnético [T];

S_{MAG} - Seção geométrica do núcleo [cm²].

3.3.3.2. Parâmetros Magnéticos

A. Seção Magnética

Lançando mão de recursos matemáticos aplicados em projetos de transformadores [41], adaptou-se as devidas expressões e obteve-se (3.27) que determina a área da seção reta do núcleo do filtro.

$$S_{MAG} = K_L \cdot \sqrt{\frac{\frac{Q_F}{2}}{3f}} \quad (3.27)$$

Onde:

S_{MAG} - Seção magnética [cm²];

K_L - Coeficiente do núcleo laminado;

f - Frequência do sistema [Hz].

B. Seção Geométrica

Considerando o fator de enchimento encontra-se a seção geométrica desse núcleo por meio de (3.28).

$$S_{MAG}' = \frac{S_{MAG}}{K_{Ench}} \quad (3.28)$$

Onde:

S_{MAG}' - Seção geométrica do núcleo [cm²];

K_{Ench} - Coeficiente de enchimento do núcleo;

C. Determinação da Curva de Saturação do Filtro (curva I x λ)

Para a obtenção da curva de corrente versus fluxo concatenado do filtro (3.29)-(3.30) é necessário conhecer a curva de saturação da chapa de aço silício de 0,3mm e os dados construtivos do dispositivo.

$$I_n = \frac{H_n \times l_{mag}}{N} \quad (3.29)$$

$$\lambda_n = N \times B_n \times S_{mag} \quad (3.30)$$

Onde:

H_n - Intensidade de campo magnético da chapa de aço silício de 0,3mm [A.esp/m];

l_{mag} - Comprimento magnético médio [m];

B_n - Densidade do campo magnético da chapa de aço-silício de 0,3mm [T];

λ_n - Fluxo concatenado [Wb].

D. Comprimento do Caminho Magnético

O comprimento magnético médio que o fluxo percorrerá no núcleo é dado por (3.31) e leva em consideração a força magnetomotriz e a intensidade de campo magnético em seu núcleo.

$$l_{MAG} = \frac{N \cdot I_F}{H} \cdot 100 \quad (3.31)$$

Onde:

l_{MAG} - Comprimento magnético médio do núcleo [m];

H - Intensidade do campo magnético [A.esp/m];

3.3.3.3. Parâmetros Físicos

Para os cálculos dos parâmetros físicos, baseou-se nas expressões que determinam as dimensões do núcleo de um transformador com refrigeração de ar natural [41].

A. Largura da Coluna

$$a = \sqrt{S_{MAG}} \quad (3.32)$$

Onde:

a - Largura da coluna [cm];

B. Largura da Janela

$$L_J = \frac{a}{2} \quad (3.33)$$

Onde:

L_J - Largura da janela [cm];

C. Altura do Cobre na Janela

$$H_B = l_{MAG} - 2 \cdot (a + L_J) \quad (3.34)$$

Onde:

H_B - Altura do Cobre na Janela [cm];

D. Altura da Janela

$$H_J = H_B + 2 \cdot d \quad (3.35)$$

Onde:

H_J - Altura da janela [cm];

d - Distancia entre a bobina e a travessa [cm].

E. Área do Cobre na Janela

$$S_{cu_j} = N \cdot S_{FioReal} = L_B \cdot H_B \quad (3.36)$$

Onde:

S_{cu_j} - Área utilizada pelo cobre na janela [mm²];

L_B - Largura do cobre na janela [mm];

H_B - Altura do cobre na janela [mm].

F. Largura do Cobre na Janela

$$L_B = \frac{S_{CUJ}}{H_B} \quad (3.37)$$

Onde:

L_B - Largura do cobre na janela [cm];

G. Comprimento da Bobina

$$l_{cu} = 1,1 \cdot N \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_{MAG}} \quad (3.38)$$

Onde:

l_{cu} - Comprimento total da bobina [cm].

H. Largura Total

$$L_T = 2 \cdot L_J + 3 \cdot a \quad (3.39)$$

Onde:

L_T - Largura total do núcleo [cm];

I. Altura Total

$$H_T = 2 \cdot a + H_J \quad (3.40)$$

Onde:

H_T - Altura total do núcleo [cm];

Pelo equacionamento apresentado, a fundamentação matemática se baseia na analogia entre dispositivos de tecnologia magnética, como transformadores e reatores a núcleo saturado, e isso já é alvo amplamente pesquisado no meio científico, possuindo boa concordância nos resultados. Além disso, esse desenvolvimento é importante para

se determinar os parâmetros necessários para a simulação computacional, tema abordado no capítulo IV.

3.4. Considerações Finais

Devido a necessidade em apresentar equacionamento que fundamenta-se a operacionalidade do filtro, o presente capítulo foi estruturado em apresentar puramente essa bagagem matemática sendo que no capítulo subsequente todo esse conteúdo é abordado em um caso prático de dimensionamento seguindo uma lógica cronológica de cálculos.

Vale acrescentar que foi explanado também todo princípio que fundamenta a operacionalidade do dispositivo, ou seja, as equações magnéticas oriundas das expressões de *Maxwell*.

Também foram resumidas características do comportamento e bases matemáticas da carga não linear alvo da filtragem, qual seja, o retificador trifásico a diodos do tipo CSI.

Como dito, o capítulo seguinte trará resultados experimentais a serem comparados com resultados computacionais, estes obtidos através do dimensionamento do filtro eletromagnético através das equações oriundas deste capítulo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS COMPUTACIONAIS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS

4.1. Considerações Iniciais

Para que haja avaliação de desempenho de toda teoria de filtragem de harmônicos de sequência positiva e negativa, faz-se necessário realizar um estudo computacional utilizando a modelagem no domínio do tempo. Em paralelo, será realizado testes laboratoriais usando um protótipo do filtro eletromagnético e, por fim, será comparado os resultados obtidos nos dois casos.

Para as realizações das simulações, fez-se uso do *software ATPDraw*, amplamente conhecido no universo científico. Diante disso e por questões práticas, maiores detalhes sobre esse programa serão omitidas nessa dissertação, podendo ser exploradas em [42].

4.2. Estratégia de Simulação

Inicialmente, cabe ressaltar que a utilização do simulador computacional para fins de avaliações de desempenho de dispositivos eletromagnéticos modelados consiste em uma estratégia de simulação já contemplada em outros trabalhos [39] e [40].

Esse simulador se mostra bastante interessante levando a resultados esclarecedores sobre as funcionalidades do filtro, possuindo uma vasta biblioteca de componentes lineares e não lineares. Estes recursos permitem representar os dispositivos com parâmetros concentrados ou distribuídos e componentes não lineares, tais como: transformadores, reatores, filtros, etc.

A criação de um componente no *ATPDraw* a partir de um elemento já existente na biblioteca do programa é possível através da rotina TACS (*Transient Analysis Control System*).

Como abordado no capítulo III, o filtro se baseia na tecnologia magnética empregada no reator a núcleo saturado e, contudo, para a criação do dispositivo virtual, primeiramente utilizou-se esse como componente original (reator *Twin Triple*). A Figura 4.1 ilustra o esquema real e o implementado no ATP desse dispositivo.

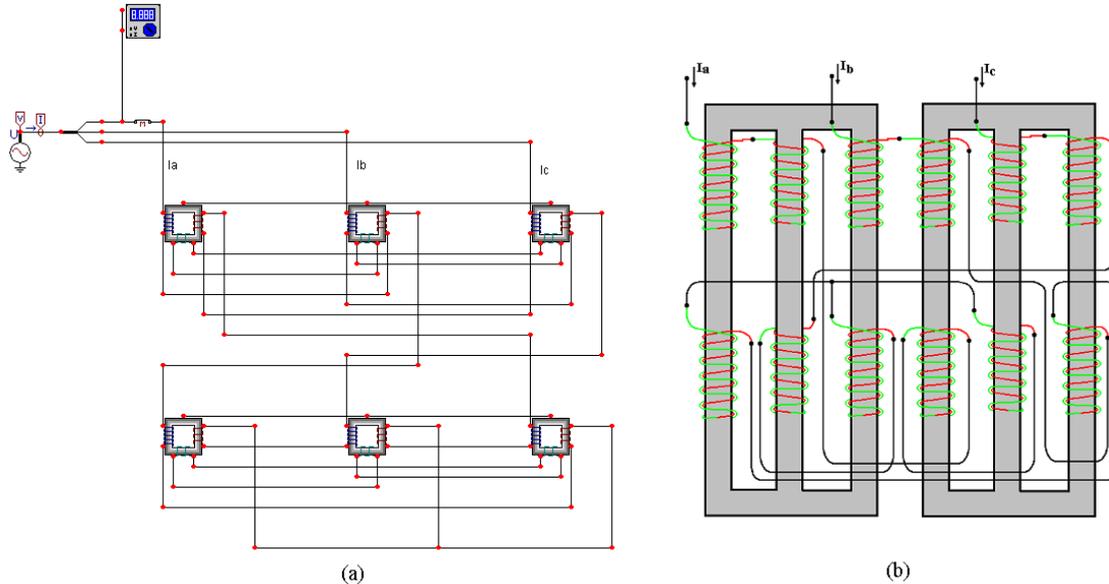


Figura 4.1 - (a) Esquema do Reator *Twin-Triple* implementado no ATPDraw. (b) Esquema elétrico e magnético do reator.

Devido ao fato do reator *Twin-Triple* não ser o foco desta dissertação, maiores detalhes do seu funcionamento não serão abordados, podendo os mesmos serem encontrados em [39], [33] e [40].

A estratégia utilizada na modelagem do filtro segue o raciocínio de utilizar apenas uma bobina e um núcleo por fase, ao contrário o reator que utiliza dois núcleos, principal e o auxiliar, e ainda duas bobinas com polaridades magnéticas invertidas. Essas duas bobinas por fase com polos magnéticos inversos visam a diminuição do conteúdo harmônico gerado pelo reator, o que não é foco no filtro aqui abordado. A Figura 4.2 ilustra o filtro harmônico trifásico no *ATPDraw* adaptado ao reator citado.

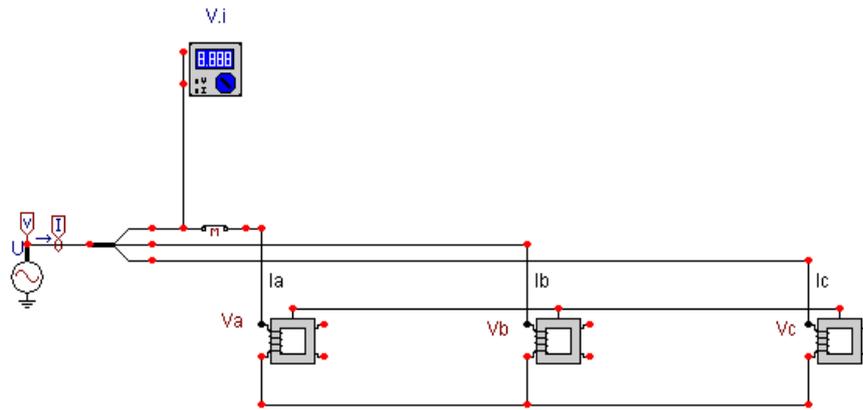


Figura 4.2 - Filtro eletromagnético implementado no *ATPDraw*.

4.2.1. Modelagem do filtro no *ATPDraw*

Esta seção é dedicada à explanação dos métodos utilizados na modelagem do filtro na plataforma ATP. Sabe-se, de acordo com o item anterior e demais referências [30] e [33], que o filtro é baseado nas características do reator a núcleo saturado (RNS), portanto, a modelagem realizada tem como ponto de partida o entendimento do reator implementado no ATP.

De forma sucinta, o RNS é criado a partir de alterações realizadas na modelagem do transformador trifásico saturável encontrado na biblioteca do programa. Após essas alterações, o novo elemento criado segue toda fundamentação matemática do reator, oferecendo resultados coerentes com a teoria [1].

A modelagem do filtro foi realizada de maneira análoga. Utilizou-se o modelo do reator a núcleo saturado para, após as adequações, obter o bloco do filtro eletromagnético.

Reduziu-se o número de enrolamentos do RNS, que originalmente são dois por fase para um por fase, ilustrados na Figura 4.3 nós 1 e 2. O nó "Saturação" é fruto do componente original que gerou o RNS e por seguinte o filtro. Esse nó é necessário para poder incluir os dados da curva de saturação calculada. Os nós remanescentes e sem nomenclatura são desnecessários e frutos dos nós "Fechamento em Delta do *Twin Triple*".

As alterações realizadas viabilizou compatibilizar os dados de entrada informados pelo usuário, visto que o reator, como já mencionado, possui uma finalidade

diferente ao do filtro [42][43]. A Figura 4.3 ilustra as diferenças entre os dois blocos (monofásicos).



Figura 4.3 - (a) Bloco original do RNS. (b) Bloco desenvolvido do filtro.

Os dados calculados necessários na simulação do filtro obedecem o equacionamento apresentado na seção anterior, e estão apresentados em sequência.

Inicialmente, o parâmetro de entrada para todo dimensionamento do filtro, como abordado no capítulo III, se trata da potência da carga retificadora. Para tal, foi considerada a potência do retificador de acordo (4.1) e a tensão de alimentação de acordo (42).

$$P_{RET} = 4,5 \text{ [kW]} \quad (4.1)$$

$$V_{AC} = 220 \text{ [V]} \quad (4.2)$$

Onde:

- P_{RET} - Potência elétrica do retificador;
- V_{AC} - Tensão de alimentação.

Assim, é possível determinar a corrente de suprimento e por seguinte suas harmônicas que serão consideradas no estudo [75], conforme (4.3)-(4.5).

$$I_C = 11,8 \text{ [A]} \quad (4.3)$$

$$I_{5^aC} = 2,3 \text{ [A]} \quad (4.4)$$

$$I_{7^aC} = 1,7 \text{ [A]} \quad (4.5)$$

Onde:

- I_C - Corrente eficaz da carga não linear;

- $I_{5^aC}; I_{7^aC}$ - Correntes harmônicas de quinta e sétima ordem da carga não linear.

De posse desses valores de correntes da carga não linear, adota-se, de maneira idealizada, magnitudes iguais para as correspondentes correntes harmônicas do filtro. Estas serão responsáveis pela compensação se baseando nas expressões (4.6) e (4.7).

$$I_{5^aF} = I_{5^aRET} = 2,3[A] \quad (4.6)$$

$$I_{7^aF} = I_{7^aRET} = 1,7[A] \quad (4.7)$$

Onde,

- $I_{5^aF}; I_{7^aF}$ - Correntes harmônicas de quinta e sétima ordem do filtro.

Após essa consideração, faz-se uso da analogia com as correntes de magnetização de transformadores [40], [36] e de dispositivos eletromagnéticos saturados [33], [30] e [40] e consegue-se determinar a corrente nominal do filtro através de (4.8), tendo em vista que as ordens harmônicas com maiores amplitudes são as de 5^a e 7^a ordem.

$$I_F = \frac{\sqrt{I_{5^aF}^2 + I_{7^aF}^2}}{35\%} = \frac{\sqrt{(2,3)^2 + (1,7)^2}}{0,35} = 8,2[A] \quad (4.8)$$

Onde:

I_F - Corrente nominal do filtro em [A];

A potência do filtro se dá em (4.9).

$$Q_F = \sqrt{3} \cdot V_{AC} \cdot I_F = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 8,2 = 3,2[kVAr] \quad (4.9)$$

Onde:

Q_F - Potência elétrica do filtro em [kVAr]. Assume-se a potência como reativa por se tratar de um dispositivo eletromagnético.

De acordo com [40][41], a seção magnética do núcleo é calculada de acordo com a equação (4.10).

$$S_{MAG} = K_L \cdot \sqrt{\frac{\frac{Q_F}{2}}{3}} = 6,61 \cdot \sqrt{\frac{\frac{3,2 \times 1000}{3}}{60}} = 19,7 \text{ cm}^2 \quad (4.10)$$

A seção geométrica do núcleo pode ser encontrada de acordo (4.11).

$$S_{MAG}' = S_{MAG} \cdot K_{Ench} = 19,7 \cdot 1,1 = 21,7 \text{ cm}^2 \quad (4.11)$$

Seguindo com os cálculos, o número de espiras necessário para se obter a densidade de fluxo magnético que levará o núcleo a sua saturação é encontrado em (4.12). O valor atribuído para a densidade de campo magnético é ligeiramente sobredimensionado visando conseguir condições de deformação da onda de corrente do filtro que resultam melhor eficácia na compensação fasorial [40].

$$N = \frac{V_{AC}}{4,44 \cdot f \cdot S_{MAG}' \cdot B} = \frac{220 / \sqrt{3}}{4,44 \times 60 \times 21,7 \times 10^{-4} \times 2,7} = 81,4 \text{ esp} \quad (4.12)$$

O comprimento magnético que o fluxo de campo magnético irá percorrer é dado por (4.13). Vale ressaltar que o valor de intensidade de campo tem que ser suficiente para se trabalhar na região de saturação da curva do núcleo.

$$l_{MAG} = \frac{N \cdot I_F \cdot 1000}{H} = \frac{81,4 \cdot 8,2}{4007,3} \cdot 1000 = 166,6 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Utilizando-se da corrente nominal calculada em (4.8), e atribuindo valor prático de densidade de corrente para fios de cobre nu [40], obtêm-se a seção mínima do condutor da bobina, de acordo (4.14).

$$S_{FioMin} = \frac{I_F}{J} = \frac{8,2 \text{ A}}{2,2 \text{ A/mm}^2} = 3,72 \text{ mm}^2 \quad (4.14)$$

Utilizando valores comerciais de fios de cobre [45], têm-se, de acordo (4.15) a seção real do condutor da bobina.

$$\boxed{4,15 \text{ mm}^2} > 3,72 \text{ mm}^2 \quad (4.15)$$

Para chegar aos cálculos elétricos da bobina, necessita-se da sua dimensão física, ou seja, seu comprimento total, conforme (4.16).

$$l_{cu} = 1,1 \cdot N \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_{MAG}'} = 1,1 \cdot 81,4 \cdot \sqrt{4\pi \cdot 21,7} = 1478,60 \text{ cm} \quad (4.16)$$

Possuindo seu comprimento médio de acordo (4.17).

$$\bar{l}_{cu} = 1,1 \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_{MAG}} = 1,1 \cdot \sqrt{4\pi \cdot 21,7} = 18,16 \text{ cm} \quad (4.17)$$

Outros parâmetros físicos serão calculados. A seguir os dados de coluna e janela do núcleo serão apresentados em (4.18)-(4.25).

Largura da coluna.

$$a = \sqrt{S_{MAG}} = \sqrt{21,7} = 4,7 \text{ cm} \quad (4.18)$$

Largura da janela.

$$L_j = \frac{a}{2} = \frac{4,7}{2} = 2,35 \text{ cm} \quad (4.19)$$

Altura do cobre na janela.

$$H_B = l_{MAG} - 2 \cdot (a + L_j) = 183 - 2 \cdot (47 + 23,5) = 42 \text{ mm} \quad (4.20)$$

Altura da janela.

$$H_j = H_B + 2 \cdot d = 42 + 2 \cdot 20 = 82 \text{ mm} \quad (4.21)$$

Área do cobre na janela.

$$S_{cu_j} = N \cdot S_{FioReal} = 81,4 \cdot 4,15 = 337,81 \text{ mm}^2 \quad (4.22)$$

Largura do cobre na janela.

$$L_B = \frac{S_{cu_j}}{H_B} = \frac{337,81}{42} \cong 8,04 \text{ mm} \quad (4.23)$$

Largura total.

$$L_T = 2 \cdot L_j + 3 \cdot a = 2 \cdot 23,5 + 3 \cdot 47 = 188 \text{ mm} \quad (4.24)$$

Altura total.

$$H_T = 2 \cdot a + H_j = 2 \cdot 47 + 84 = 178 \text{ mm} \quad (4.25)$$

Após esses parâmetros físicos, pode-se chegar aos dados elétricos da bobina, os quais serão utilizados na simulação computacional apresentada logo adiante. A resistência da bobina é dada por (4.26).

$$R_N = \frac{\rho_{cu} \cdot l_{cu}}{S_{FioReal}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-8} \cdot 1478,6 \cdot 10^{-2}}{4,15 \cdot 10^{-6}} = 0,0627 \Omega \quad (4.26)$$

A reatância indutiva do enrolamento é calculada em (4.27).

$$Xp' = 7,9 \cdot \frac{f \cdot \overline{l_{cu}} \cdot N^2}{H_B} K'' \cdot L_B \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot \frac{60 \cdot 18,16 \cdot 81,4^2}{4,2} 0,97 \cdot 0,804 \cdot 10^{-8} \quad (4.27)$$

$$Xp' = 0,106 \Omega$$

Onde o fator de correção K'' é determinado por (4.28).

$$K'' = 1 - \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L_B}{H_B} \right) = 1 - \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{0,804}{4,2} \right) = 0,97 \quad (4.28)$$

Os dados calculados estão resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tabela exemplificada do projeto de um filtro.

DADOS DE ENTRADA PRINCIPAIS			CURVA MAGNETIZAÇÃO ($\lambda \times I$)	
Potência Reativa (Q)	[kVAr]	3,2	Curva Calculada	
Tensão Nominal (U)	[kV]	0,22	Corrente (I)	Fluxo Concatenado (λ)
Frequência (f)	[Hz]	60	[A]	[Wb]
Corrente (I)	[A]	8,20	0,031	0,036
CÁLCULO DAS GRANDEZAS PRINCIPAIS			0,051	0,0716
Dados dos Enrolamentos			0,082	0,1431
Número Espiras Enrolamento (Np)	[espiras]	81,4	0,110	0,2147
Resistência Enrolamento (Rp)	[Ω]	0,0627	0,146	0,2505
Indutância Enrolamento (Lp)	[mH]	0,281	0,297	0,2863
Tensão na bobina	[kV]	0,127	0,630	0,3042
Dados do Núcleo			4,379	0,3310
Seção Magnética Núcleo (Sm)	[cm ²]	21,7	34,315	0,3579
Largura da Coluna (Lc)	[mm]	47	138,749	0,3758
Largura da Janela (Lj)	[mm]	23,5		
Altura da Janela (Hj)	[mm]	82		

Com os dados calculados pela Tabela 4.1 consegue-se simular o filtro trifásico. Para essa simulação foi necessário modelar, simplificada, uma ponte retificadora trifásica não controlada com uma carga resistiva.

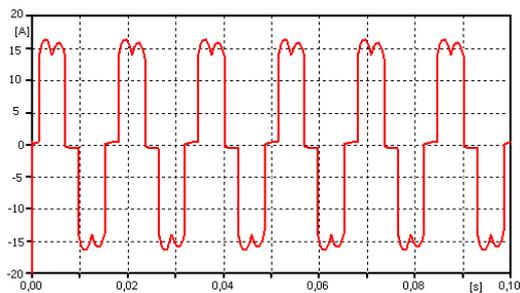
4.2.2. Resultados das Simulações

Visando validar todo o desenvolvimento matemático, o modelo implementado em plataforma virtual foi simulado no *ATPDraw* [42]. Os dados imputados para simulação foram baseados em valores comerciais de potência da carga não linear e estão resumidos na Tabela 4.2.

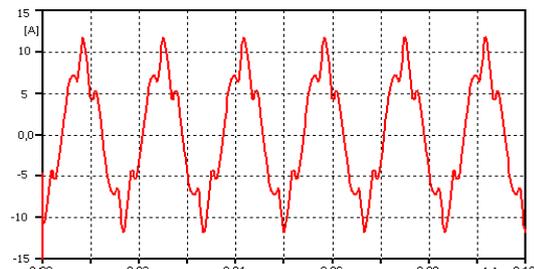
Com isso, utilizou-se a estratégia ilustrada na Figura 3.10 e obtiveram-se as formas de ondas apresentadas na Figura 4.4.

Tabela 4.2 - Dados do sistema simulado.

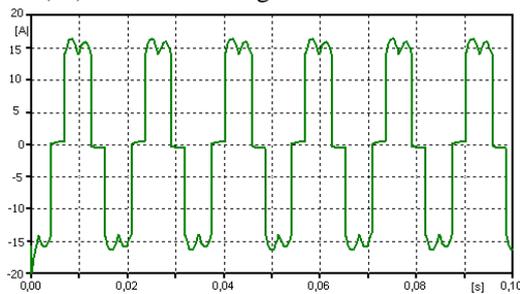
DADOS DO RETIFICADOR			DADOS DO FILTRO		DADOS DA FONTE		
Potência	[kW]	4,5	Vide Tabela 4.1		Potência	[kVA]	Barramento Infinito
Tensão Entrada (Vac)	[V]	220	ELEMENTO DEFASADOR		Tensão Nominal (U)	[kV]	0,22
Tensão Saída (Vdc)	[kV]	297			Frequência (f)	[Hz]	60
Corrente (Iac)	[A]	11,80	Resistência [Ω]	6			



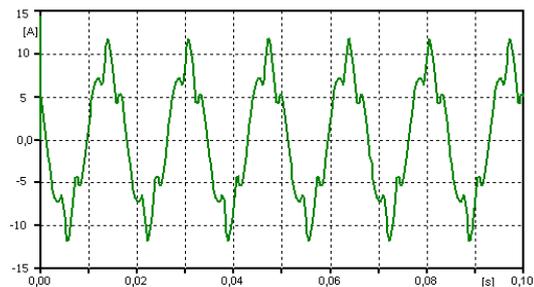
(a1) Corrente da carga não linear - Fase A



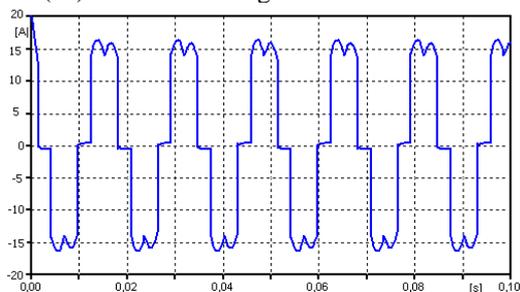
(b1) Corrente do filtro - Fase A



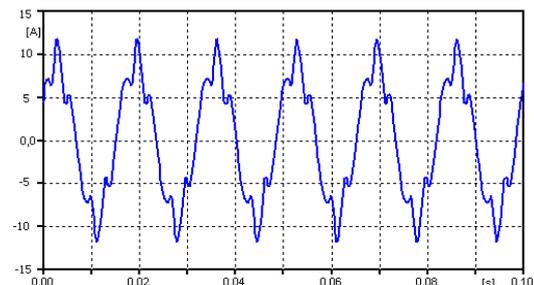
(a2) Corrente da carga não linear - Fase B



(b2) Corrente do filtro - Fase B



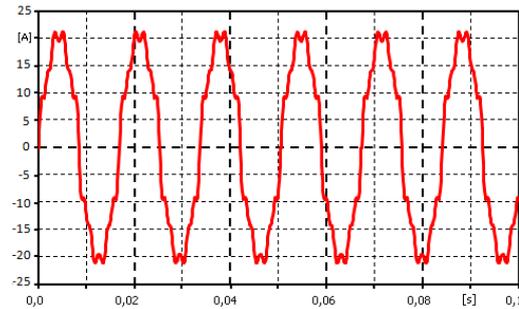
(a3) Corrente da carga não linear - Fase C



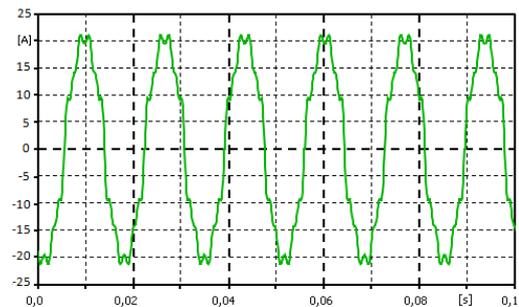
(b3) Corrente do filtro - Fase C

Figura 4.4 - Confronto entre as formas de onda das correntes da carga não linear e filtro.

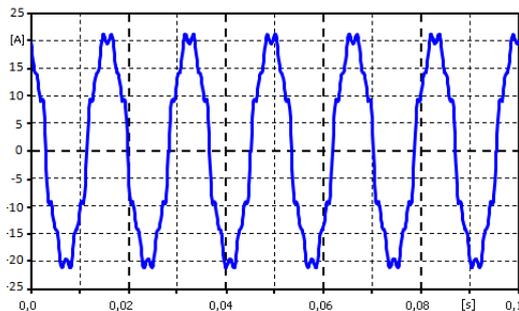
Como resultado da interação entre os fasores das enésimas componentes harmônicas das correntes do filtro e retificador, obtêm-se, através do processo de compensação harmônica idealizado, uma forma de onda da corrente no sistema supridor mais "limpa", ou seja, com menor conteúdo harmônico. A Figura 4.5 evidencia o resultado gráfico dessa interação.



(c1)- Corrente na fonte - Fase A



(c2)- Corrente na fonte - Fase B



(c3)- Corrente na fonte - Fase C

Figura 4.5 - Corrente após as devidas compensações harmônicas.

Objetivando expor os resultados numéricos desses gráficos, a Tabela 4.3 resume os índices de distorções dos sinais de correntes da carga, do filtro e da fonte. As análises compreendem somente os resultados computacionais, sendo informados, na sequência, os resultados laboratoriais.

Tabela 4.3 - Valores em ampères das correntes fundamentais e harmônicas da simulação.

Corrente Carga Não Linear					Corrente Filtro				Corrente Fonte			
<i>h</i>	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média
1	11,25	10,68	10,76	10,90	8,33	8,07	8,32	8,24	15,36	15,48	15,10	15,31
3	0,14	0,11	0,03	0,09	0,54	0,36	0,45	0,45	0,43	0,66	0,57	0,55
5	2,71	2,69	2,63	2,68	2,39	2,50	2,45	2,45	0,39	0,38	0,56	0,45
7	1,07	0,94	1,01	1,01	0,86	1,11	0,99	0,99	0,66	1,00	0,95	0,87
9	0,05	0,10	0,02	0,06	0,18	0,17	0,18	0,18	0,14	0,19	0,08	0,14
11	0,95	0,95	0,91	0,94	0,16	0,28	0,22	0,22	0,78	0,68	0,67	0,71
13	0,68	0,57	0,62	0,62	0,14	0,15	0,15	0,15	0,54	0,60	0,61	0,58
15	0,02	0,09	0,02	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02	0,07	0,07	0,05
17	0,56	0,59	0,55	0,57	0,02	0,03	0,02	0,02	0,55	0,56	0,55	0,56
19	0,48	0,42	0,43	0,44	0,01	0,02	0,01	0,01	0,45	0,47	0,43	0,45
21	0,02	0,07	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,03
23	0,41	0,44	0,38	0,41	0,02	0,02	0,02	0,02	0,39	0,40	0,43	0,41
25	0,37	0,32	0,40	0,34	0,02	0,01	0,01	0,01	0,32	0,32	0,32	0,32
Irms	11,87	11,53	11,92	11,77	8,37	8,05	8,22	8,22	15,44	15,58	15,21	15,41

O resumo dos percentuais de distorções das correntes seguem na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Percentuais de distorções das correntes do circuito simulado.

Corrente Carga Não Linear					Corrente Filtro				Corrente Fonte			
<i>h</i>	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	29,5%	30,7%	29,2%	29,8%	31,4%	34,5%	32,4%	32,8%	11,6%	11,6%	11,2%	11,5%
Ih5	22,8%	23,2%	23,3%	23,1%	28,7%	31,0%	29,4%	29,7%	3,7%	4,2%	4,7%	4,2%
Ih7	13,8%	14,6%	12,3%	13,6%	9,7%	12,4%	8,8%	10,3%	5,9%	4,2%	3,2%	4,4%
Ih11	8,3%	8,6%	8,6%	8,5%	3,5%	4,2%	3,9%	3,9%	6,2%	6,4%	5,9%	6,2%
Ih13	5,0%	4,9%	4,6%	4,8%	3,3%	3,6%	2,1%	3,0%	2,6%	2,4%	3,0%	2,7%
Ih17	4,9%	5,6%	5,1%	5,2%	0,2%	0,4%	0,3%	0,3%	3,6%	3,6%	3,7%	3,6%
Ih19	4,2%	3,9%	3,9%	4,0%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	2,9%	3,1%	2,9%	3,0%
Ih23	3,6%	4,2%	3,5%	3,8%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	2,6%	2,6%	2,8%	2,7%
Ih25	3,3%	3,0%	3,0%	3,1%	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	2,1%	2,0%	2,1%	2,1%

Conforme explorado no capítulo III e observados os resultados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, pode-se constatar que a teoria envolvida é válida no ambiente virtual, ou seja, as correntes harmônicas, principalmente a de quinta ordem, geradas pelo filtro, compensaram as respectivas correntes da carga. Os índices de maior redução foram, exatamente, os de maiores significância, ou seja, a quinta harmônica. Portanto, como contexto geral, a distorção da carga que era de aproximadamente 30%, reduziu, com a ação do filtro, para 11,5%.

Visando uma análise prática, as Figuras 4.6 e 4.7 ilustram, graficamente, o comportamento dos fasores de quinta e sétima ordem da carga e filtro.

Objetivando ilustrar o comportamento fasorial completo do estudo de compensação harmônica, serão apresentados os diagramas fasoriais confrontantes entre as harmônicas de sequência positiva e negativa da carga não linear em questão e do filtro eletromagnético. Caso simulado e experimental.

4.2.2.1. Caso Computacional

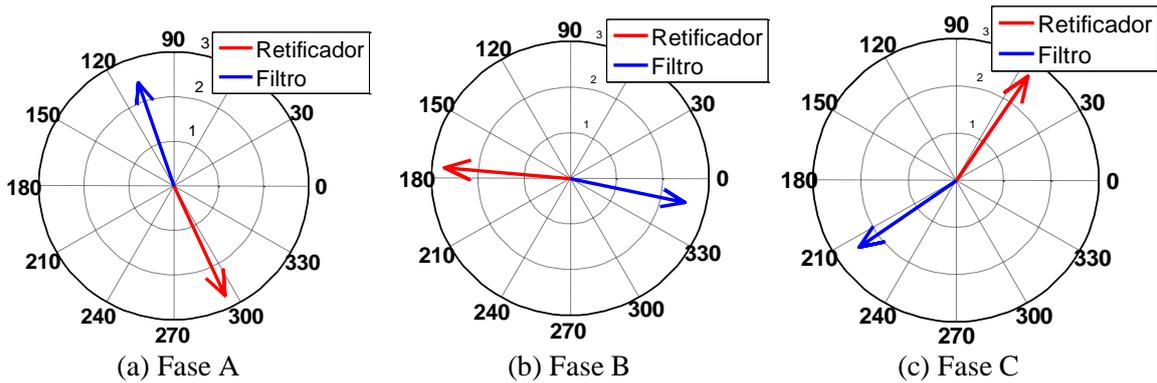


Figura 4.6 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 5ª ordem - Caso Simulado.

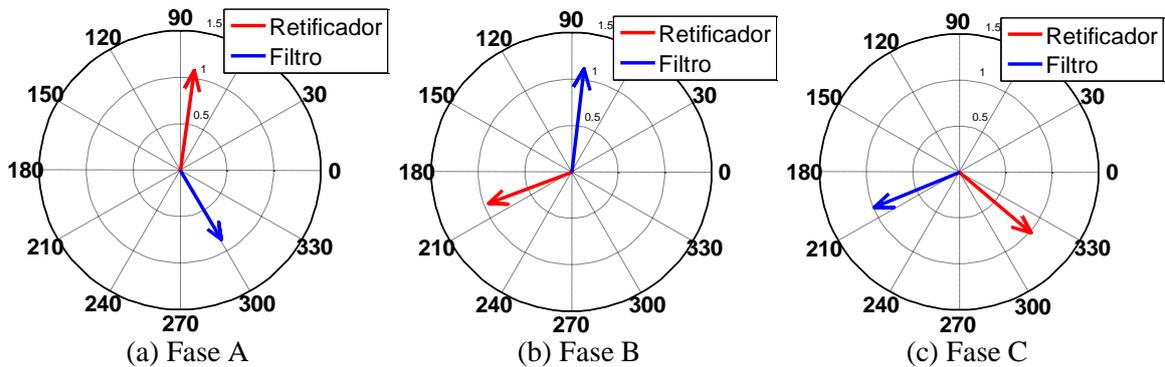


Figura 4.7 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 7ª ordem - Caso Simulado.

Graficamente é comprovado o processo de compensação fasorial. Houve um deslocamento angular dos fasores de 5ª harmônica do filtro com a inserção e ajuste do elemento defasador. Nota-se, para esse caso, que a defasagem ficou, na média, bem próxima a 180°. Já a defasagem dos fasores correspondentes a corrente de 7ª ordem ficou em torno de 150°.

4.3. Procedimentos experimentais

Como plataforma para o desenvolvimento das análises experimentais, montou-se o circuito elétrico composto por uma fonte senoidal variável, carga não linear, um elemento defasador e o filtro eletromagnético em foco.

4.3.1. Sistemática de monitoramento e medição

Para análise operacional, foi desenvolvida uma sistemática de condicionamento e aquisição de dados do sistema ensaiado, utilizando transdutores de tensão e corrente e placas de aquisição de dados (DAQ), da *National Instruments*, conforme a Figura 4.8.

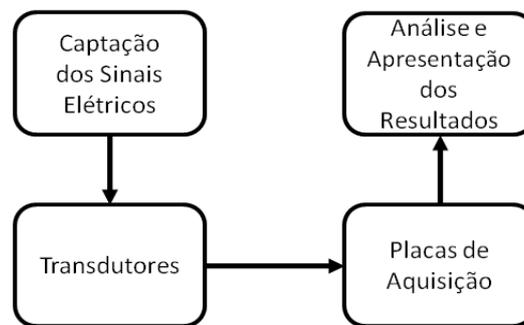


Figura 4.8 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e análise dos dados.

A Tabela 4.5 mostra as características dos transdutores e as placas de aquisição utilizados nos ensaios.

Tabela 4.5 - Dados dos transdutores e DAQ's.

Transdutor	Modelo	Precisão	Relação Transformação	Número de voltas no Clamp
Corrente	Fluke i400s – 40A	2% + 0.015 A (45-400 Hz)	10mV/A	1
Corrente	LEM-flex RR 3035A	1% (10-50 kHz)	50mV/A	1
Transdutor	Modelo	Relação Transformação		
Tensão	220V/6V-0-6V – 500mA	220Vac/6Vac		
DAQ	Fabricante	Modelo		
1	National Instrument	NI USB 5211 6024E		

Posteriormente, em plataforma *LabVIEW*, foi implementado um *software* que monitora, em tempo real, os sinais elétricos captados pelas DAQ's.

A metodologia de cálculo foi fundamentada na transformada discreta de Fourier, onde se atualiza a cada iteração realizada pelo programa e seus resultados são plotados em gráficos e salvos em documento de texto.

4.3.2. Arranjo Implementado em Laboratório

O arranjo montado em laboratório constituiu, fundamentalmente, por:

- Autotransformador de suprimento trifásico;
- Carga não linear (retificador trifásico de seis pulsos não controlado tipo CSI);
- Filtro eletromagnético sob enfoque com o dispositivo defasador conectado em série com o mesmo;
- Elemento defasador resistivo;
- Transformador 220V/6V-0-6V – 500mA;
- *Clamp* de Corrente LEM-flex RR 3035A - 50mV/A;
- Placa de aquisição de dados - BNC-2120 - 6024E - *National Instruments*;
- Placa de aquisição de dados - cRIO-9215- 6024E - *National Instruments*;
- *Software* desenvolvido em plataforma *LabVIEW* - *National Instruments*;

A Figura 4.9 ilustra esse esquema.

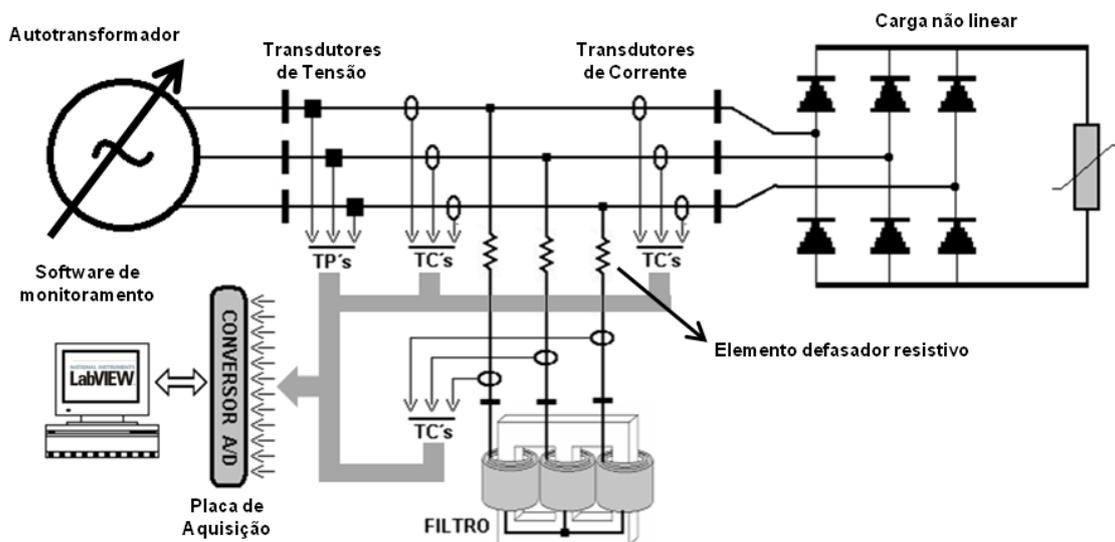


Figura 4.9 - Esquema elétrico trifásico montado em laboratório.

Com auxílio do *software* desenvolvido, ajustou-se o elemento defasador na entrada do filtro viabilizando um ponto de operação do sistema. Esse ponto se refere ao melhor índice de filtragem, ou seja, a menor distorção total da corrente da fonte de suprimento, considerando somente o aspecto qualidade da energia elétrica.

As características do sistema em seu estado de operação são evidenciadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dados do sistema ensaiado.

DADOS DO RETIFICADOR			DADOS DO FILTRO		DADOS DA FONTE			
Potência	[kW]	4,38	Potência	[kVAr]	3,38	Potência	[kVA]	20
Tensão Entrada (Vac)	[V]	220	ELEMENTO DEFASADOR		Tensão Nominal (Vac)	[kV]	0 - 0,240	
Tensão Saída (Vdc)	[kV]	297			Frequência (f)	[Hz]	60	
Corrente (Iac)	[A]	11,00	Resistência	[Ω]	7,5			

Os itens descritos na Tabela 4.6 podem ser visualizados na imagem da bancada conforme a Figura 4.10.

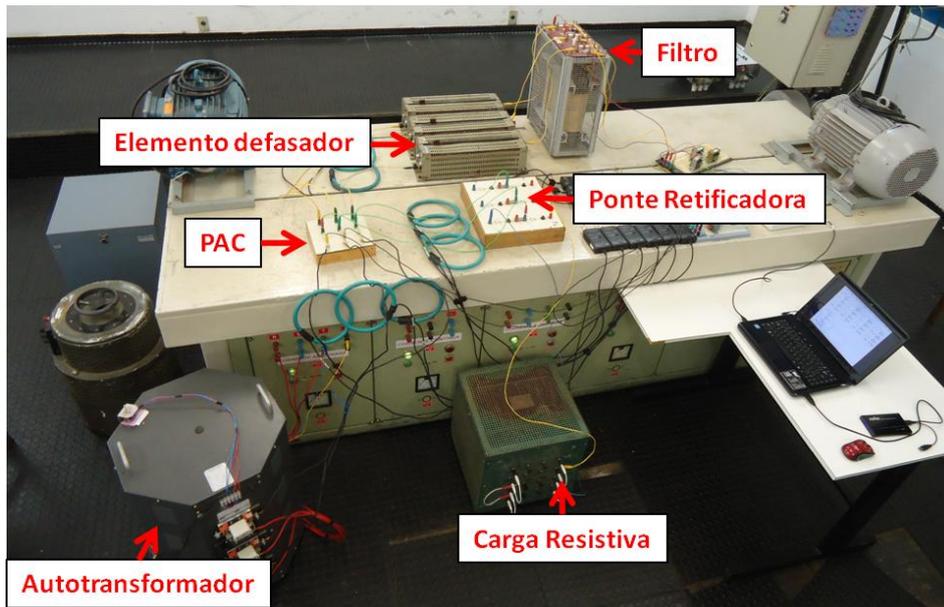
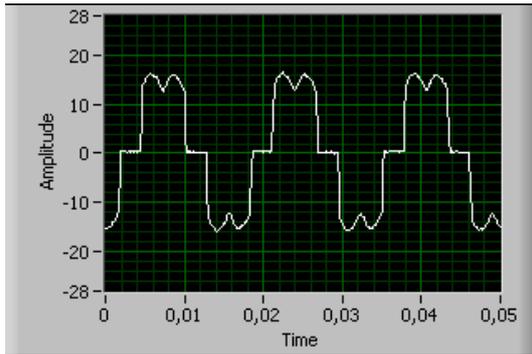


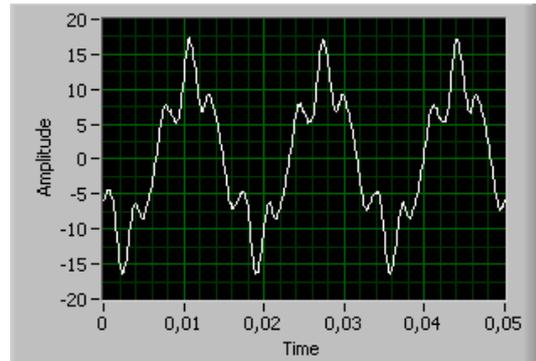
Figura 4.10 - Bancada de testes no laboratório.

4.3.3. Resultados Experimentais

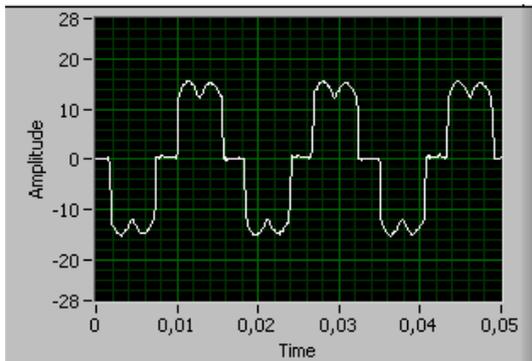
Visando corroborar com os resultados computacionais apresentados anteriormente, a Figura 4.11 ilustra as formas de ondas obtidas com as medições realizadas.



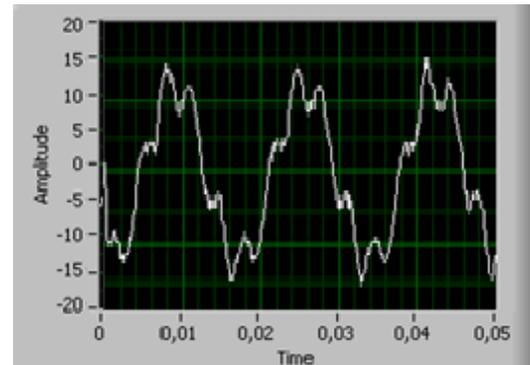
(a1) Corrente da carga não linear - Fase A



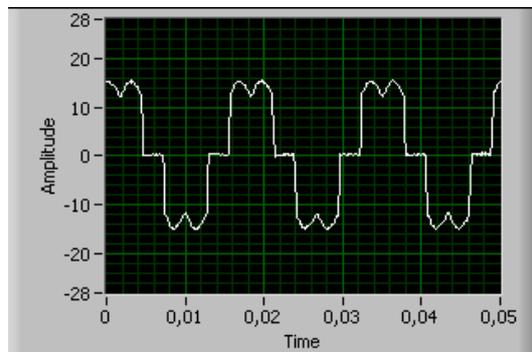
(b1) Corrente do filtro - Fase A



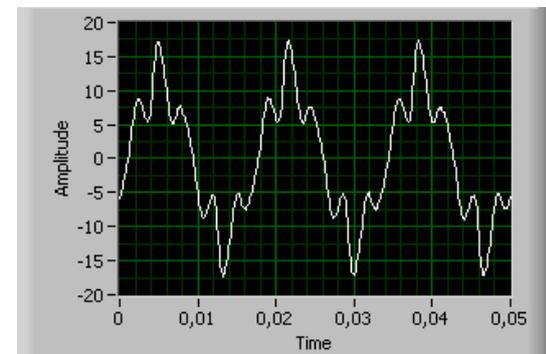
(a2) Corrente da carga não linear - Fase B



(b2) Corrente do filtro - Fase B



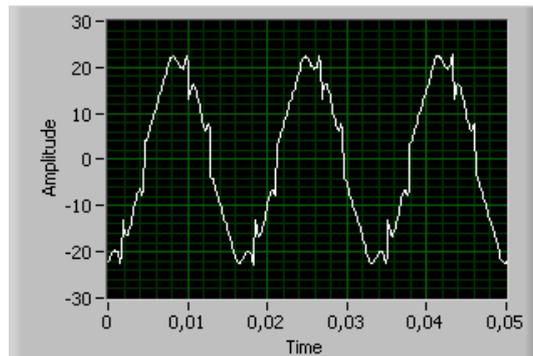
(a3) Corrente da carga não linear - Fase C



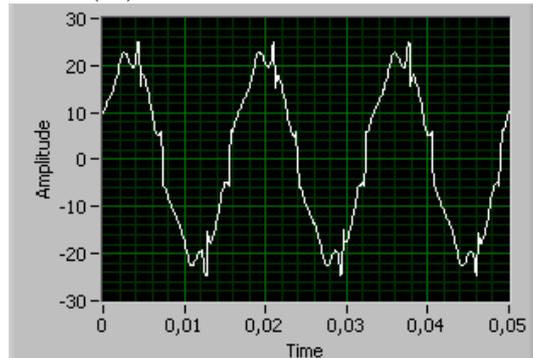
(b3) Corrente do filtro - Fase C

Figura 4.11 - Formas de onda das correntes da carga e filtro. Caso experimental.

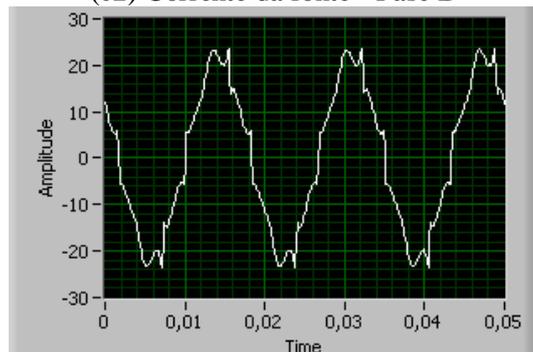
Após o processo de compensação fasorial, a corrente de suprimento possui aspecto mais próximo a uma onda senoidal idealizada. A Figura 4.12 ilustra esse resultado.



(c1) Corrente da fonte - Fase A



(c2) Corrente da fonte - Fase B



(c3) Corrente da fonte - Fase C

Figura 4.12 - Forma de onda da corrente da fonte. Caso experimental.

A Tabela 4.7 resume os valores medidos em laboratório das correntes e seus índices de distorções.

Tabela 4.7 - Valores, em ampères, das correntes fundamentais e harmônicas do ensaio experimental.

Corrente Carga Não Linear					Corrente Filtro				Corrente Fonte			
<i>h</i>	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média
1	11,39	10,81	10,89	11,03	8,43	8,42	8,42	8,42	15,54	15,67	15,29	15,50
3	0,14	0,11	0,03	0,09	0,55	0,37	0,46	0,46	0,43	0,67	0,58	0,56
5	2,74	2,72	2,66	2,71	2,42	2,53	2,48	2,48	0,39	0,39	0,57	0,45
7	1,08	0,95	1,02	1,02	0,87	1,12	1,00	1,00	0,67	1,02	0,96	0,88
9	0,05	0,10	0,02	0,06	0,19	0,17	0,18	0,18	0,15	0,19	0,08	0,14
11	0,96	0,97	0,92	0,95	0,16	0,28	0,22	0,22	0,79	0,69	0,68	0,72
13	0,69	0,58	0,63	0,63	0,14	0,15	0,15	0,15	0,55	0,61	0,62	0,59
15	0,02	0,09	0,02	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02	0,07	0,07	0,05
17	0,56	0,60	0,56	0,57	0,02	0,03	0,02	0,02	0,56	0,57	0,56	0,56
19	0,48	0,43	0,43	0,45	0,01	0,02	0,01	0,01	0,45	0,48	0,44	0,46
21	0,03	0,07	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,03
23	0,41	0,45	0,38	0,41	0,02	0,02	0,02	0,02	0,40	0,41	0,43	0,41
25	0,37	0,33	0,32	0,34	0,02	0,01	0,01	0,01	0,32	0,33	0,32	0,32
Irms	11,85	11,28	11,35	11,49	8,84	8,88	8,85	8,86	15,62	15,77	15,39	15,59

O resumo dos percentuais de distorções das correntes seguem na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Percentuais de distorções das correntes do circuito ensaiado.

Corrente Carga Não Linear					Corrente Filtro				Corrente Fonte			
<i>h</i>	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	29,1%	29,4%	29,1%	29,2%	31,4%	33,5%	32,5%	32,5%	10,4%	11,2%	11,8%	11,1%
Ih5	24,3%	24,7%	24,3%	24,4%	28,7%	30,1%	29,4%	29,4%	3,9%	3,6%	4,1%	3,9%
Ih7	9,5%	9,3%	9,6%	9,5%	10,4%	13,3%	11,8%	11,8%	3,3%	5,5%	6,4%	5,1%
Ih11	8,7%	8,9%	8,7%	8,8%	2,0%	3,3%	2,6%	2,6%	5,3%	4,6%	4,6%	4,8%
Ih13	5,9%	5,4%	5,8%	5,7%	1,7%	1,8%	1,8%	1,8%	3,9%	3,5%	4,1%	3,8%
Ih17	5,2%	5,2%	5,0%	5,2%	0,2%	0,4%	0,3%	0,3%	3,5%	3,7%	3,5%	3,6%
Ih19	4,1%	3,9%	4,1%	4,0%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	3,2%	2,8%	2,7%	2,9%
Ih23	3,7%	3,8%	3,7%	3,7%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	2,5%	2,7%	2,7%	2,6%
Ih25	3,0%	2,7%	3,0%	2,9%	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	2,4%	2,0%	1,9%	2,1%

De modo similar ao caso simulado, os resultados provenientes dos testes em laboratórios se mostraram satisfatórios e legítima toda teoria exposta nessa dissertação. Portanto, o protótipo disponível em laboratório atenuou a poluição harmônica gerada pela carga, e conseguiu reduzir os níveis de distorção total de 29% para 11%. Resultados estes bastantes similares ao caso simulado no *ATPDraw*.

Seguindo a mesma lógica, a maior redução ocorreu na corrente de 5ª ordem harmônica. Por oportuno, as figuras 4.13 e 4.14 evidenciam a oposição de fases encontradas para as ordens harmônicas 5 e 7.

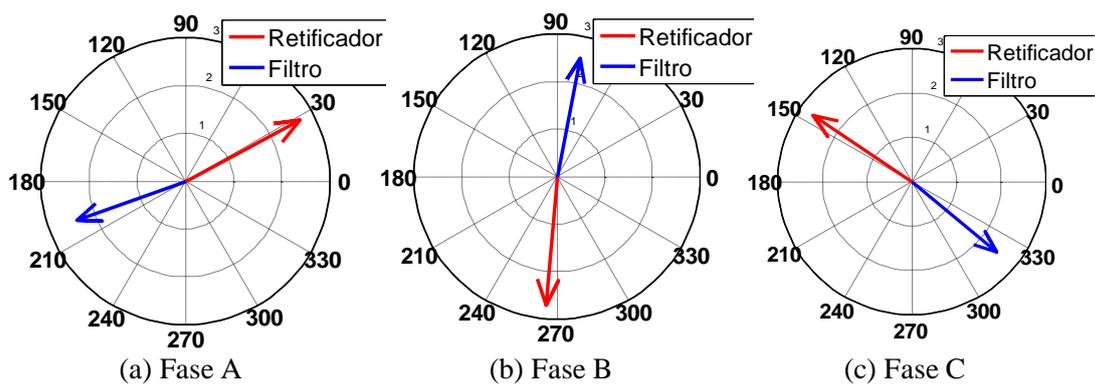


Figura 4.13 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 5ª ordem - Caso Experimental.

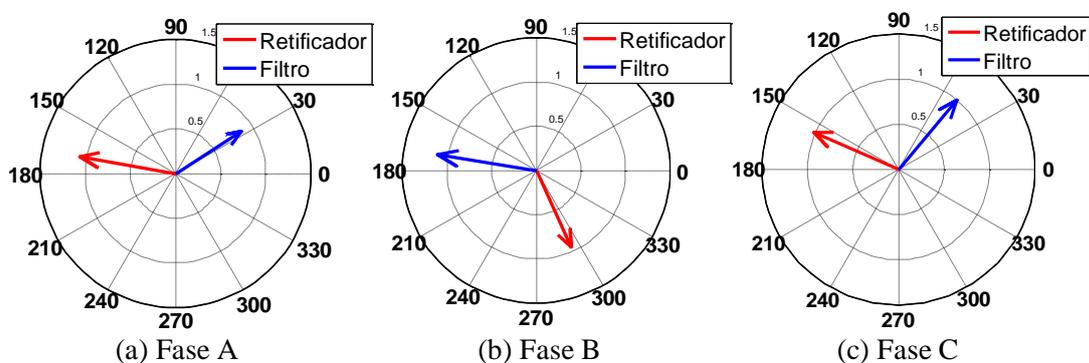


Figura 4.14 - Diagrama fasorial da corrente harmônica de 7ª ordem - Caso Experimental.

Como foi utilizado tensão de alimentação no sistema ensaiado proveniente de um autotransformador trifásico, os níveis de distorções podem ver observados na Figura 4.15 e posteriormente nas tabelas 4.9 e 4.10.

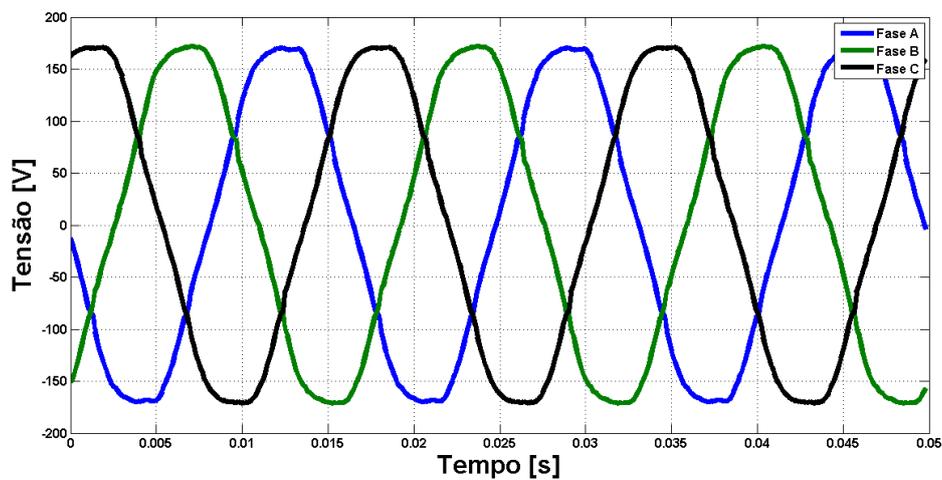


Figura 4.15 - Tensões de alimentação do arranjo implementado em laboratório.

Os índices numéricos da distorção da rede estão evidenciados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Valores, em volts, das tensões de entrada no sistema ensaiado.

Tensão (V)				
<i>h</i>	Va	Vb	Vc	Média
1	124,62	124,60	124,92	124,72
3	0,62	0,59	0,78	0,66
5	4,35	4,71	4,41	4,49
7	0,33	0,53	0,29	0,38
9	0,26	0,21	0,17	0,21
11	0,63	0,63	0,28	0,51
13	0,10	0,42	0,22	0,25
15	0,21	0,25	0,05	0,17
17	0,34	0,31	0,35	0,33
19	0,31	0,21	0,31	0,28
21	0,11	0,16	0,06	0,11
23	0,37	0,22	0,25	0,28
25	0,07	0,15	0,30	0,17
Vrms	124,70	124,70	125,01	124,80

O resumo dos percentuais de distorções das tensões de alimentação do sistema estão na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Percentuais de distorções das tensões de entrada no sistema ensaiado.

Corrente Carga Não Linear				
<i>h</i>	Va	Vb	Vc	Média
DHT	3,6%	3,9%	3,6%	3,7%
Vh5	3,5%	3,8%	3,5%	3,6%
Vh7	0,3%	0,4%	0,2%	0,3%
Vh11	0,5%	0,5%	0,2%	0,4%
Vh13	0,1%	0,3%	0,2%	0,2%
Vh17	0,3%	0,2%	0,3%	0,3%
Vh19	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Vh23	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%
Vh25	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%

Os percentuais apresentados na Tabela 4.10 evidenciam um teor de poluição coerente com a realidade do sistema elétrico brasileiro em baixa tensão. Com isso, pode-se assegurar que os resultados obtidos nos testes em experimentais condizem com a realidade em campo em diversos sistemas elétricos.

4.4. Qualidade da energia elétrica versus eficiência energética.

A fim de analisar a operação do filtro eletromagnético sob o enfoque eficiência energética, percebe-se que os resultados apresentam uma elevação na corrente eficaz do sistema (fonte de alimentação) em torno de 35%, em virtude da operação do filtro, o que acarreta, conseqüentemente, um aumento correspondente no consumo de energia elétrica.

Visando um ponto de equilíbrio entre eficiência e qualidade energética, foi testado diversos níveis de tensão no sistema testado em laboratório, utilizando, para tanto, a fonte variável de tensão. Os resultados, ilustrados na Tabela 4.11, contemplam índices de distorção e acréscimo na corrente eficaz da fonte.

Tabela 4.11 - Índices de Distorção Harmônica e Acréscimo de Corrente Eficaz na Fonte.

V_{FN} Fonte (V)	DIHT _i Carga Retificadora	DIHT _i Fonte	Acréscimo de I_{RMS} da Fonte (%)
125	28,0	18,3	16,2
126	28,0	17,6	17,3
127	28,0	16,9	18,3
128	28,0	16	19,7
129	28,0	15,3	20,9
130	28,0	14,4	22,2
131	28,0	13,7	23,8
132	28,0	13	25,1
133	28,0	11,8	28,3
134	28,0	11,5	29,2
135	28,0	11,05	30,9
136	28,0	10,6	33,3
137	28,0	10,4	35,5
138	28,0	10,3	38,4
139	28,0	10,47	49,9

Para melhor visualização, esses resultados são apresentados em forma de gráfico, conforme a Figura 4.16. Vale ressaltar que o estado de operação do sistema foi adotado no ponto de intersecção entre as curvas de índice de qualidade e eficiência.

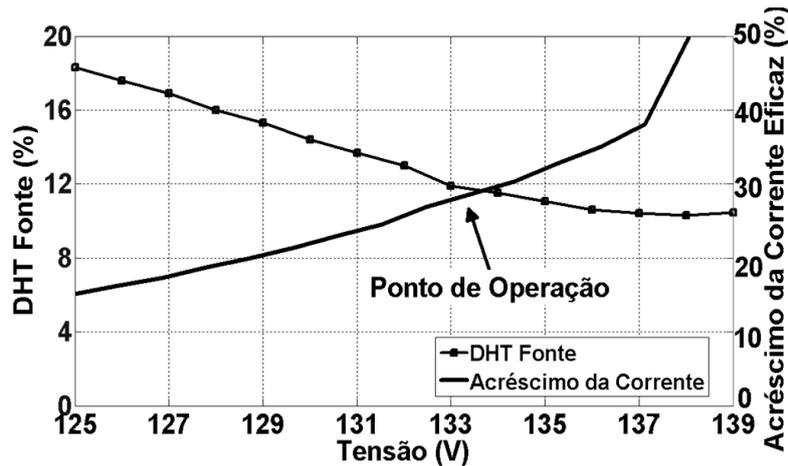


Figura 4.16 - Índices de distorção da corrente na fonte e percentual de acréscimo de corrente eficaz devido à operação do filtro.

Observando a operação do filtro, sabe-se que é inevitável o aumento da corrente eficaz da fonte, porém, não se pode deixar de enfatizar sua função na mitigação das harmônicas. Essas análises realizadas envolvendo eficiência energética podem reforçar o aspecto já conhecido entre as áreas QEE e Eficiência Energética, ou seja, à medida que são melhorados os aspectos relacionados à eficiência energética, a QEE se torna menor (aumento da poluição nos sinais elétricos) e vice-versa.

4.5. Análise das Potências

Complementando a análise de eficiência versus qualidade da energia elétrica, foram calculadas, através dos valores colhidos em laboratório, as potências ativa (P), reativa de deslocamento (Q) e de distorção (D) e, conseqüentemente, potência aparente (S) do sistema. O método de cálculo efetuado para a potência reativa de distorção é apresentado em (4.29) e os valores calculados através dos dados medidos em laboratórios estão na Tabela 4.7. Os cálculos das demais potências segue a teoria convencional de circuitos [7].

$$D = V.I. \sqrt{1 - \left(\frac{I_1}{I}\right)^2} \quad (4.29)$$

A Tabela 4.12 e a Figura 4.17 resumem as potências envolvidas no sistema.

Tabela 4.12 - Potências Envolvidas no Sistema Considerado

	Carga	Filtro	Fonte
D (kVAr)	1,2	1,05	0,5
Q (kVAr)	0,2	3,05	3,1
P (kW)	4,1	0,74	4,8
S (kVA)	4,3	3,3	5,8

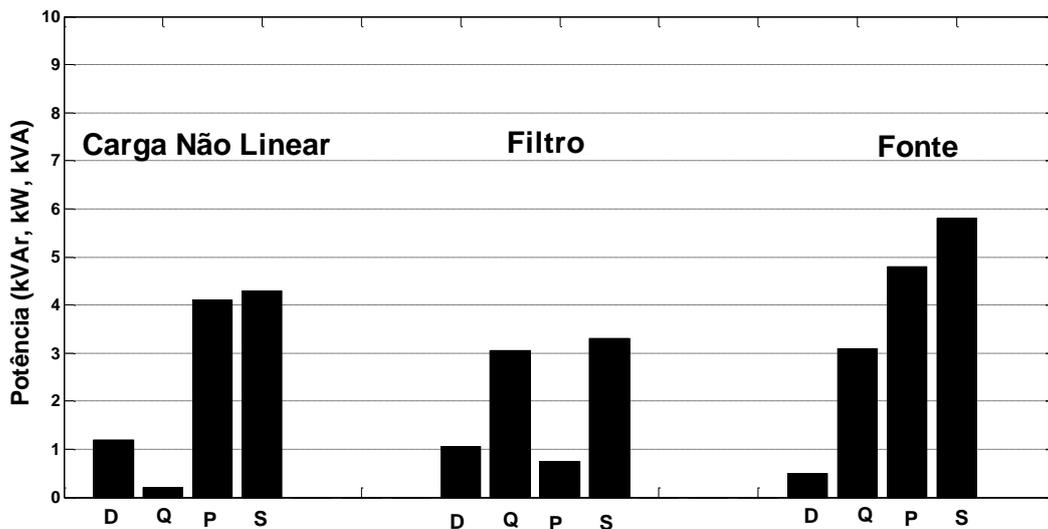


Figura 4.17 - Potências Envolvidas no Sistema Experimental.

Quanto às variações de potências na fonte devido à inserção do filtro de sequência positiva e negativa, observam-se as maiores alterações nas potências reativas de deslocamento e de distorção, conforme a Tabela 4.10. Isso se dá em virtude das características do dispositivo de filtragem, ou seja, a potência relacionada às harmônicas houve uma redução considerável na fonte, como era de se esperar, já o aumento de reativo solicitado da rede advém da sua corrente fundamental ter característica fortemente indutiva. Já à elevação da potência ativa ficou na ordem de 17 % e da potência aparente, que é a interação entre todas as potências, ficou por volta de 34 %. A Tabela 4.13 resume as variações de potência após a inserção do filtro.

Tabela 4.13 - Variação de potências na fonte em relação ao retificador

D	Q	P	S
-58%	1.500%	17%	34%

Diante do aumento de reativo solicitado junto ao sistema de suprimento, faz-se necessário averiguar o comportamento do novo fator de potência do sistema. A Tabela 4.14 ilustra esses valores.

Tabela 4.14 - Fatores de potências do Sistema.

	Carga	Filtro	Fonte
FP	0,96	0,23	0,84

Dos valores apresentados na Tabela 4.14, percebe-se que o fator de potência da fonte ficou abaixo do regulamentado pelos órgãos oficiais que pela legislação nacional é de 0,92 [46]. Vale ressaltar que o sistema ensaiado em laboratório trata-se, comumente, de uma parcela de cargas constantes em uma unidade consumidora, ou seja, o fator de potência o qual fica sob análise da concessionária é o equivalente da interação de todas as cargas da empresa.

Outro fato a ser ressaltado se relaciona à diminuição da potência de distorção D , que pode acarretar em diminuição considerável de gastos financeiros, à medida que este indicador for cobrado pelas agências reguladoras. Diante deste cenário, uma avaliação final envolvendo aspectos financeiros entre QEE e Eficiência Energética ainda não é possível de ser analisado.

4.6. Considerações finais

O presente capítulo abordou a validação da teoria envolvida no processo de compensação fasorial que é responsável pela atenuação do conteúdo harmônico injetado na rede elétrica. Para isso, foram criadas duas sistemáticas de análise, uma virtual, utilizando simulações no *ATPDraw*, e outra experimental, utilizando o protótipo do filtro para testes realizados em laboratório. Estes resultados evidenciaram uma boa aderência, considerando valores comparativos absolutos e percentuais, bem como para as formas de onda das correntes de linha, nas 3 fases. Desta forma, fica esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do filtro de sequência positiva e negativa.

No âmbito da qualidade da energia elétrica pode-se resumir, de forma geral, que as correntes harmônicas injetadas pela carga não linear se apresentaram com conteúdos responsáveis por distorções totais de corrente em torno de 27%, o qual foi reduzido em

aproximadamente 60%, resultando em uma distorção de corrente na fonte de suprimento de cerca de 11%.

No que tange às correntes do filtro eletromagnético, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo, operando de forma saturada e com neutro isolado, se apresenta como uma carga não linear com geração de harmônicas de sequência positiva e negativa, sendo a 5^a e 7^a ordens as que se manifestam com maiores amplitudes. O aparecimento da 3^a ordem (baixo valor) se justifica pela sua geometria planar e, como mencionado, estudos estão sendo executados nessa e em outras vertentes para a minimização deste efeito colateral.

O *software* desenvolvido em plataforma LabVIEW para aquisição e controle dos dados medidos em laboratório se fez bem satisfatório, pois proporciona um acompanhamento *online* dos ensaios, bem como apresenta seus resultados em gráficos e arquivos de texto para melhor tratamento em outros programas.

As análises realizadas envolvendo eficiência energética podem reforçar o aspecto já conhecido entre as áreas QEE e Eficiência Energética, ou seja, à medida que são melhorados os aspectos relacionados à eficiência energética, a QEE se torna menor (aumento da poluição nos sinais elétricos) e vice-versa. Tendo como foco a análise das potências do sistema considerado, pode-se observar que a variação de potência na fonte, com a inserção do filtro eletromagnético, foi mais considerável no aumento de reativos solicitado da rede, cerca de 1.500,00%, e na redução da potência de distorção, em torno de 60%, aqui denominada de potência reativa de distorção.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais e propostas de continuidade

Apesar das considerações finais inseridas ao término de cada capítulo terem sintetizado as principais constatações e contribuições realizadas, considera-se, nesta etapa final do trabalho, de grande importância que seja realizado um tratamento por inteiro acerca dos resultados atingidos, das principais contribuições e dos avanços conseguidos, de modo que se possa ter uma síntese clara do assunto investigado. Dentro deste contexto, este capítulo tem por objetivo resumir os principais pontos relacionados com cada capítulo, com destaque aos avanços e, ao final, oferecer algumas sugestões para futuros trabalhos.

Assim, o capítulo I sintetizou os motivos de estudos voltados para área de mitigação de harmônicas no sistema elétrico. Além disso, apresentou os conceitos utilizados pelos órgãos reguladores, mas não apresentou os índices de referência por esses órgãos utilizados, pois se considerou desnecessário devido ser assunto amplamente divulgado/conhecido no meio técnico científico. Por conseguinte, explanou-se sobre a contextualização do tema, onde foi apresentado, de maneira sucinta, as tecnologias existentes na mitigação de harmônicas de correntes. A revisão bibliográfica permitiu enumerar essas principais técnicas até então utilizadas. Assim, estabelecendo tal meta, o capítulo estabeleceu as diretrizes a serem trilhadas com vistas a alcançar os objetivos delineados. Também esta unidade apresentou uma síntese estrutural desta dissertação e as principais contribuições alcançadas e exploradas nos capítulos subsequentes.

O capítulo II concentrou-se em abordar as técnicas apresentadas no capítulo I, sendo que antes disso foi exposto, de maneira objetiva, a conceituação das harmônicas. Depois disso, iniciou-se a abordagem no que tange as técnicas de mitigação existente. A primeira técnica trata-se no aumento do número de pulsos nos conversores de frequência, onde as ordens harmônicas geradas respeitam a expressão (2.5). A segunda

técnica alcança o universo dos filtros, sendo o primeiro apresentado os filtros passivos. Na sequência, abordou-se os filtros ativos, que, assim como os passivos, também possuem configuração série e paralela. A junção destas duas tecnologias se trata de um dispositivo híbrido, que combina os conceitos descritos nos dispositivos de filtragem de tecnologia ativa e passiva. No final deste capítulo, foram abordados considerações sobre os dispositivos de filtragem baseados na tecnologia eletromagnética. Primeiro, o filtro de harmônicas de sequência zero, que consiste na utilização de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, visando oferecer um caminho de baixa impedância quando se comparado ao restante do circuito elétrico ao qual pertence o dispositivo. O segundo filtro eletromagnético e última técnica apresentada consiste no dispositivo alvo deste estudo, filtro de harmônicas de sequência positiva e negativa.

O capítulo III apresentou a fundamentação teórica e física do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa, bem como seu princípio de operação. Também foram resumidas as características de comportamento e bases matemáticas da carga não linear alvo da filtragem. Por fim, foram explanadas as etapas do desenvolvimento matemático necessárias para a obtenção de dados para simulação e projeto de protótipo. Estas etapas representam um aumento no nível de conhecimento prático associado ao projeto destes filtros, abordando aspectos físicos, elétricos e magnéticos.

O quarto capítulo validou a teoria envolvida no processo de compensação fasorial utilizada pelo filtro em foco. Para isso, foram criadas duas sistemáticas de análise, uma virtual, utilizando simulações no *ATPDraw*, e outra experimental, utilizando o protótipo do filtro para testes realizados em laboratório. Os resultados apresentados evidenciaram uma boa aderência, considerando valores comparativos percentuais. Isto ocorreu tanto para as formas de onda quanto para os valores obtidos. Desta forma, ficou esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do filtro de sequência positiva e negativa.

Sintetizando, a pesquisa demonstrou a exequibilidade da utilização de dispositivos eletromagnéticos para fins da atenuação das distorções harmônicas. Esta filosofia de filtragem, embora já destacada por alguns autores através de outros arranjos que os aqui investigados, constitui-se numa estratégia simples, eficiente e de baixo custo. A favor desta tecnologia pesa ainda a questão da nacionalidade do produto, o qual poderá ser, eventualmente, produzido por qualquer fabricante envolvido com

transformadores e/ou reatores. A matéria prima também é 100% nacional, assim como também a propriedade da pesquisa.

Como comentário final fica esclarecido que os trabalhos aqui documentados refletem os primeiros passos na direção do domínio desta tecnologia. Neste sentido, muito embora o reconhecimento dos avanços obtidos, apenas investigações complementares conduzirão a um aprimoramento e consolidação do produto focado nesta pesquisa, até sua disponibilização da forma de equipamento comercial. Para tanto, dentre outros aspectos não previstos nesta fase dos desenvolvimentos, reconhece-se a necessidade de maiores avanços quanto aos seguintes pontos:

- Estudos eletromagnéticos voltados para a identificação de campos magnéticos, dispersão e outros aspectos relevantes à área térmica via elementos finitos;
- Utilização de ligas amorfas no núcleo visando reduzir perdas no material magnético;
- Eliminação de frequências elevadas via filtro passivo colocado em paralelo, visando reduzir os reativos produzidos pelo filtro;
- Investigações sobre mecanismos de controle do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa, de forma a acompanhar as alterações operacionais da rede e da carga;
- Análise de ruídos audíveis na operação do filtro eletromagnético;
- Investigações voltadas para o processo de otimização no que tange à redução da corrente fundamental absorvida pelos filtros de sequência positiva e negativa, o que, de fato, irá aumentar a eficiência do mesmo.

REFERÊNCIAS

- [1] PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional Modulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, ANEEL, Dezembro de 2012.
- [2] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions – Std. 1459-2010. New York, March 19, 2010.
- [3] IEEE-519. Recommended Practices and Requirements for Harmonic. 1992.
- [4] ARRILLAGA, J., “Harmonic elimination”, in II International Conference on Harmonics in Power Systems Proceedings, September, Manchester, England, pp. 37-75, 1981.
- [5] STRATFORD, R. P., STEEPER, D. E., “Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-12, Nº. 3, pp. 232-254, May/June 1976
- [6] STRATFORD, R. P., “Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, Nº. 1, pp. 71-81, Jan/Feb 1981.
- [7] ARRILLAGA, J., BRADLEY, P. S., BOGDER, P. S., “Power systems harmonics”, John Wiley and Sons, New York, 2003.
- [8] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., Electrical power systems quality – 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [9] FERREIRA, J. F. V., “Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de sequência zero através de dispositivos eletromagnéticos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [10] BELCHIOR, F. N., FERREIRA, J. F. V., OLIVEIRA, J. C., APOLONIO, R., VASCONCELLOS, A. B., “Unified zero sequence electromagnetic filter”, Proceedings on 8th IASTED International Conference on Power and Energy Systems, pp. 13-18, Oct. 2005.

- [11] RIBEIRO, N. S. S., Avaliação de filtros eletromagnéticos e sintonizados LC para minimização de correntes de sequência zero em sistemas de distribuição a quatro fios. Dissertação de Mestrado, Uberlândia: UFU. 2007.
- [12] KEY, T., LAY, J-S., “Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, N°. 3, pp. 890-897, Aug. 1998.
- [13] DEPENDROCK, M., “The FBD-method, a generally applicable tool for analysing power relations”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, N°. 2, pp. 381-387, May 1993.
- [14] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, N°. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [15] PAICE, D. A., Power Electronic Converter Harmonics-Multipulse Methods for Clean Power. New York. IEEE Press. 1996.
- [16] AKAGI, H., NABAE, A., ATOH, S., “Control strategy of active power filter using multiple voltage source pwm converters”, IEEE Transactions on Industry Applications., Vol. IA-22, N°. 3, May/June 1986.
- [17] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “A study of active power filters using quad-series voltage-source pwm converters for harmonic compensation”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, N°. 1, pp. 9-15, Jan. 1990.
- [18] AKAGI, H., “New trends in active filters for power conditioning”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, N°. 6, pp. 1311-1322, Nov./Dec. 1996.
- [19] SENSARMA, P. S., PADIYAR, K. R., RAMANARAYANAN, V., “A comparative study of harmonic filtering strategies for a shunt active filter”; Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2509-2516, 2000.
- [20] AREDES, M., WATANABE, E. H., “Power quality considerations on shunt/series current and voltage conditioners”, 10th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 2, pp. 595-600, 2002.
- [21] AREDES, M., “Active power line conditioners”, Dr.-Ing. Thesis, Technische Universität Berlin, 1996.

- [22] AREDES, M., HEUMANN, K., WATANABE, E. H., “An universal active power line conditioner”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, Nº. 2, pp. 545-551, April 1998.
- [23] RAVAGNANI, L. L., Sistemas Híbridos para Mitigação de Harmônicos: Modelagem e Estudos Experimentais, Tese de Doutorado, UNESP-ISA, 2008.
- [24] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “A new approach to harmonic compensation in power systems”, IEEE/IAS Annual Meeting Conference, pp. 874-880, 1988.
- [25] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “A new approach to harmonic compensation in power systems - a combined system of shunt passive and series active filters”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, Nº. 6, pp. 983-990, Nov./Dec.1990.
- [26] LING, P. J. A., ELDRIDGE, C. J., “Designing modern electrical systems with transformers that inherently reduce harmonic distortion in a pc-rich environment”, PowerSmiths International Corporation, 416-439-1077, pp. 1-13, 2000.
- [27] SOUTO, O. C. N., “Contribuições à modelagem de cargas elétricas não lineares e propostas para a redução de harmônicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1995.
- [28] KHERA, P. P., “Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system”, in Proceedings IEEE IAS, Vol. 2, pp. 1092-1096, 1990.
- [29] 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, pp. 1168-1173, April 2005.
- [30] BELCHIOR, F. N., Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos através de Dispositivos Eletromagnéticos, Tese de Doutorado, Uberlândia: UFU, 2006.
- [31] KIM, S. S., ENJETI, P. N., PITEL I, J., “A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30. Nº. 6, pp 1557-1564, 1994.

- [32] MEZA, J. C., SAMRA, A. H., “A new technique to reduce line-current harmonics generated by a three-phase bridge rectifier”, Proceedings Southeast on IEEE, pp 354-359, 1998.
- [33] VASCONCELLOS, A. B., Modelagem e análise de desempenho de compensadores estáticos a reator à núcleo saturado no contexto da qualidade da energia, Uberlândia, Tese de Doutorado, UFU, 2004.
- [34] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Submódulo 2.2 - Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Dezembro 2002.
- [35] H. Akagi, “Active Harmonic Filter”, Proceedings of the IEEE, vol.93, no 12, p. 2128-2138, December 2005.
- [36] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. JR; KUSKO, A.; Máquinas Elétricas - Conversão Eletromecânica da Energia. Processos, Dispositivos e Sistemas. Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1975.
- [37] GOURISHANKAR, V. Electromechanical energy conversion. New York: Thomas Y. Crowell, 1973. 558 p.
- [38] RODRIGUES, K. D., Conversores de Frequência no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica, Tese de Doutorado, Uberlândia: UFU, 2001.
- [39] JÚNIOR, J. A. F. B.; OLIVEIRA, J. C.; GONDIM, I. N.; SANTILIO, F. P.; SILVA, T. V.; VASCONCELLOS, A. B.; PACHECO, J. M.. Estabelecimento e Validação de uma Sistemática para a Obtenção das Curvas de Magnetização de Reatores Saturados para Simulação no ATP. IX CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá.
- [40] PACHECO, J. M., Determinação dos Parâmetros de Compensadores Estático de Reativos e Estratégia Para o Projeto Otimizado de Reatores Saturados, Tese de Doutorado, Uberlândia: UFU, 2008.
- [41] MARTIGNONI, A., Transformadores, 8. Ed., São Paulo, Editora Globo, 1991;
- [42] PRIKLER, L. et al. ATPDRAW User’s manual. V. 5.6, pp. 270, 2009.
- [43] JÚNIOR, J. A. F. B.; OLIVEIRA, J. C. ; GONDIM, I. N. ; SANTILIO, F. P. ; SILVA, T. V. ; VASCONCELLOS, A. B. ; PACHECO, J. M. . Estabelecimento e Validação de uma Sistemática para a Obtenção das Curvas de Magnetização de Reatores Saturados para Simulação no ATP. IX CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá.
- [44] AKAGI, H.; “Active harmonic filters”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.

[45] Catálogo *Prysmian Cables e System*. Sítio: <http://www.prysmian.com.br/>

[46] Resolução Normativa N°414, ANEEL, Setembro de 2010.

ANEXOS

Artigos Publicados

- [1] ALVES, M. S. M.; BELCHIOR, F. N.; PADILHA, R. C.; SALES, G. J., "Filtragem de Harmônicos de Sequência Positiva e Negativa Através de Arranjos Eletromagnéticos – Qualidade da Energia versus Eficiência Energética." IX CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica. Cuiabá, MT, Agosto 2011.
- [2] ALVES, M. S. M.; BELCHIOR, F. N.; PADILHA, R. C.; SALES, G. J., "Filtragem de Harmônicos Através de Arranjos Eletromagnéticos – Qualidade da Energia Versus Eficiência Energética." IV CBEE - Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Juiz de Fora, MG, Agosto 2011.
- [3] ALVES, M. S. M.; BELCHIOR, F. N.; FILHO, J. M. C., "Filtragem de Harmônicos de Sequência Positiva e Negativa Através de Arranjos Eletromagnéticos - Considerações de Projeto." X CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica. Araxá, MG, Junho 2013.

Filtragem de Harmônicos de Sequência Positiva e Negativa Através de Arranjos Eletromagnéticos – Qualidade da Energia versus Eficiência Energética

M. S. M. Alves, Eng.; F. N. Belchior, Dr., *IEEE Member*; R. C. Padilha, acad.; G. J. Sales, acad.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, nº 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá-MG

Resumo - Este artigo apresenta considerações teóricas e testes laboratoriais da utilização do reator a núcleo saturado como alternativa de redução de níveis harmônicos de corrente de sequência positiva e negativa em um sistema contendo uma carga retificadora trifásica de seis pulsos não-controlada, cujo conteúdo harmônico é conhecido. As análises compreenderam ensaios experimentais de um protótipo já construído com auxílio de um *software* desenvolvido na plataforma LabVIEW® para aquisição e tratamento dos dados. De posse desses dados, implementou-se um modelo computacional do citado filtro e comparou seu desempenho. Por fim, aspectos relacionados à Qualidade da Energia e Eficiência Energética do conjunto foram confrontados.

Palavras-chave – Correntes harmônicas de sequência positiva e negativa, filtro harmônico, qualidade da energia, reator a núcleo saturado.¹

I. INTRODUÇÃO

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem se tornado uma das áreas de maior interesse para consumidores e concessionários de energia. O termo QEE tem sido empregado para englobar uma grande variedade de distúrbios nos sistemas elétricos. Tais distúrbios podem originar-se e/ou manifestar-se em diferentes pontos da rede elétrica, os quais podem ser de natureza local, ou seja, uma perturbação que ocorre dentro da instalação do consumidor, ou de natureza externa ou remota. Normalmente associa-se QEE à qualidade de tensão, já que existe um padrão bem determinado para medidas de tal grandeza, sendo o foco a manutenção da tensão dentro de certos limites.

Dentro desse contexto, pode-se agrupar os principais fenômenos eletromagnéticos associados à (QEE) da seguinte forma [1]:

- Variações Momentâneas de Tensão: São variações momentâneas no valor RMS da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta, porém menor do que 3

(três) segundos. Tais variações podem ser classificadas como Interrupções, Afundamentos e Elevações Momentâneas de Tensão.

- Variações Temporárias de Tensão: São variações do valor RMS da tensão entre dois níveis consecutivos, porém maior que 3 (três) segundos e menor igual a 1 (um) minuto. Tais variações podem ser classificadas como se segue: Interrupções, Afundamentos e Elevações Temporárias de Tensão.

- Variações de Frequência: São pequenos desvios momentâneos do valor da frequência fundamental da tensão decorrentes do desequilíbrio entre a geração da energia elétrica e a demanda solicitada pela carga.

- Harmônicos: São tensões ou correntes senoidais caracterizadas por serem múltiplas da frequência fundamental (60 Hz). Os harmônicos se somam às componentes fundamentais de tensão e corrente causando distorção na forma de onda.

Em termos de revisão bibliográfica sabe-se que as propostas mais usuais de mitigação das distorções harmônicas se tratam do aumento do número de pulsos dos conversores de frequência e filtros harmônicos. Este último citado, pode ser encontrado nas tecnologias ativas e passivas (filtros RL ou RLC) [1].

O método abordado neste estudo refere-se a nova topologia associado à operação de filtros eletromagnéticos cujo seu princípio é baseado na saturação magnética [2,3,4]. Dentro deste contexto, traz-se, neste artigo, um aspecto importante na operação deste equipamento, qual seja, a relação entre a qualidade da energia elétrica e a eficiência energética.

II. FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de sequência positiva e negativa, conforme figura 1, fundamenta-se num reator a núcleo saturado trifásico. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação. Construtivamente, este equipamento tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não-linearidade da curva B x H do material magnético do reator se constitui

Este trabalho visa analisar o desempenho de reator a núcleo saturado operando como filtro eletromagnético de harmônicas de sequência positiva e negativa. Após análise prática o mesmo foi implementado computacionalmente e simulado. Os resultados de simulação e práticos foram comparados com intenção de validação do modelo computacional.

F. N. Belchior, professor adjunto II na Universidade Federal de Itajubá (e-mail: fnbelchior@hotmail.com).

M.S.M. Alves, engenheiro eletricitista e aluno de mestrado no programa de pós-graduação na Universidade Federal de Itajubá (email: sollyvan@hotmail.com).

R. C. Padilha e G. J. Sales são acadêmicos de Engenharia Elétrica da UNIFEI e bolsistas FAPEMIG (emails: ricardocpadilha@yahoo.com.br e gilberto-sls@hotmail.com).

em fator determinante para a sua operação. De fato, a isto se deve o expressivo conteúdo harmônico das suas correntes de alimentação e neste ponto concentra-se o princípio da compensação harmônica aqui focada.



Fig. 1. Filtro Eletromagnético de Sequência Positiva e Negativa.

Para viabilizar a citada compensação, de um modo ideal, a geração harmônica, por parte do dispositivo sob análise, deve apresentar a mesma magnitude, porém ângulos de fase opostos ao conteúdo harmônico produzido pela carga não-linear a ser compensada, conforme (1-4).

$$|I_{C5}| = |I_{F5}| \quad (1)$$

$$\theta_{C5} = (\theta_{F5} \pm \pi) \quad (2)$$

$$|I_{C7}| = |I_{F7}| \quad (3)$$

$$\theta_{C7} = (\theta_{F7} \pm \pi) \quad (4)$$

Onde:

I_{C5} e I_{C7} : Correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens da carga, respectivamente;

I_{F5} e I_{F7} : Correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens do filtro harmônico, respectivamente;

θ_{C5} e θ_{C7} : Ângulos de fase das harmônicas da carga de 5ª e 7ª ordem;

θ_{F5} e θ_{F7} : Ângulos de fase das harmônicas do filtro de 5ª e 7ª ordem.

De forma a propiciar a defasagem necessária entre os harmônicos produzidos pelo filtro eletromagnético e aqueles gerados pelas cargas não-lineares, torna-se imprescindível a incorporação de um mecanismo defasador que venha introduzir um deslocamento angular no fluxo concatenado e, por conseguinte, na corrente de alimentação do filtro. Um ajuste adequado da defasagem pode, portanto, produzir o ângulo de fase oposto àquela harmônica que se deseja atenuar, como sugere o diagrama fasorial ilustrado na figura 2, o qual enfoca o deslocamento necessário para o cancelamento da harmônica de quinta ordem.

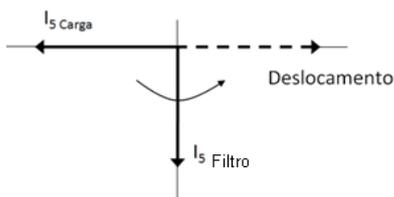


Fig. 2. Diagrama fasorial da compensação harmônica

Na tabela I constam as características construtivas e elétricas do equipamento testado em laboratório (Fig. 1).

TABELA I. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Grandeza	Valor
Tensão Nominal	220 V
Potência Trifásica	7,6kVA
Número de Espiras	68
Seção Transversal (cm ²)	38,6
Comprimento Médio da coluna (cm)	25,3
Comprimento Médio das Culatras (cm)	10,5

A partir de [5] e das características do filtro (tabela I), é possível levantar a curva de saturação do mesmo, tal como se apresenta na figura 3.

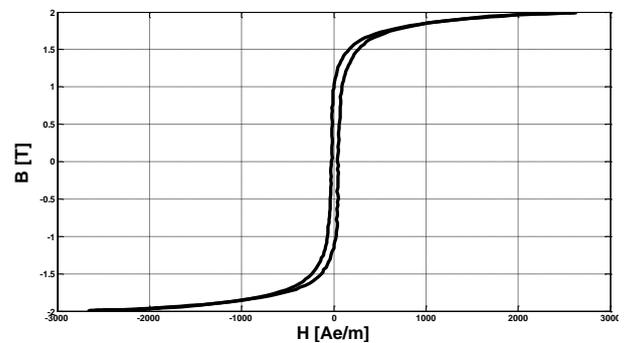


Fig. 3. Curva de saturação do filtro harmônico eletromagnético sob análise.

III. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E SOFTWARE DE CONTROLE DOS DADOS.

Para análise operacional, desenvolveu-se em laboratório uma sistemática de condicionamento e aquisição de dados do sistema ensaiado, utilizando transdutores de tensão e corrente e placas de aquisição de dados (DAQ), da *National Instruments*, conforme figura 4 e [7].

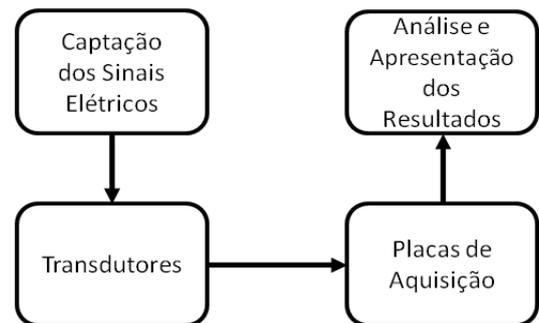


Fig. 4. Diagrama de blocos do sistema de aquisição e análise dos dados.

A tabela II caracteriza os transdutores e as placas de aquisição utilizados nos ensaios.

TABELA II. DADOS DOS TRANSDUTORES E DAQ'S

Transdutor	Modelo	Relação Transformação	Número de voltas no <i>Clamp</i>
Corrente	Fluke i400s – 40A	10mV/A	1
Corrente	LEM-flex RR 3035A	50mV/A	1

Transdutor	Modelo	Relação Transformação
Tensão	220V/6V-0-6V – 500mA	220Vac/6Vac

DAQ	Fabricante	Modelo
1	National Instrument	BNC-2120 6024E
2	National Instrument	cRIO-9215

Posteriormente, em plataforma *LabVIEW*, foi implementado um *software* que monitora em tempo real os sinais elétricos captados pelas DAQ's.

A metodologia de cálculo foi fundamentada na transformada discreta de Fourier, onde se atualiza a cada iteração realizada pelo programa e seus resultados são plotados em gráficos e salvos em documento de texto.

IV. ARRANJO IMPLEMENTADO EM LABORATÓRIO

A. Arranjo ensaiado

O arranjo montado em laboratório constituiu, fundamentalmente, por:

- Fonte de suprimento trifásica controlada Califórnia Instruments 6000L;
- Carga não-linear (retificador trifásico seis pulsos não-controlado);
- Filtro eletromagnético sob enfoque com o dispositivo defasador conectado em série com o mesmo.

A figura 5 ilustra esse esquema.

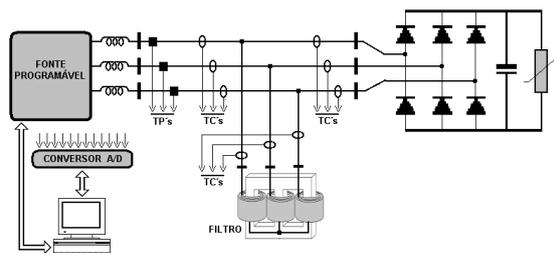


Fig. 5. Esquema montado em laboratório

B. Testes Realizados em Laboratório

Com auxílio do *software* desenvolvido, ajustou-se o elemento defasador na entrada do filtro viabilizando um ponto de operação do sistema. Esse ponto se refere ao melhor índice de filtragem, ou seja, a menor distorção total da corrente da fonte de suprimento, considerando somente o aspecto qualidade da energia elétrica.

As características do sistema em seu estado de operação são evidenciadas na tabela III.

TABELA III. DADOS DO SISTEMA ENSAIADO

	Tensão	Potência	Impedância
Fonte	230 V _{F-F}		
Retificador		2,3 kVA	
Filtro		1,4 kVA	
Elemento Defasador			R _a = 7,9 Ω R _b = 6,4 Ω R _c = 4,5 Ω

A figura 6 ilustra a bancada e os equipamentos montados em laboratório.

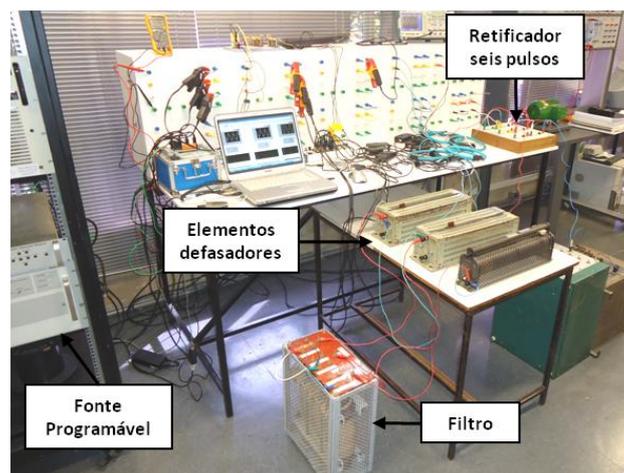


Fig. 6. Bancada de testes em laboratório

Conforme [6], o conteúdo harmônico de uma ponte retificadora trifásica de seis pulsos não-controlada é conhecido, conforme (5).

$$h = 6k \pm 1 \quad (5)$$

Para efeitos práticos, serão ilustrados nas figuras 7, 8 e 9 respectivamente as correntes da fase A na ponte retificadora, no filtro eletromagnético e na fonte supridora.

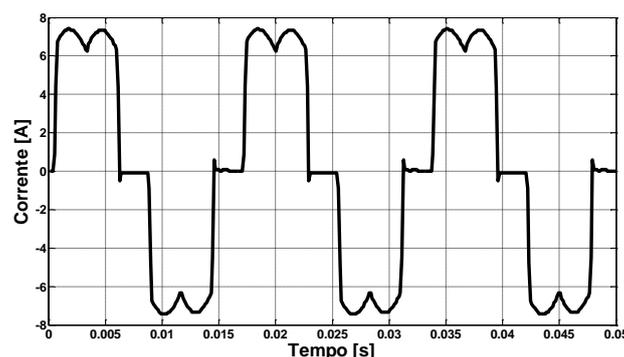


Fig. 7. Corrente de linha na carga não-linear. Caso experimental.

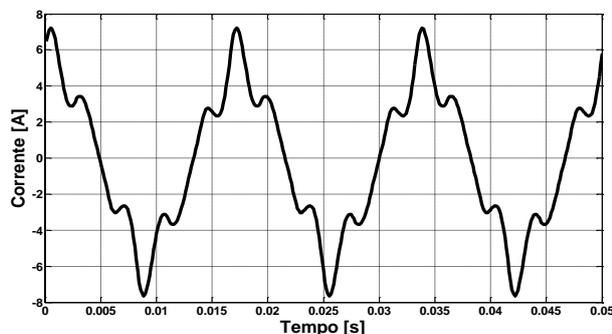


Fig. 8. Corrente de linha no filtro eletromagnético. Caso experimental.

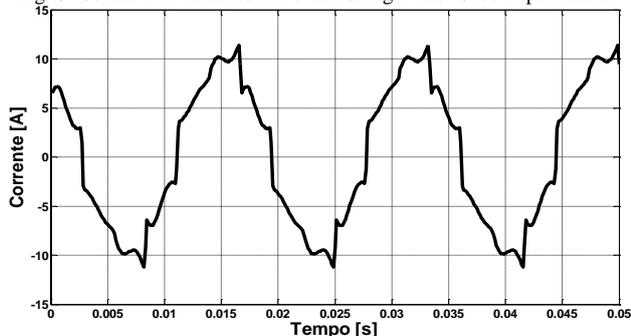


Fig. 9. Corrente de linha na fonte supridora. Caso experimental.

Objetivando fornecer maiores esclarecimentos sobre a operacionalidade do filtro, a tabela IV resume os índices de distorção dos sinais de correntes, da carga, filtro e fonte. As análises compreendem somente os resultados experimentais, sendo informado, na sequência, os resultados computacionais.

TABELA IV. RESULTADOS DO SISTEMA - EXPERIMENTAL

Carga Não-Linear								
I (A)	1	3	5	7	9	11	13	15
Ia	5,45	0,03	1,27	0,59	0,02	0,50	0,32	0,03
Ib	5,47	0,03	1,23	0,62	0,34	0,48	0,35	0,03
Ic	5,27	0,02	1,23	0,58	0,03	0,47	0,31	0,02
Média	5,40	0,03	1,24	0,59	0,13	0,48	0,33	0,03
Irms	5,62							
Filtro Eletromagnético								
Ia	3,74	0,27	0,88	0,36	0,04	0,03	0,04	0,00
Ib	2,87	0,46	0,79	0,29	0,05	0,05	0,03	0,02
Ic	3,45	0,19	0,91	0,27	0,06	0,06	0,01	0,01
Média	3,35	0,30	0,86	0,31	0,05	0,05	0,03	0,01
Irms	3,5 A							
Fonte de Alimentação								
Ia	7,13	0,29	0,39	0,41	0,05	0,45	0,30	0,01
Ib	6,78	0,45	0,46	0,37	0,03	0,45	0,31	0,02
Ic	7,55	0,16	0,37	0,43	0,02	0,44	0,30	0,03
Média	7,16	0,30	0,41	0,40	0,03	0,45	0,30	0,02
Irms	7,22 A							

Para o cálculo dos índices de distorções observados na tabela V, foram utilizados os valores médios das correntes apresentadas na tabela IV.

TABELA V. RESUMO DAS DISTORÇÕES DO SISTEMA - EXPERIMENTAL

Local	DHT _i (%)
Carga Não-Linear	27,80
Filtro Eletromagnético	28,70
Fonte de Alimentação	11,81

Conforme explanado o princípio de filtragem na seção II e a afim de corroborar os resultados alcançados nas tabelas IV e V, a figura 10, (a) e (b), ilustra os fasores correspondentes as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem na carga não-linear e filtro harmônico. Vale ressaltar que a defasagem angular entre os fasores de maior magnitude, corrente de 5ª ordem, ficou bem próxima a 180°. Já a defasagem dos fasores correspondentes a corrente de 7ª ordem (menor magnitude) ficou em torno de 150°, o que propiciou a redução do conteúdo harmônico da corrente de suprimento (figuras 14) conforme as tabelas citadas neste parágrafo.

Vale ressaltar que esta figura evidencia a oposição de fase próxima a 180° (cento e oitenta graus) entre os fasores representativos das correntes citadas.sistema.

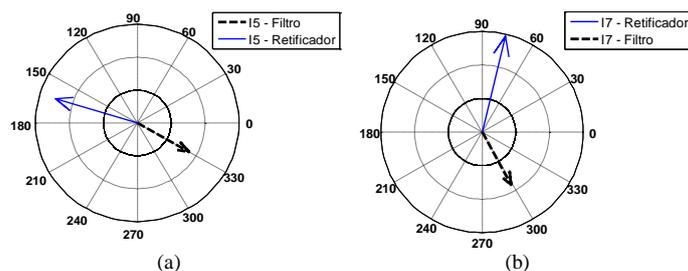


Fig. 10. Fasores correspondentes à carga não-linear a filtro harmônico - (a) 5ª ordem, (b) 7ª ordem - experimental

A. Simulação Computacional

Para fins de modelagem e simulação, utilizou-se um software no domínio do tempo, capaz de representar, fielmente, a curva de saturação do material magnético do qual o filtro é composto, conforme pode ser visto em [4]. A entrada de dados é feita a partir da indicação do número de espiras de cada enrolamento, área da seção magnética, altura da janela, altura do núcleo ferromagnético, etc., além dos pontos de B (campo magnético) e H (intensidade de campo magnético), extraídos do protótipo construído, conforme pôde ser visto na figura 3.

Implementadas as características elétricas e magnéticas do filtro em via computacional [3], o mesmo foi inserido em um sistema modelado idêntico ao ensaiado em laboratório, e sob as mesmas condições de operação, obtendo-se, assim, os resultados apresentados na tabela VI.

TABELA VI. DADOS DO SISTEMA SIMULADO

Carga Não-Linear								
I (A)	1	3	5	7	9	11	13	15
Ia	5,44	0,04	1,24	0,59	0,01	0,45	0,27	0,00
Ib	5,47	0,00	1,25	0,58	0,01	0,47	0,27	0,00
Ic	5,44	0,02	1,27	0,56	0,04	0,47	0,25	0,00
Média	5,45	0,02	1,25	0,58	0,02	0,46	0,26	0,00
Irms	5,65 A							
Filtro Eletromagnético								
Ia	3,68	0,34	0,82	0,28	0,00	0,11	0,07	0,00
Ib	3,08	0,28	0,73	0,32	0,00	0,13	0,11	0,00
Ic	3,41	0,11	0,83	0,13	0,00	0,10	0,07	0,00
Média	3,39	0,24	0,79	0,24	0,00	0,12	0,08	0,00
Irms	3,5 A							
Fonte de Alimentação								
Ia	7,45	0,36	0,45	0,59	0,00	0,46	0,19	0,00
Ib	7,01	0,26	0,56	0,42	0,00	0,45	0,17	0,00
Ic	7,57	0,13	0,53	0,47	0,00	0,45	0,23	0,00
Média	7,34	0,25	0,51	0,49	0,00	0,45	0,20	0,00
Irms	7,39 A							

E da mesma maneira feita para os dados de laboratório, a tabela VII evidencia o resumo das distorções de corrente do sistema simulado.

TABELA VII. RESUMO DAS DISTRORÇÕES DO SISTEMA SIMULADO

Local	DHT _i (%)
Carga Não-Linear	27,09
Filtro Eletromagnético	25,82
Fonte de Alimentação	12,28

Para se ter um comparativo visual, as figuras 11, 12 e 13 ilustram as formas de ondas das correntes do circuito simulado, as quais condizem com o caso prático.

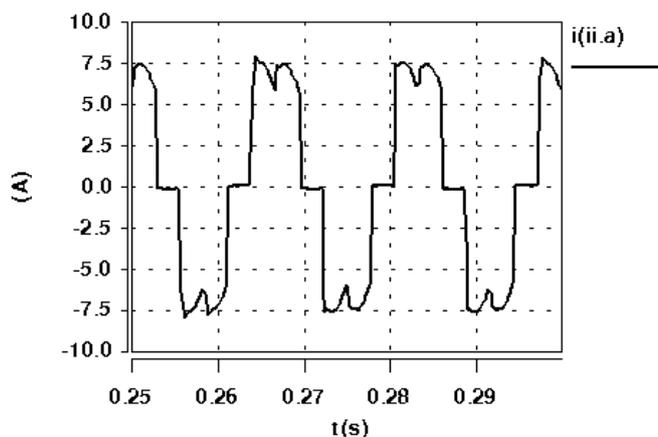


Fig. 11. Corrente de linha na carga não-linear. Caso simulado.

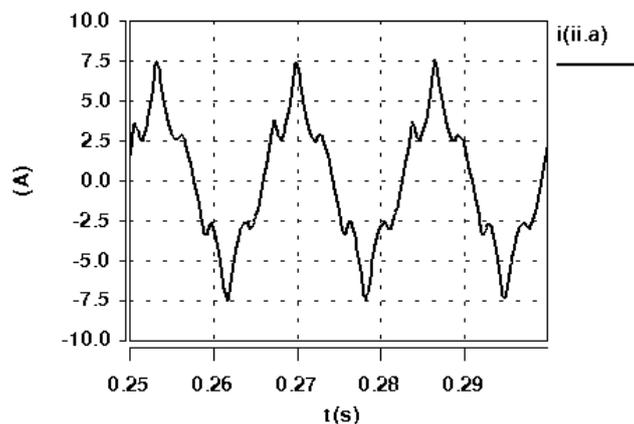


Fig. 12. Corrente de linha no filtro eletromagnético. Caso simulado.

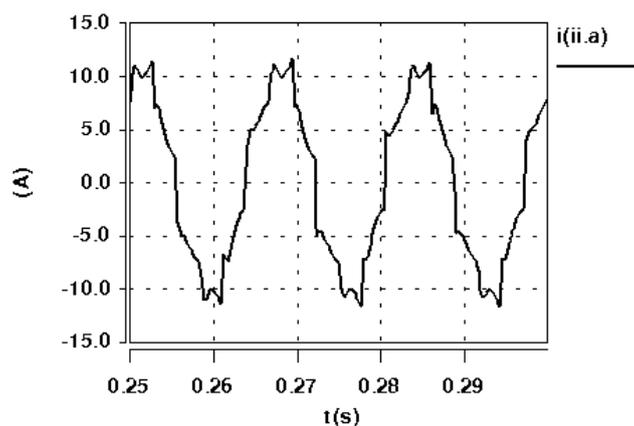


Fig. 13. Corrente de linha na fonte supridora. Caso simulado.

Conforme explorado na seção II, princípio de funcionamento do filtro, e observado os resultados das tabelas V e VII pode-se constatar que a fundamentação teórica foi validada, ou seja, houve um deslocamento angular dos fasores de 5ª e 7ª harmônica do filtro com a inserção e ajuste do elemento defasador. Como já mencionado para o caso experimental a defasagem angular entre os fasores de maior magnitude, corrente de 5ª ordem, ficou bem próxima a 180°. Já a defasagem dos fasores correspondentes a corrente de 7ª ordem (menor magnitude) ficou em torno de 150°, o que propiciou a redução do conteúdo harmônico da corrente de suprimento (figuras 14).

Nestas tabelas, é possível evidenciar que o nível de distorção da carga (ordem de 27%) foi reduzido para ordem de 11%. Uma diminuição considerável ao se considerar o contexto da qualidade da energia elétrica.

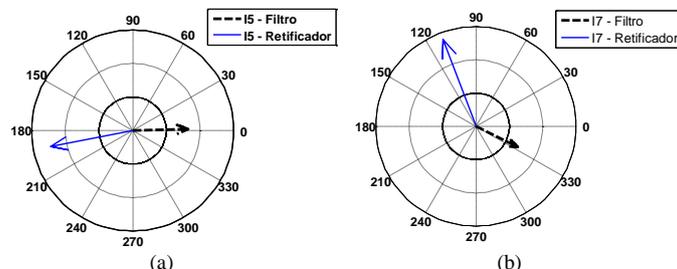


Fig. 14. Fasores correspondentes à carga não-linear a filtro harmônico - (a) 5ª ordem, (b) 7ª ordem - simulação

V. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA VERSUS EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A fim de analisar a operação do filtro eletromagnético sob o enfoque eficiência energética percebe-se que o sistema operando sem o filtro solicitaria da fonte uma corrente eficaz de 5,62 A e 5,65 A (laboratório e simulação). Inserindo o filtro nesse sistema, além da redução do conteúdo harmônico apresentada houve elevação na corrente eficaz do sistema de 28% e 31%, ou seja, a corrente solicitada da fonte passa a ser de 7,22 A e 7,39 A para o caso experimental e simulado.

Visando analisar a eficiência e qualidade da energia do sistema experimental (Fonte, Retificador e Filtro), aplicaram-se diversos níveis de tensões e monitorou-se a distorção harmônica e o acréscimo da corrente solicitada da fonte. Nota-se, como era de se esperar, que quanto mais saturado o filtro estiver melhor vai ser seu desempenho frente à QEE, porém os índices de eficiência ficam comprometidos. A figura 15 ilustra esse comportamento e define o ponto de operação que fora escolhido para o presente estudo, que se trata do ponto de intersecção entre as curvas de índice de qualidade e eficiência.

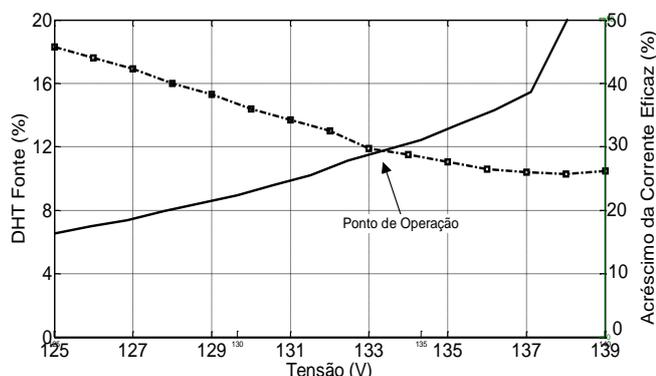


Fig. 15. Índices de distorção da corrente na fonte e percentual de acréscimo de corrente eficaz devido à operação do filtro.

Observando a operação do filtro, sabe-se que é inevitável o aumento da corrente eficaz da fonte, porém, não se pode deixar de enfatizar sua função na mitigação das harmônicas. Uma vertente dessa investigação tenta corrigir o desbalanço das correntes solicitadas da rede, pois devido à característica geométrica planar do seu núcleo magnético, o fluxo magnético proveniente da coluna central é diferente dos percorridos pelas colunas um e três, o que ocasiona correntes de magnitudes desiguais, provocando harmônicas indesejáveis de 3ª ordem. Diante disso, faz-se necessário que a coluna da fase B, que apresenta menor caminho magnético que das fases A e C, opere de forma mais saturada. Neste sentido, existem duas possibilidades: redução do número de espiras do enrolamento da fase B ou redução da seção transversal da coluna B do núcleo. Análises neste sentido têm levado a resultados promissores.

VI. SÍNTESE DOS RESULTADOS

As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por

distorções totais de corrente em torno de 27%, o qual foi reduzido 43%, resultando uma distorção de corrente na fonte de cerca de 11%.

No que tange às correntes do filtro eletromagnético, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo, operando de forma saturada e com neutro isolado, se apresenta como uma carga não-linear com geração de harmônicas de sequência positiva e negativa, sendo a 5ª e 7ª ordens as que se manifestam com maiores amplitudes. O aparecimento da 3ª ordem (baixo valor) se justifica pela sua geometria planar, como já mencionado anteriormente. Como mencionado, estudos estão sendo executados nessa e em outras vertentes para a minimização deste efeito colateral.

O *software* desenvolvido em plataforma LabVIEW para aquisição e controle dos dados medidos em laboratório se fez bem satisfatório pois proporciona um acompanhamento *online* dos ensaios, bem como apresenta seus resultados em gráficos e arquivos de texto para melhor tratamento em outros programas.

Quanto aos resultados de simulação e ensaios experimentais evidenciaram uma boa aderência. Isto ocorreu tanto para as formas de onda quanto para os valores obtidos. Desta forma, fica esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do filtro de sequência positiva e negativa.

Por fim, análises envolvendo eficiência energética foram realizados, evidenciando o aspecto já conhecido entre as áreas QEE e Eficiência Energética, ou seja, à medida que são melhorados os indicadores de QEE, a eficiência energética se torna menor (consumo se torna maior) e vice-versa. Estudos neste sentido se tornam de extrema importância e estão sendo implementados.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., Electrical power systems quality – 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] BELCHIOR, F. N., OLIVEIRA, J. C., OLIVEIRA, L. C. O., Capítulo VI - Validação experimental do filtro harmônico de sequência positiva e negativa. Revista O Setor Elétrico, São Paulo-SP, p. 42-49, agosto 2009.
- [3] 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).
- [4] BELCHIOR, F. N., Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos através de Dispositivos Eletromagnéticos, Uberlândia: UFU, 2006 (Tese, Doutorado).
- [5] FUCHS, E. F., YOU, Y., "Measurement of λ -i characteristics of asymmetric three-phase transformers and their applications", Proceedings on 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 1, pp. 91-96, Oct. 2000.
- [6] RODRIGUES, K. D., Conversores de Freqüência no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica, Uberlândia: UFU, 2001 (Tese Doutorado).
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS – Data Acquisition (DAQ). Site: <http://www.ni.com/dataacquisition/> Acesso: Fevereiro 2011.

FILTRAGEM DE HARMÔNICOS ATRAVÉS DE ARRANJOS ELETROMAGNÉTICOS – QUALIDADE DA ENERGIA VERSUS EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

M. S. M. Alves, Eng.; F. N. Belchior, Dr., IEEE Member; R. C. Padilha, acad.; G. J. Sales, acad.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, nº 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá-MG.

Abstract: This paper presents an approach on the use of a saturated core reactor as an alternative to reduce harmonic levels of positive and negative sequence currents in a system containing an uncontrolled three-phase six pulse rectifier. With the aid of a software developed in the LabVIEW® platform for acquisition and data processing, analysis include experimental tests involving the operation of a prototype built. From these data, performance comparisons between Power Quality and Energy Efficiency have been made. *Copyright © 2011 CBEE/ABEE*

Keywords: Electromagnetic Harmonic Filter, Power Quality, Energy Efficiency

Resumo: Este artigo apresenta uma abordagem sobre a utilização de um reator a núcleo saturado como alternativa de redução de níveis harmônicos de corrente de sequência positiva e negativa em um sistema contendo uma carga retificadora trifásica de seis pulsos não-controlada. Com auxílio de um *software* desenvolvido na plataforma LabVIEW® para aquisição e tratamento dos dados, as análises compreendem ensaios experimentais envolvendo a operação de um protótipo construído. De posse desses dados, comparações de desempenho entre Qualidade da Energia Elétrica e Eficiência Energética foram realizadas.

Palavras Chaves: Filtro Harmônico Eletromagnético, Qualidade da Energia, Eficiência Energética.

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética tem sido, nos últimos anos, um fator de desenvolvimento e de diferenciação das sociedades modernas. A busca por tecnologias e por processos mais eficientes sob o ponto de vista energético tem reduzido a intensidade no uso da energia, trazendo consigo consequências na qualidade dos sinais elétricos, causa que gerou certa preocupação no cenário da qualidade da energia e do serviço por parte das concessionárias. Diante disso, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem se tornado uma das áreas de maior interesse para consumidores e concessionários de energia. O termo QEE tem sido empregado para englobar uma grande variedade de distúrbios nos sistemas elétricos. Tais distúrbios podem originar-se e/ou manifestar-se em diferentes pontos da rede elétrica, os quais podem ser de natureza local, ou seja, uma perturbação que ocorre dentro da instalação do consumidor, ou de natureza

externa ou remota. Normalmente, associa-se QEE à qualidade de tensão, já que existe um padrão bem determinado para medidas de tal grandeza, sendo o foco a manutenção da tensão dentro de certos limites.

Dentro desse contexto, pode-se agrupar os principais fenômenos associados à QEE da seguinte forma [1]:

- Variações Instantâneas de;
- Variações Momentâneas de;
- Variações Sustentadas de Tensão;
- Variações Momentâneas de Frequência;
- Distorção Harmônica.

Dentro destes fenômenos, este artigo enfoca as distorções harmônicas, que são definidas como sinais elétricos (tensões ou correntes) não-senoidais que podem ser representadas como uma somatória de ondas senoidais puras, cada qual constituída por uma frequência múltipla inteira da frequência fundamental da onda original [1].

topologia associada à operação de filtros eletromagnéticos, baseada no uso de um reator a núcleo saturado trifásico [2,3,4]. Tentando contribuir nesta direção, este artigo analisa um aspecto importante na operação deste filtro, qual seja, a relação entre a qualidade da energia elétrica e a eficiência energética envolvida.

2 FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de sequência positiva e negativa, conforme figura 1, fundamenta-se num reator a núcleo saturado trifásico. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação. Construtivamente, este equipamento tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não-linearidade da curva B x H do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação. De fato, a isto se deve o expressivo conteúdo harmônico das suas correntes de alimentação e neste ponto concentra-se o princípio da compensação harmônica aqui focada [2, 3, 4].



Figura 1: Filtro Eletromagnético de Sequência Positiva e Negativa.

Para viabilizar a citada compensação, de um modo ideal, a geração harmônica, por parte do dispositivo sob análise, deve apresentar a mesma magnitude, porém ângulos de fase opostos ao conteúdo harmônico produzido pela carga retificadora a ser compensada, conforme (1-4).

$$|I_{C5}| = |I_{F5}| \quad (1)$$

$$\theta_{C5} = (\theta_{F5} \pm \pi) \quad (2)$$

$$|I_{C7}| = |I_{F7}| \quad (3)$$

$$\theta_{C7} = (\theta_{F7} \pm \pi) \quad (4)$$

Sendo:

I_{C5} e I_{C7} : Correntes de 5ª e 7ª ordens da carga, respectivamente;

I_{F5} e I_{F7} : Correntes de 5ª e 7ª ordens do filtro harmônico, respectivamente;

θ_{C5} e θ_{C7} : Ângulos de fase das harmônicas da carga de 5ª e 7ª ordem;

θ_{F5} e θ_{F7} : Ângulos de fase das harmônicas do filtro de 5ª e 7ª ordem.

De forma a propiciar a defasagem necessária entre os harmônicos produzidos pelo filtro eletromagnético e aqueles gerados pela carga não-linear, torna-se imprescindível a incorporação de um mecanismo defasador que venha introduzir um deslocamento angular no fluxo concatenado e, por conseguinte, na corrente de alimentação do filtro. Um ajuste adequado da defasagem pode, portanto, produzir o ângulo de fase oposto àquela harmônica que se deseja atenuar, como sugere o diagrama fasorial ilustrado na figura 2, o qual enfoca o deslocamento necessário para o cancelamento da 5ª ordem harmônica.

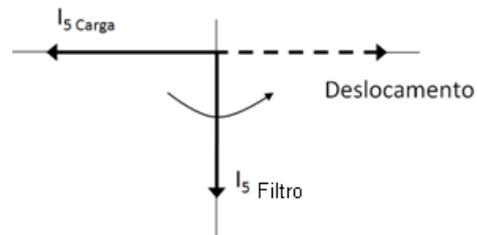


Figura 2: Diagrama fasorial da compensação harmônica da 5ª ordem

Na tabela 1 consta as características construtivas e elétricas do equipamento testado em laboratório (Fig. 1).

Tabela 1: Características Nominais do Filtro Eletromagnético

Grandeza	Valor
Tensão Nominal (V)	220
Potência Trifásica (kVA)	3
Número de Espiras	68
Seção Transversal (cm ²)	38,6
Comprimento Médio da Coluna (cm)	25,3
Comprimento Médio das Culas (cm)	10,5

A partir de [5] e das características do filtro (tabela 1), é possível levantar a curva de saturação do mesmo utilizando-se de 110% da tensão nominal, tal como se apresenta na figura 3.

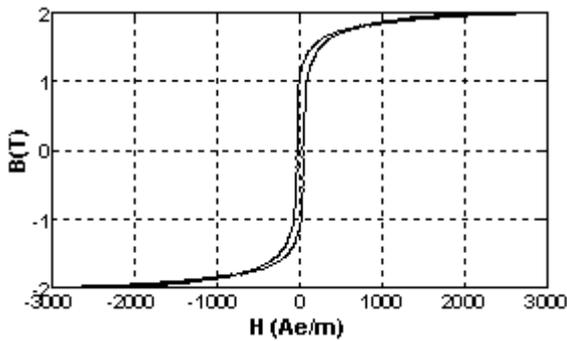


Figura 3: Curva de saturação do filtro harmônico eletromagnético sob análise.

Como se pode verificar na figura 3, o dispositivo utilizado para a filtragem harmônica sob enfoque, qual seja, o filtro eletromagnético, opera na zona saturada.

3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E SOFTWARE DE CONTROLE DOS DADOS

Para análise operacional, desenvolveu-se em laboratório uma sistemática de condicionamento e aquisição de dados do sistema ensaiado, utilizando transdutores de tensão e corrente e placas de aquisição de dados (DAQ), da *National Instruments*, conforme figura 4.

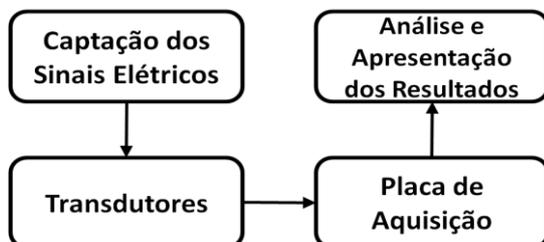


Figura 4: Diagrama de blocos do sistema de aquisição e análise dos dados.

A tabela 2 caracteriza os transdutores e as placas de aquisição utilizados nos ensaios.

Tabela 2: Dados dos Transdutores e DAQ's

Transdutor	Modelo	Relação Transformação	Número de voltas no <i>Clamp</i>
Corrente	Fluke i400s - 40A	10mV/A	1
Corrente	LEM-flex RR 3035A	50mV/A	1

Transdutor	Modelo	Relação Transformação
Tensão	220V/6V-0-6V - 500mA	220Vac/6Vac
DAQ	Fabricante	Modelo
1	<i>National Instruments</i>	BNC-2120 - 6024E
2	<i>National Instruments</i>	cRIO-9215

Posteriormente, em plataforma *LabVIEW*, foi implementado um *software* que monitora em tempo real os sinais elétricos captados pelas DAQ's.

A metodologia de cálculo foi fundamentada na transformada discreta de Fourier, onde se atualiza a cada iteração realizada pelo programa e seus resultados são plotados em gráficos e salvos em documento de texto.

4 ARRANJO IMPLEMENTADO EM LABORATÓRIO

4.1 Arranjo ensaiado

O arranjo montado em laboratório e mostrado na figura 5, é constituído, fundamentalmente, por:

- Fonte de suprimento trifásica controlada Califórnia Instruments 6000L;
- Carga não-linear (retificador trifásico de 6 pulsos não-controlado);
- Filtro harmônico eletromagnético com o dispositivo defasador conectado em série com o mesmo, constituído de 3 resistores, sendo 1 por fase.

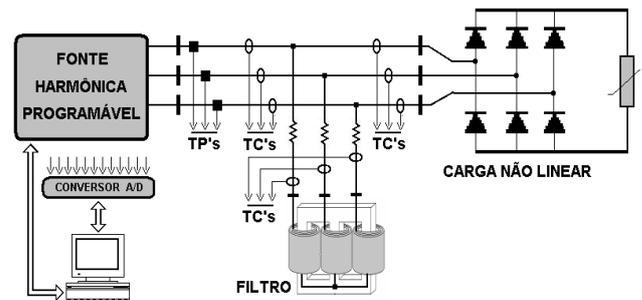


Figura 5: Esquema montado em laboratório

4.2 Testes Realizados em Laboratório

Com auxílio do *software* desenvolvido, ajustou-se o elemento defasador na entrada do filtro, viabilizando um ponto de operação do sistema. Esse ponto se refere ao melhor índice de filtragem, ou seja, a menor distorção total da corrente da fonte de suprimento, considerando somente o aspecto qualidade da energia elétrica.

As características do sistema em seu estado de operação são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Dados do Sistema Ensaiado

	Tensão	Potência	Impedância
Fonte	230 V _{F-F}		
Retificador		2,3 kVA	
Filtro		1,4 kVA	
Elemento Defasador			R _a = 7,9 Ω R _b = 6,4 Ω R _c = 7,2 Ω

A figura 6 ilustra a bancada e os equipamentos montados em laboratório.

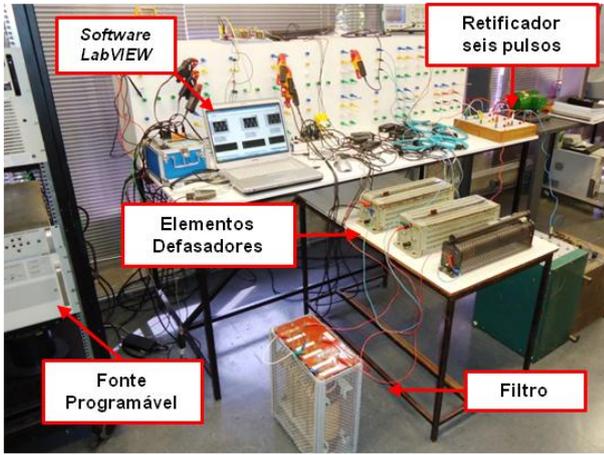


Figura 6: Bancada de testes em laboratório

Sabe-se, de acordo com [6], que o conteúdo harmônico de uma ponte retificadora trifásica de seis pulsos não-controlada é dado por (5).

$$h = 6k \pm 1 \quad (5)$$

Para efeitos práticos, serão ilustrados nas figuras 7, 8 e 9, respectivamente, as correntes da fase A na ponte retificadora, no filtro eletromagnético e na fonte supridora.

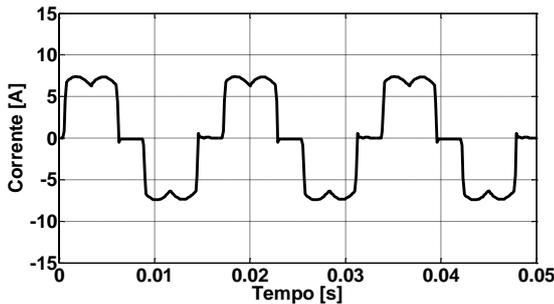


Figura 7: Corrente de linha na carga não-linear.

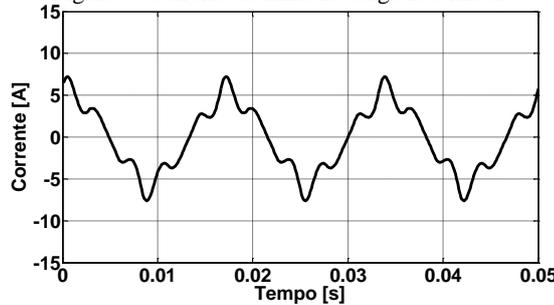


Figura 8: Corrente de linha no filtro eletromagnético.

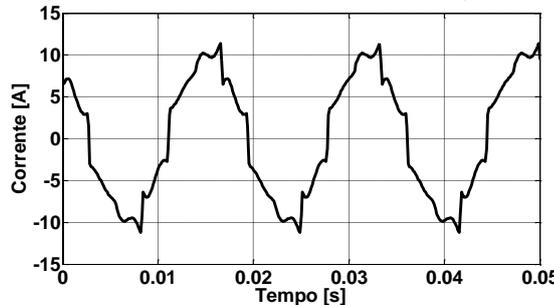


Figura 9: Corrente de linha na fonte supridora.

Para esclarecimentos sobre a operacionalidade do filtro, a tabela 4 resume os índices de distorção dos sinais de correntes, da carga, filtro e fonte.

Tabela 4: Resultados dos testes em laboratório

		Carga Não-Linear							
I (A)		1	3	5	7	9	11	13	15
Ia		5,41	0,01	1,25	0,61	0,005	0,49	0,34	0,007
Ib		5,47	0,02	1,22	0,60	0,003	0,48	0,34	0,002
Ic		5,37	0,009	1,20	0,59	0,005	0,47	0,33	0,007
Média		5,44	0,01	1,22	0,60	0,004	0,48	0,34	0,005
Irms		5,62							
		Filtro Eletromagnético							
Ia		3,63	0,25	0,88	0,36	0,04	0,05	0,03	0,01
Ib		2,94	0,40	0,80	0,25	0,08	0,08	0,03	0,02
Ic		3,51	0,14	0,93	0,33	0,05	0,04	0,01	0,01
Média		3,36	0,26	0,87	0,31	0,06	0,05	0,02	0,01
Irms		3,49 A							
		Fonte de Alimentação							
Ia		7,19	0,23	0,44	0,26	0,03	0,50	0,31	0,01
Ib		6,92	0,42	0,45	0,37	0,09	0,46	0,30	0,01
Ic		7,18	0,14	0,37	0,26	0,04	0,45	0,32	0,01
Média		7,10	0,27	0,42	0,30	0,05	0,47	0,31	0,01
Irms		7,14 A							

Para o cálculo dos índices de distorções mostrados na tabela 5, foram utilizados os valores médios das correntes apresentadas na tabela 4.

Tabela 5: Resumo das Distorções dos Testes em Laboratório

Local	DHT _i (%)
Carga Não-Linear	27,52
Filtro Eletromagnético	29,25
Fonte de Alimentação	11,64

A fim de corroborar os resultados alcançados, a figura 10 (a) e (b) ilustra os fasores correspondentes à 5ª e 7ª ordem na carga retificadora e filtro harmônico.

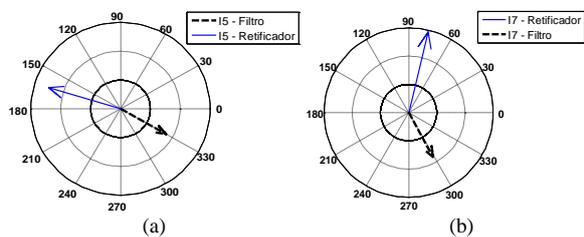


Figura 10: Fasores correspondentes à carga retificadora e ao filtro harmônico - (a) 5ª ordem, (b) 7ª ordem

Como última análise deste item, vale ressaltar sobre a geração da 3ª ordem por parte do filtro. Devido ao fato do filtro operar isolado, esta se encontra em sequência de fase positiva e negativa. No entanto, ela se apresenta somente com 7% com relação ao valor da

fundamental. Estudos estão sendo realizados no sentido de diminuir este percentual.

5 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA VERSUS EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

5.1 Análise do Ponto de Operação

A fim de analisar a operação do filtro eletromagnético sob o enfoque eficiência energética, percebe-se que os resultados apresentam uma elevação na corrente eficaz do sistema (fonte de alimentação) em torno de 27%, em virtude da operação do filtro, o que acarreta, conseqüentemente, um aumento correspondente no consumo de energia elétrica.

Visando um ponto de equilíbrio entre eficiência energética e qualidade, foi testado diversos níveis de tensão no sistema apresentado, utilizando, para tanto, a fonte programável de tensão. Os resultados, ilustrados na tabela 8, contemplam índices de distorção e acréscimo na corrente eficaz da fonte.

Tabela 8: Índices de Distorção e Eficiência do Caso

V_{FN} Fonte (V)	DHT _i Carga	DHT _i Fonte	Acréscimo de I_{RMS} da Fonte (%)
125	28,0	18,3	16,2
126	28,0	17,6	17,3
127	28,0	16,9	18,3
128	28,0	16	19,7
129	28,0	15,3	20,9
130	28,0	14,4	22,2
131	28,0	13,7	23,8
132	28,0	13	25,1
133	28,0	11,8	28,3
134	28,0	11,5	29,2
135	28,0	11,05	30,9
136	28,0	10,6	33,3
137	28,0	10,4	35,5
138	28,0	10,3	38,4
139	28,0	10,47	49,9

Para melhor visualização, esses resultados foram apresentados em forma de gráfico, conforme a figura 11. Vale ressaltar que o estado de operação do sistema foi adotado no ponto de intersecção entre as curvas de índice de qualidade e eficiência.

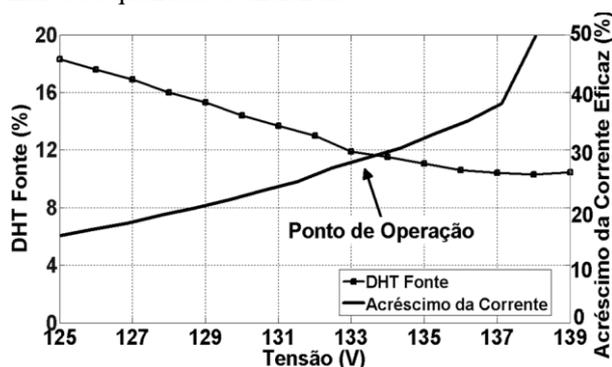


Figura 11: Índices de distorção da corrente na fonte e percentual de acréscimo de corrente eficaz devido à operação do filtro.

Observando a operação do filtro, sabe-se que é inevitável o aumento da corrente eficaz da fonte, porém, não se pode deixar de enfatizar sua função na mitigação das harmônicas. Uma vertente dessa investigação tenta corrigir o desbalanço das correntes solicitadas da rede, pois devido à característica geométrica planar do seu núcleo magnético, o fluxo magnético proveniente da coluna central é diferente dos percorridos pelas colunas A e C, o que ocasiona correntes de magnitudes desiguais, provocando harmônicas indesejáveis de 3ª ordem. Diante disso, faz-se necessário que a coluna da fase B, que apresenta menor caminho magnético que das fases A e C, opere de forma mais saturada. Neste sentido, existem duas possibilidades: redução do número de espiras do enrolamento da fase B ou redução da seção transversal da coluna B do núcleo. Análises neste sentido têm levado a resultados promissores.

5.2 Análise das Potências

Complementando a análise de eficiência *versus* qualidade da energia, foram calculadas, através dos valores colhidos em laboratório, as potências ativa (P), reativa de deslocamento (Q) e de distorção (D) e, conseqüentemente, potência aparente (S) do sistema. O método de cálculo efetuado para a potência reativa de distorção é apresentado em (6) e para fins práticos as expressões das demais potências poderão ser observadas em [1].

A tabela 9 e a figura 12 resumem as potências envolvidas no sistema.

$$D = V \cdot I \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{I_1}{I}\right)^2} \quad (6)$$

Tabela 9: Potências Envolvidas no Sistema Considerado

	Carga Retificadora	Fonte
$P_{3\phi}$ (W)	2.140,58	2.435,29
$Q_{3\phi}$ (VAr)	47,68	1.352,58
$D_{3\phi}$ (VAr)	592,94	327,95
$S_{3\phi}$ (VA)	2.221,70	2.804,79

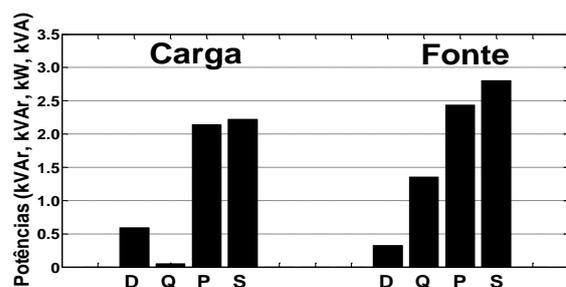


Figura 12: Potências Envolvidas no Sistema Considerado.

Quanto às variações de potências na fonte devido à inserção do filtro de sequência positiva e negativa, observam-se as maiores alterações nas potências reativas de deslocamento e de distorção, conforme a tabela 10. Isso se dá em virtude das características do dispositivo de filtragem, ou seja, a potência relacionada às harmônicas houve uma redução considerável na fonte, como era de se esperar após o processo de filtragem, já o aumento de reativo solicitado da rede advém da característica predominantemente indutiva do filtro. Quanto à elevação da potência ativa ficou na ordem de 14% e da potência aparente, e a interação entre todas as potências, ficou por volta de 26%.

Tabela 10: Variação de potências na fonte em relação ao retificador

D	Q	P	S
- 44,7 %	2.736,8 %	13,8 %	26,24 %

Diante o aumento de reativo solicitado junto ao sistema de suprimento, faz-se necessário averiguar o comportamento do novo fator de potência verdadeiro do sistema, calculado conforme (6).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

A tabela 11 ilustra esses valores.

Tabela 11: Fatores de Potências do Sistema

	Carga	Fonte
FP	0,963	0,868

Dos valores apresentados na tabela 11, percebe-se que o fator de potência da fonte ficou abaixo do regulamentado pelos órgãos oficiais, porém, vale ressaltar que o sistema ensaiado em laboratório trata-se, comumente, de uma parcela de cargas constantes em uma unidade consumidora, ou seja, o fator de potência o qual fica sob análise da concessionária é o equivalente da interação de todas as cargas da empresa.

6 ANÁLISE DE CUSTOS DE AQUISIÇÃO

Visando tecer comentários preliminares que abrangem custos relacionados ao dispositivo em questão, foi orçado o mesmo e um filtro sintonizado (frequências de sintonia: 5ª e 7ª harmônica) de mesma potência e tensão nominal conforme tabela 12. Essa abordagem visa comparar custos de aquisição entre um filtro sintonizado, comumente comercializado no mercado, e o filtro de sequência positiva e negativa, explorado neste trabalho.

Tabela 12: Custos associados aos filtros harmônicos

	Fabricante	Vn	Sn	Custo
Sintonizado	1	220	3 kVAr	R\$ 3.000,00*
Eletromag.	2	220	3 kVAr	R\$ 2.500,00*

Fabricante Vn Sn Custo

Seq + e -

(*) Inserido 18% de ICMS.

Como se pode observar, o equipamento em questão possui ligeira vantagem no que tange ao custo. Vale lembrar que este equipamento não possui linha de fabricação existente nas empresas do ramo, ou seja, esse valor tende a ser mais competitivo quando se tornar item de catálogo. É válido ressaltar que estudos estão sendo realizados no sentido de considerar nos custos da implantação deste dispositivo, o consumo maior de potência ativa, considerando o valor do kWh em empresas alimentadas em média e alta tensão.

7 SÍNTESE DOS RESULTADOS

As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais de corrente em torno de 27%, o qual foi reduzido em aproximadamente, 60%, resultando em uma distorção de corrente na fonte de suprimento de cerca de 11%.

No que tange às correntes do filtro eletromagnético, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo, operando de forma saturada e com neutro isolado, se apresenta como uma carga não-linear com geração de harmônicas de sequência positiva e negativa, sendo a 5ª e 7ª ordens as que se manifestam com maiores amplitudes. O aparecimento da 3ª ordem (baixo valor) se justifica pela sua geometria planar, e, como mencionado, estudos estão sendo executados nessa e em outras vertentes para a minimização deste efeito colateral.

O *software* desenvolvido em plataforma LabVIEW para aquisição e controle dos dados medidos em laboratório se fez bem satisfatório pois proporciona um acompanhamento *online* dos ensaios, bem como apresenta seus resultados em gráficos e arquivos de texto para melhor tratamento em outros programas.

As análises realizadas envolvendo eficiência energética podem reforçar o aspecto já conhecido entre as áreas QEE e Eficiência Energética, ou seja, à medida que são melhorados os aspectos relacionados à eficiência energética, a QEE se torna menor (aumento poluição nos sinais elétricos) e vice-versa. Tendo como foco a análise das potências do sistema considerado, pode-se observar que a variação de potência na fonte, com a inserção do filtro eletromagnético, foi mais considerável no aumento de reativos solicitado da rede, cerca de 2.700,00%, e na redução da potência de distorção, em torno de 45%, aqui denominada de potência reativa de distorção.

Por fim, a análise de custo conclui que o dispositivo em questão pode se tornar mais uma opção no mercado de mitigação de harmônicas, pois seu custo, tende a se tornar bem competitivo no mercado, após o mesmo se tornar um item cuja fabricação possua uma linha de produção estabelecida.

8 AGRADECIMENTOS

Nosso reconhecimento e gratidão à CAPES pelos recursos concedidos para o desenvolvimento desta pesquisa.

9 REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., *Electrical power systems quality – 2nd ed.*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] BELCHIOR, F. N., OLIVEIRA, J. C., OLIVEIRA, L. C. O., Capítulo VI - Validação experimental do filtro harmônico de sequência positiva e negativa. *Revista O Setor Elétrico*, São Paulo-SP, p. 42-49, agosto 2009.
- [3] VASCONCELLOS, A. B., Modelagem e análise de desempenho de compensadores estáticos a reator à núcleo saturado no contexto da qualidade da energia, *Tese, Doutorado*, Uberlândia: UFU, 2004.
- [4] BELCHIOR, F. N., Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos através de Dispositivos Eletromagnéticos, *Tese, Doutorado*, Uberlândia: UFU, 2006.
- [5] FUCHS, E. F., YOU, Y., “Measurement of λ -i characteristics of asymmetric three-phase transformers and their applications”, *Proceedings on 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Vol. 1, pp. 91-96, Oct. 2000.
- [6] RODRIGUES, K. D., Conversores de Freqüência no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica, *Tese Doutorado*, Uberlândia: UFU, 2001.

Filtragem de Harmônicos de Sequência Positiva e Negativa Através de Arranjos Eletromagnéticos - Considerações de Projeto

M. S. M. Alves, Eng.; F. N. Belchior, Dr., *IEEE Member*; J. M. C. Filho, *IEEE Member*.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, nº 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá-MG

Resumo — Este artigo apresenta considerações de projeto do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa. Este dispositivo é fundamentado no reator a núcleo saturado, que se trata de uma alternativa de redução de níveis harmônicos de corrente de sequência positiva e negativa em um sistema contendo uma carga retificadora trifásica de seis pulsos não-controlado, cujo conteúdo harmônico e ângulo de fase são conhecidos. O estudo contempla o desenvolvimento de um equacionamento que resulta em um roteiro de projeto do dispositivo em questão. A validação do projeto é feita através de simulação na plataforma ATP – *Alternative Transients Program*.

Palavras-chaves — Correntes harmônicas de sequência positiva e negativa, filtro harmônico, qualidade da energia, reator a núcleo saturado.

I. INTRODUÇÃO

Os estudos de mitigação harmônica podem ter diversas formas distintas como regulações, desenvolvimento de equipamentos com baixo nível de distorção de corrente, reconfiguração da estrutura do sistema e instalação de equipamentos para supressão harmônica, utilizados em situações onde os requisitos de regulação harmônica não podem ser cumpridos.

Dentre as alternativas relatadas como possíveis estratégias para a eliminação/redução das correntes harmônicas, aquelas associadas aos filtros passivos, ativos e eletromagnéticos são, comumente, as mais empregadas [4], [2] e [1]. Este artigo abordará os dispositivos eletromagnéticos utilizados para atenuação de harmônicos [3], [4].

Estes, uma vez concebidos, projetados e construídos em consonância com seus objetivos específicos, podem ser classificados em dois grandes grupos: um primeiro voltado para o controle das componentes de sequência zero e um segundo destinado à atenuação das componentes de sequência positiva e negativa.

Para o dispositivo focado nas harmônicas de sequência zero, o processo de filtragem consiste na utilização de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se obtém um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância quando se comparado ao restante do circuito elétrico ao qual pertence o dispositivo [1].

O dispositivo foco desse estudo fundamenta-se em um reator a núcleo saturado trifásico [4], [6] e [7]. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão defasadas objetivando compensar as harmônicas geradas por um retificador trifásico não controlado. Este equipamento se constitui de um núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não-linearidade da curva BxH do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação. Toda conceituação e desenvolvimento matemático deste dispositivo se resumem em [6] e [7].

II. FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de sequência positiva e negativa, conforme protótipo mostrado na figura 1, fundamenta-se, com já mencionado, em um reator a núcleo saturado trifásico. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação. A não-linearidade da curva B x H do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação. De fato, a isto se deve o expressivo conteúdo harmônico das suas correntes de alimentação e neste ponto concentra-se o princípio da compensação harmônica aqui focada.



Fig. 1. Filtro Eletromagnético de Sequência Positiva e Negativa.

Para viabilizar a citada compensação, de um modo ideal, a geração harmônica, por parte do dispositivo sob análise, deve apresentar a mesma magnitude, porém ângulos de fase opostos ao conteúdo harmônico produzido pela carga não-linear a ser compensada, conforme (1-4).

$$|I_{C5}| = |I_{F5}| \quad (1)$$

$$\theta_{C5} = (\theta_{F5} \pm \pi) \quad (2)$$

$$|I_{C7}| = |I_{F7}| \quad (3)$$

$$\theta_{C7} = (\theta_{F7} \pm \pi) \quad (4)$$

Onde:

I_{C5} e I_{C7} : Correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens da carga, respectivamente;

I_{F5} e I_{F7} : Correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens do filtro harmônico, respectivamente;

θ_{C5} e θ_{C7} : Ângulos de fase das harmônicas da carga de 5ª e 7ª ordem;

θ_{F5} e θ_{F7} : Ângulos de fase das harmônicas do filtro de 5ª e 7ª ordem.

De forma a propiciar a defasagem necessária entre os harmônicos produzidos pelo filtro eletromagnético e aqueles gerados pelas cargas não-lineares, torna-se imprescindível a incorporação de um mecanismo defasador que venha introduzir um deslocamento angular no fluxo concatenado e, por conseguinte, na corrente de alimentação do filtro. Um ajuste adequado da defasagem pode, portanto, produzir o ângulo de fase oposto àquela harmônica que se deseja atenuar, como sugere o diagrama fasorial ilustrado na figura 2, o qual enfoca o deslocamento necessário para o cancelamento da harmônica de quinta ordem.

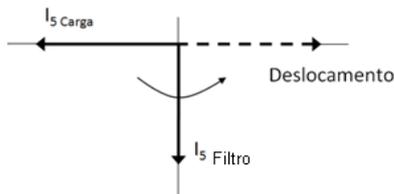


Fig. 1. Diagrama fasorial da compensação harmônica

III. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Com vista à obtenção do modelo matemático proposto como roteiro de projeto para simulação computacional e construção de um protótipo, a abordagem será baseada em analogias com a teoria de circuitos magnéticos aplicados em transformadores [8] e reatores a núcleo saturado [3] e [4].

A estratégia traçada para se determinar as diretrizes de cálculo se baseia na obtenção de dados da carga não linear (etapa I), relação entre essa carga e o filtro (etapa II) e por fim, os cálculos dos seus parâmetros (etapa III), como ilustrado na Fig. 2.

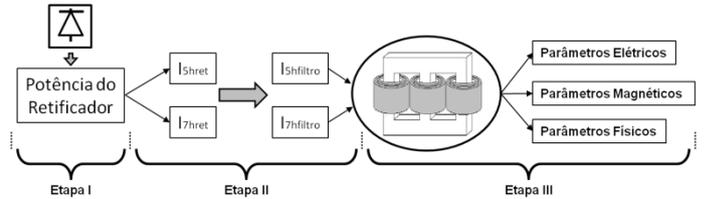


Fig. 2. Estratégia traçada para o roteiro de projeto.

Resumidamente, basta conhecer a potência do retificador para se conseguir determinar os parâmetros do filtro para um ambiente virtual e de projeto e construção de protótipos, como apresentado subsequente.

A. Etapa I

Nessa etapa, se caracteriza o sistema alvo do processo de filtragem proposto, a ponte retificadora seis pulsos não controlada alimentando uma carga RL, conforme Fig. 3.

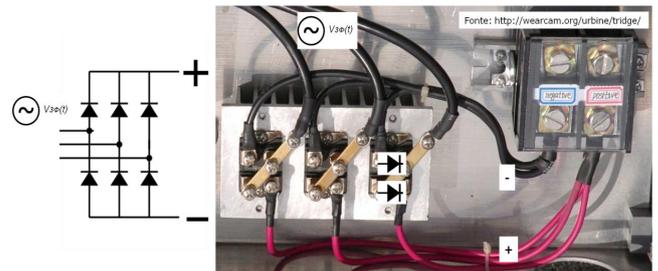


Fig. 3. Ponte retificadora, alvo da proposta de filtragem.

A potência de suprimento desse dispositivo é o parâmetro de entrada, e de acordo com [5], o comportamento do conteúdo harmônico das correntes solicitadas da fonte é constante, para uma alimentação simétrica e balanceada, e condizem com a expressão (5).

Obtendo a decomposição das correntes requeridas da fonte e quantificando suas harmônicas de maiores magnitudes, entra-se na segunda etapa.

$$h = 6.k \pm 1 \quad (5)$$

Onde:

h - ordem harmônica;

k - número de pulsos dos conversores;

B. Etapa II

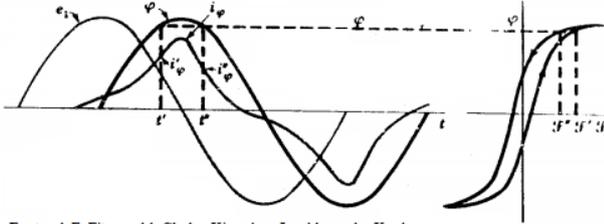
A estratégia aqui adotada se trata da relação entre as magnitudes dos fasores das harmônicas de quinta e sétima ordem do filtro e da carga não linear, conforme os conceitos de compensação harmônica do filtro, apresentados em [6].

Assumiram-se, de maneira idealizada, valores das harmônicas de quinta e sétima ordem do filtro iguais as da carga para posteriormente se aplicar a defasagem nesses fasores do filtro, viabilizando a compensação total ou parcial dessas harmônicas na rede.

Obtendo estas magnitudes das harmônicas do filtro passa-se para o desenvolvimento matemático dos seus parâmetros.

C. Etapa III

Para determinar a potência elétrica do filtro através da harmônica de corrente assumida na segunda etapa, baseou-se nos conceitos de circuito magnético [8], onde se descreve que um dispositivo eletromagnético levado a sua saturação solicitará da fonte uma corrente fortemente não senoidal cuja tendência é um intenso conteúdo harmônico de quinta e sétima ordem, devido as características do ciclo de histerese do material ferromagnético, conforme ilustrado na Fig. 1Fig. 5.



Fonte: A.E. Fitzgerald; Chales Kingskey Jr.; Alexander Kusko. Máquinas Elétricas

Fig. 15. Representação gráfica da corrente requerida pelo filtro.

Utilizando-se de analogia com as correntes de magnetização de transformadores [8] e de dispositivos eletromagnéticos saturados [3], realizou-se testes em laboratório onde se definiu que a corrente de linha do filtro pode ser considerada analiticamente de acordo com (6), considerando o equilíbrio entre Qualidade da Energia Elétrica e Eficiência Energética.

$$I_F = \frac{I_{F5^\circ}}{35\%} \quad (6)$$

Onde:

I_F - Corrente nominal do filtro em [A];

I_{F5° - Corrente de quinta ordem harmônica do filtro [A];

Com isso define-se a potência elétrica como (7).

$$Q_F = \sqrt{3} \times V_n \times I_F \quad (7)$$

Onde:

V_n - Tensão do sistema [V ou kV].

Q_F - Potência elétrica do filtro em [Var ou kVAR].

Naturalmente, assumi-se a potência como reativa por se tratar de um dispositivo eletromagnético;

IV. ABORDAGEM DE PROJETO

Visando objetivar a estrutura desse artigo, os conceitos de projeto serão apresentados, oportunamente, utilizando um caso exemplificativo. Após efetuados todos os cálculos, será empregado esses dados em simulações computacionais do modelo implementado no *ATPDraw*. A Fig. 2Fig. 6 mostra um núcleo trifásico e resume, graficamente, as grandezas ponderadas.

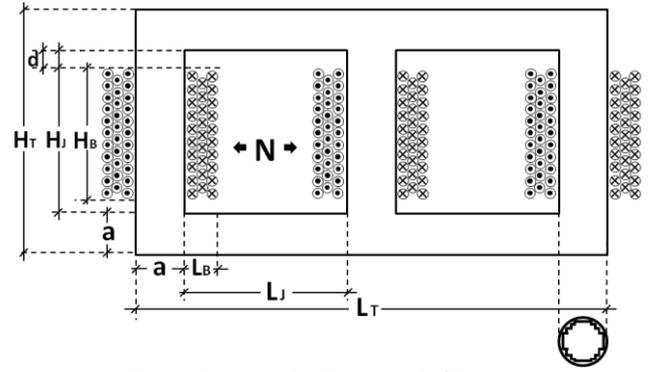


Fig. 26. Esquema das dimensões do filtro.

Onde:

N - Número de espiras [esp];

d - Distancia entre a bobina e a travessa [cm];

a - Largura da coluna [cm];

L_B - Largura do cobre na janela [cm];

H_B - Altura do cobre na janela [cm];

L_J - Largura da janela [cm];

H_J - Altura da janela [cm];

L_T - Largura total [cm];

H_T - Altura total [cm].

Inicialmente é calculada a corrente nominal do dispositivo de acordo com a potência e tensão de alimentação escolhidas arbitrariamente, através da equação (8).

$$I_F = \frac{Q_F}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{13 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 0,22 \text{ kV}} = 34 \text{ A} \quad (8)$$

Onde:

I_F - Corrente nominal do filtro em [A];

V_n - Tensão do sistema em [kV];

Q_F - Potência elétrica do filtro em [kVAR].

De acordo com [8], a seção magnética do núcleo (S_{MAG}) é calculada de acordo com (9).

$$S_{MAG} = K_L \sqrt{\frac{Q_F}{3} / 2} = 6,61 \cdot \sqrt{\frac{13 \times 1000}{3} / 2} = 39,75 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

Onde:

K_L - Coeficiente do núcleo laminado;

f - Frequência;

A seção geométrica do núcleo pode ser encontrada de acordo com (10).

$$S_{MAG}' = S_{MAG} \cdot K_{Ench} = 39,75 \cdot 1,1 = 43,7 \text{ cm}^2 \quad (10)$$

Onde:

K_{Ench} - Coeficiente de enchimento do núcleo;

Seguindo com os cálculos, o número de espiras necessárias para se obter a densidade de fluxo magnético que levará o núcleo a sua saturação é encontrado em (11).

$$N = \frac{V_N}{4,44 \cdot f \cdot S_{MAG} \cdot B} = \frac{220/\sqrt{3}}{4,44 \times 60 \times 39,75 \times 10^{-4} \times 2,7} = 44,4 \text{ esp} \quad (11)$$

O comprimento magnético médio que o fluxo de campo magnético irá percorrer é dado por (12).

$$l_{MAG} = \frac{N \cdot I_F}{H} \cdot 1000 = \frac{44,4 \cdot 34}{4007,3} \cdot 1000 = 380 \text{ mm} \quad (12)$$

Onde:

H - Intensidade de campo magnético;

Utilizando-se da corrente nominal calculada em (8), obtêm-se a seção mínima do condutor da bobina, de acordo com (13).

$$S_{FioMin} = \frac{I_F}{J} = \frac{34 \text{ A}}{2,2 \text{ A/mm}^2} = 15,5 \text{ mm}^2 \quad (13)$$

Onde:

J - Densidade de corrente do condutor;

Utilizando valores comerciais de fios de cobre [10], têm-se, de acordo (14) a seção real do condutor da bobina.

$$\boxed{16,8 \text{ mm}^2} > 15,5 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Para chegar aos cálculos elétricos da bobina, necessita-se da sua dimensão física, ou seja, seu comprimento total, conforme (15).

$$l_{cu} = 1,1 \cdot N \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_{MAG}} = 1,1 \cdot 44,4 \cdot \sqrt{4\pi \cdot 39,75} = 1090 \text{ cm} \quad (15)$$

Outros parâmetros físicos serão calculados. A seguir os dados de coluna e janela do núcleo serão apresentados.

Largura da coluna.

$$a = \sqrt{S_{MAG}} = \sqrt{43,7} = 6,6 \text{ cm} \quad (16)$$

Largura da janela.

$$L_J = \frac{a}{2} = \frac{6,6}{1,46} \cong 4,6 \text{ cm} \quad (17)$$

Altura do cobre na janela.

$$H_B = l_{MAG} - 2 \cdot (a + L_J) = 380 - 2 \cdot (66 + 46) = 156 \text{ mm} \quad (18)$$

Altura da janela.

$$H_J = H_B + 2 \cdot d = 156 + 2 \cdot 20 = 196 \text{ mm} \quad (19)$$

Área do cobre na janela.

$$S_{cu_j} = N \cdot S_{FioReal} = 44,4 \cdot 16,8 = 745,9 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

Largura do cobre na janela.

$$L_B = \frac{S_{CUJ}}{H_B} = \frac{745,9}{163,65} \cong 5 \text{ mm} \quad (21)$$

Largura total.

$$L_T = 2 \cdot L_J + 3 \cdot a = 2 \cdot 46 + 3 \cdot 66 = 290 \text{ mm} \quad (22)$$

Altura total.

$$H_T = 2 \cdot a + H_J = 2 \cdot 66 + 196 = 328 \text{ mm} \quad (23)$$

Após esses parâmetros físicos, pode-se chegar aos dados elétricos da bobina os quais serão utilizados na simulação computacional apresentada logo adiante. A resistência da bobina é dada por (24).

$$R_N = \frac{\rho_{cu} \cdot l_{cu}}{S_{FioReal}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-8} \cdot 1090 \cdot 10^{-2}}{16,8 \cdot 10^{-6}} = 0,0114 \Omega \quad (24)$$

Onde:

ρ_{cu} - Resistividade do cobre;

A reatância indutiva do enrolamento é calculada em (25).

$$Xp' = 7,9 \cdot \frac{f \cdot l_{MAG} \cdot N^2}{H_B} K'' \cdot L_B \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot \frac{60 \cdot 380 \cdot 44,4^2}{15,6} \cdot 0,95 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} = 0,108 \Omega \quad (25)$$

Onde:

K'' - Coeficiente de correção, dado por: $K'' = 1 - \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L_B}{H_B} \right)$;

Os dados calculados estão resumidos na Tabela II

TABELA II. TABELA EXEMPLIFICADA DO PROJETO DE UM FILTRO.

DADOS DE ENTRADA PRINCIPAIS		
Potência Reativa (Q)	[kVar]	13
Tensão Nominal (U)	[kV]	0,22
Frequência (f)	[Hz]	60
Corrente (I)	[A]	34,12
CÁLCULO DAS GRANDEZAS PRINCIPAIS		
Dados dos Enrolamentos		
Número Espiras Enrolamento Primário (Np)	[espiras]	44,4
Resistência Enrolamento Principal (Rp)	[Ω]	0,0121
Indutância Enrolamento Principal (Lp)	[mH]	0,0271
Tensão na bobina principal	[kV]	0,1270
Dados do Núcleo		
Seção Magnética Núcleo (Sm)	[cm ²]	39,8
Largura da Coluna (Lc)	[mm]	70
Largura da Janela (Lj)	[mm]	47
Altura da Janela (Hj)	[mm]	153

V. SISTEMA SIMULADO

O sistema completo simulado que será parte das nossas análises subsequentes está ilustrado na Fig. 1. Os dados de entradas e resultados serão abordados na seqüência.

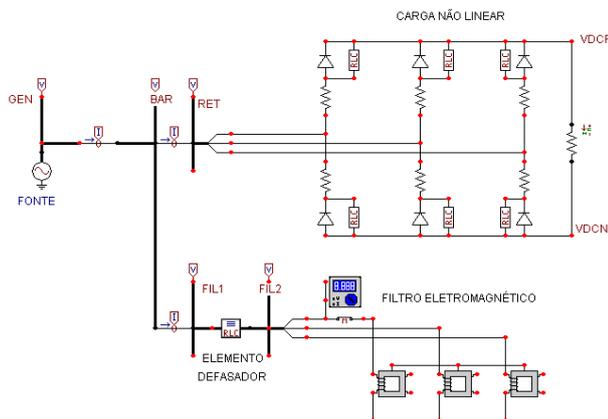


Fig. 1. Sistema simulado no ATP.

Visando validar todo o desenvolvimento matemático e o modelo implementado em plataforma virtual, o sistema ilustrado na Fig. 1 fora simulado no *ATPDraw*. Os dados imputados para simulação foram calculados na seção anterior e estão resumidos na Tabela III. Para caráter prático serão apresentados apenas as formas de onda referente a fase A, conforme Fig. 2-Fig. 4.

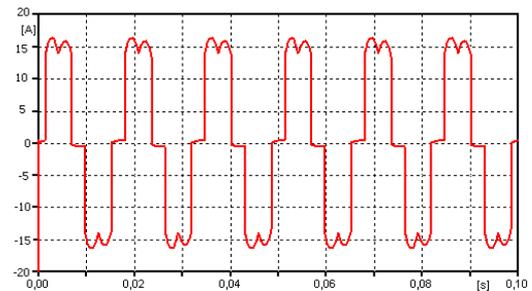


Fig. 2. Corrente da carga não linear - Fase A

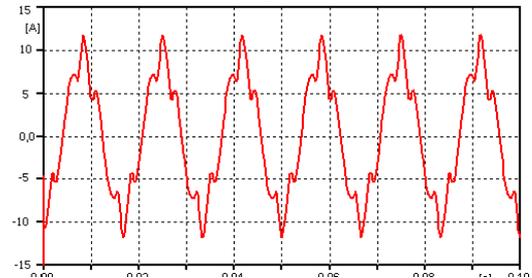


Fig. 3. Corrente do filtro - Fase A

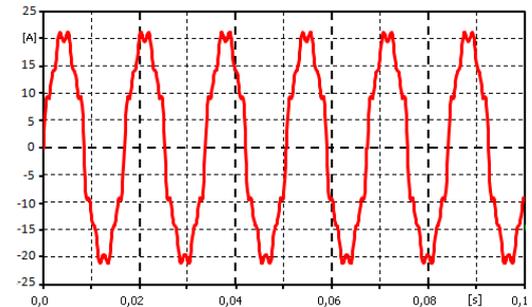


Fig. 4. Corrente na fonte - Fase A

Em termos numéricos, a Tabelas III resume o resultados referentes às formas de onda acima.

TABELA III. PERCENTUAIS DE DISTORÇÕES DAS CORRENTES DO CIRCUITO SIMULADO.

Corrente Carga Não Linear				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	29,5%	30,7%	29,2%	29,8%
Ih5	22,8%	23,2%	23,3%	23,1%
Ih7	13,8%	14,6%	12,3%	13,6%
Corrente Filtro				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	31,4%	34,5%	32,4%	32,8%
Ih5	28,7%	31,0%	29,4%	29,7%
Ih7	9,7%	12,4%	8,8%	10,3%
Corrente Fonte				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	11,6%	11,6%	11,2%	11,5%
Ih5	3,7%	4,2%	4,7%	4,2%
Ih7	5,9%	4,2%	3,2%	4,4%

Conforme explorado na segunda seção, fundamentação do filtro, e observado os resultados na tabela III pode-se constatar que a teoria envolvida é válida no ambiente virtual,

ou seja, as correntes harmônicas, principalmente a de quinta ordem, geradas pelo filtro, compensaram as respectivas correntes da carga. Os índices de maior redução foi exatamente os de maior significância, ou seja, a quinta harmônica. Portanto, como contexto geral, a distorção da carga que era de aproximadamente 30%, reduziu, com a ação do filtro, para 11,5%.

V. SISTEMA ENSAIADO

Para corroborar com os resultados em ambiente virtual, foram realizados testes em laboratório utilizando protótipo do filtro, elemento defasador, fonte senoidal e carga não linear em questão, conforme Fig. 1.

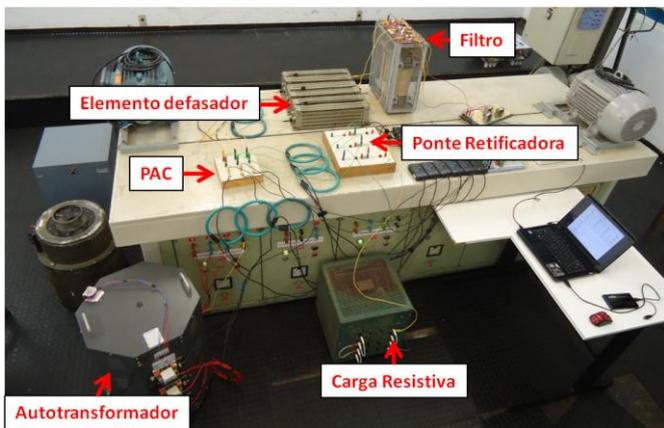


Fig. 1. Bancada de testes no laboratório.

A Tabela IV resume os valores percentuais obtidos em laboratório das correntes e seus índices de distorções para um protótipo de filtro com potência de 7kVA em nível de tensão de 220V.

TABELA IV. PERCENTUAIS DE DISTORÇÕES DAS CORRENTES DO CIRCUITO ENSAIADO.

Corrente Carga Não Linear				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	29,1%	29,4%	29,1%	29,2%
Corrente Filtro				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	31,4%	33,5%	32,5%	32,5%
Corrente Fonte				
h	Ia	Ib	Ic	Média
DHT	10,4%	11,2%	11,8%	11,1%

De modo similar ao caso simulado, os resultados provenientes dos testes em laboratórios se mostraram satisfatórios e legítima a teoria exposta neste artigo. Portanto, o protótipo disponível em laboratório atenuou a poluição harmônica gerada pela carga, e conseguiu reduzir os níveis de distorção total de 29% para 11%. Resultados estes bastantes similares ao caso simulado no ATPDraw, mesmo que para potências do filtro diferentes.

VI. CONCLUSÕES

O presente artigo abordou a validação da teoria envolvida no processo de compensação fasorial que é responsável pela atenuação do conteúdo harmônico injetado na rede elétrica. Para isso, foram criadas duas sistemáticas de análise, uma virtual, utilizando simulações no *ATPDraw*, e outra experimental, utilizando o protótipo do filtro para testes realizados em laboratório. Estes resultados evidenciaram uma boa aderência, considerando valores comparativos percentuais. Isto ocorreu tanto para as formas de onda quanto para os valores obtidos. Desta forma, fica esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do filtro de sequência positiva e negativa.

VII - AGRADECIMENTOS

Nosso reconhecimento e gratidão à CAPES e a FAPEMIG pelos incentivos concedidos para o desenvolvimento desta pesquisa.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] RAVAGNANI, L. L. Sistemas Híbridos para Mitigação de Harmônicos: Modelagem e Estudos Experimentais, Tese de Doutorado, UNESP, 2008.
- [2] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., Electrical power systems quality – 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [3] 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).
- [4] BELCHIOR, F. N., Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos através de Dispositivos Eletromagnéticos, Uberlândia: UFU, 2006 (Tese, Doutorado).
- [5] RODRIGUES, K. D., Conversores de Frequência no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica, Uberlândia: UFU, 2001 (Tese Doutorado).
- [6] ALVES, M. S. M., BELCHIOR, F. N., PADILHA R. C., SALES G. J., Filtragem de Harmônicos de Sequência Positiva e Negativa Através de Arranjos Eletromagnéticos – Qualidade da Energia versus Eficiência Energética. In: Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá/MT.
- [7] ALVES, M. S. M., BELCHIOR, F. N., PADILHA R. C., SALES G. J., Filtragem de Harmônicos Através de Arranjos Eletromagnéticos – Qualidade Da Energia Versus Eficiência Energética. In: Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2011, Juiz de Fora/MG.
- [8] MARTIGNONI, A., Transformadores, 8. Ed., São Paulo, Editora Globo, 1991.
- [9] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. JR; KUSKO, A.; Máquinas Elétricas - Conversão Eletromecânica da Energia. Processos, Dispositivos e Sistemas. Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1975.
- [10] PPE FIOS ESMALTADOS S.A - Sítio: <http://www.ppefios.com.br/> Acesso: novembro/2012