



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“Supressor Eletromagnético de Componentes Harmônicas de Sequência Zero”**

**STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS**

**Orientador:** Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia - UNESP  
– Campus de Ilha Solteira, para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento:  
Automação.

Ilha Solteira – SP  
Fevereiro/2011

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

F866s	<p>Freitas, Stefani Caroline Leal de. Supressor eletromagnético de componentes harmônicas de sequência zero / Stefani Caroline Leal de Freitas. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011 135 f.: il.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2011</p> <p>Orientador: Luís Carlos Origa de Oliveira Inclui bibliografia</p> <p>1. Supressor eletromagnético de sequência zero. 2. Filtro eletromagnético. 3. Bloqueador eletromagnético. 4. Harmônicas. 5. Transmitâncias.</p>
-------	---

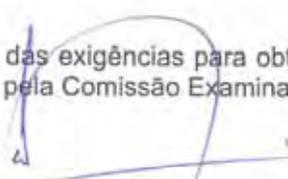
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE SEQUÊNCIA ZERO

AUTORA: STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS

ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JULIO BORGES DE SOUZA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. OLÍVIO CARLOS NASCIMENTO SOUTO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Fundação Educacional de Ituiutaba - ISEPI - Ituiutaba/MG

Data da realização: 18 de fevereiro de 2011.

# DEDICATÓRIA

---

*A Deus por me sustentar, me permitir acordar a cada novo dia de muitas bênçãos, pelo funcionamento do meu corpo físico, mental, espiritual e emocional e por tudo que tem me tornado capaz.*

# AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar a Deus, por tudo que tem feito, por tudo que tem tornado possível, pela fidelidade, misericórdia e proteção que tem revelado a cada dia em minha vida. Graças eu Te dou.

É importante mencionar aqui todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que este trabalho se tornasse uma realidade. Mas, bem sei que corro o risco de não dar conta desse ‘muitíssimo obrigado’ como é merecido, porque será difícil exprimir a grandeza de energias e impulsos que fizeram com que esse momento chegasse. Esta dissertação é o resultado mais visível desse processo de construção, amadurecimento e desafios. Dessa forma, dedico algumas palavras àqueles que dela fazem parte direta ou indiretamente ou, ainda, pelo fato de simplesmente existirem. Eu louvo a Deus pela oportunidade de conhecer cada um de vocês.

Ao Prof. Dr. **Olívio Carlos Nascimento Souto**, pela valiosíssima recomendação que abriu portas junto ao Programa de Pós-Graduação da FEIS UNESP.

Ao Prof. Dr. **Luís Carlos Origa de Oliveira** meu maior agradecimento por ter aceitado a orientação deste trabalho, por me receber tão bem, pelo apoio, referência profissional, conhecimento transmitido, incentivo e pela amizade que perdurará pelos próximos anos.

Minha profunda gratidão também ao Prof. Dr. **Júlio Borges de Souza** pela inestimável disposição, amizade, contribuições enriquecedoras e críticas construtivas que vão além dessa dissertação. Você é uma pessoa indispensável.

Ao Prof. Dr. **Luís Fernando Bovolato** que gentilmente cedeu o espaço físico do laboratório e o computador no qual trabalhei durante a construção dessa dissertação.

Ao engenheiro do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica, **Rodrigo Nunes de Oliveira**, pelos protótipos e ensaios experimentais.

Aos demais professores do Programa Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da FEIS UNESP pelo convívio e aprendizado.

Aos amigos da Pós-Graduação **Jadiel Caparrós**, **Talita Esteves**, **Kenji Nose** e **Rodolfo Castanho**, pelo companheirismo, momentos de entusiasmo e substancial auxílio que me deram durante a dissertação.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS UNESP pela boa vontade nos serviços prestados.

À **Universidade Estadual Paulista – UNESP**, que proporcionou meios para a realização deste trabalho.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES** pelo apoio financeiro prestado.

À minha família paterna e materna, em geral, pelo carinho e apoio incondicional.

E, *last but not least*, gostaria de agradecer especialmente meus avós Idomar e Delfina, minha mãe Luciana, meu irmão Netinho, e meu namorado Nicodemos Neto, pelo incentivo, amor, confiança e por me encorajarem em todos os aspectos da vida.

Todos vocês são co-autores deste trabalho!

*Sigo firmado na rocha que é Cristo, em quem estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e da ciência.*

*Colossenses 2:2-3.*

# RESUMO

---

O acelerado desenvolvimento da eletrônica de potência vem desencadeando uma série de transformações no sistema elétrico, sendo possível destacar a constante alteração da natureza das cargas consumidoras, a proliferação da co-geração e o peso crescente de questões ambientais relacionadas à questão da geração. Grande parte das cargas atuais é composta por dispositivos não-lineares que, por muitas vezes, são a causa de problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

Considerando a variedade da distribuição sequencial das harmônicas de corrente na utilização dos filtros passivos, destacam-se os filtros e bloqueadores eletromagnéticos, os quais têm merecido especial atenção devido à sua robustez e baixo custo de implantação. Este trabalho está particularmente direcionado à investigações relacionadas ao uso desses dispositivos que possibilitam uma atenuação do fluxo das principais componentes harmônicas que compõe as distorções harmônicas de sequência zero.

Neste contexto, esta dissertação apresenta contribuições inéditas relacionadas com o desenvolvimento de modelos matemáticos no domínio da frequência para bloqueadores eletromagnéticos, e um estudo de modelos matemáticos para filtros eletromagnéticos, compondo então, o aqui denominado supressor eletromagnético de componentes de sequência zero. Apresenta-se ainda, a utilização de metodologias para análise de desempenho baseado no comportamento das componentes harmônicas sequenciais.

É estabelecida uma base comparativa de natureza experimental que possibilita a avaliação do desempenho e da aderência do modelo proposto. São utilizados protótipos de baixa potência de um filtro e um bloqueador, ambos eletromagnéticos, construídos a partir de análises teóricas.

Os modelos desenvolvidos são utilizados na composição de um aplicativo computacional para análise de desempenho e otimização de projetos de sistemas de filtragem harmônica. Essa ferramenta de cálculo possibilita a investigação individualizada e sistemática do comportamento do sistema elétrico para as distintas componentes harmônicas sequenciais. Deste modo através de uma investigação detalhada é possível identificar ações para escolha adequada das topologias e ajustes que visem à maximização do desempenho do sistema de filtragem.

**Palavras-chave:** Supressor eletromagnético de sequência zero. Filtro eletromagnético. Bloqueador eletromagnético. Harmônicas. Transmitâncias.

# ABSTRACT

---

The accelerated development of power electronics has promoted a series of changes in the electrical system, so it is possible to highlight the constant changing of consumer loads, the proliferation of co-generation and the growing importance of environmental issues related to generation. Much of the current loads are composed of non-linear devices which, in many cases are the cause of problems related to power quality.

Considering the sequential distribution variety of harmonic currents in the use of passive filters, highlight the electromagnetic filters and blockers, which have received special attention due to its robustness and low cost of deployment. This work is particularly directed to investigations related to the use of these devices which enable an attenuation of the flow of the principal harmonic components that compound the zero-sequence harmonic distortion.

In this context, this work presents unedited contributions related to the development of mathematical models in the frequency domain for electromagnetic blocking, and a study of mathematical models of electromagnetic filters, making then, the here called electromagnetic zero-sequence components suppressor. It presents also, the use of methodologies for performance analysis based on the sequential behavior of harmonic components.

It is established a comparison basis of experimental nature that enables the performance and adherence analysis of the model. Are used a low-power prototypes of a filter and a blocker, both electromagnetic, constructed from theoretical analysis.

These models are used in the composition of a software for performance analysis and optimal project of harmonic filtering systems. This tool allows an individualized and systematic investigation of the electrical system behavior for distinct harmonic sequence components. Thus, through a detailed investigation it is possible to identify appropriated actions to the choice of the topologies and adjustments aimed at maximizing the performance of the filtering system.

**Key-words:** Electromagnetic zero sequence suppressor. Electromagnetic blocker. Electromagnetic filter. Harmonics. Transmittances.

## LISTA DE FIGURAS

	DESCRIÇÃO	PAG
<b>Figura 1.1</b>	Comparativo entre formas de onda.....	23
<b>Figura 1.2</b>	Diagrama real e formas de onda das correntes trifásicas da carga não-linear.....	25
<b>Figura 1.3</b>	Formas de onda e espectro harmônico das correntes trifásicas de alimentação.....	25
<b>Figura 2.1</b>	Instalação convencional do filtro eletromagnético de sequência zero.....	33
<b>Figura 2.2</b>	Arranjo eletromagnético.....	35
<b>Figura 2.3</b>	Filtro eletromagnético com núcleo de três colunas.....	36
<b>Figura 2.4</b>	Detalhes dos enrolamentos e interligação das bobinas.....	41
<b>Figura 2.5</b>	Indutâncias mútuas.....	41
<b>Figura 2.6</b>	Circuitos sequenciais desacoplados.....	44
<b>Figura 3.1</b>	Instalação do bloqueador eletromagnético em um sistema elétrico.....	46
<b>Figura 3.2</b>	Indutâncias dos enrolamentos das bobinas.....	47
<b>Figura 3.3</b>	Arranjo eletromagnético.....	51
<b>Figura 3.4</b>	Acoplamentos magnéticos.....	52
<b>Figura 3.5</b>	Circuitos sequenciais desacoplados.....	55
<b>Figura 4.1</b>	Instalação conjunta do filtro e do bloqueador de sequência zero em um sistema.....	58
<b>Figura 4.2</b>	Circuito equivalente simplificado.....	59
<b>Figura 4.3</b>	Carga não-linear representada por fonte de corrente.....	63
<b>Figura 4.4</b>	Formas de onda típicas de tensão e corrente de uma carga alimentada por um retificador de meia onda controlado a tiristor, com ângulo de disparo fixado em $90^\circ$ .....	64
<b>Figura 4.5</b>	Representação básica de um ramal da rede elétrica.....	65
<b>Figura 4.6</b>	Fluxo de correntes harmônicas.....	66
<b>Figura 4.7</b>	Circuito equivalente na frequência $f$ e sequência $k$ .....	67
<b>Figura 4.8</b>	Circuito equivalente reduzido representando o efeito da fonte de corrente.....	67
<b>Figura 4.9</b>	Circuito equivalente reduzido representando o efeito da fonte de tensão.....	68

<b>Figura 4.10</b>	Circuito equivalente reduzido e admitância “vista” pela fonte de alimentação.....	69
<b>Figura 4.11</b>	Circuito equivalente reduzido e impedância “vista” pelo barramento da carga.....	70
<b>Figura 4.12</b>	Circuito equivalente simplificado.....	71
<b>Figura 4.13</b>	Circuitos equivalentes sequenciais para análise de causas e efeitos.....	72
<b>Figura 5.1</b>	Arranjo do Filtro Eletromagnético.....	76
<b>Figura 5.2</b>	Arranjo do Bloqueador Eletromagnético.....	77
<b>Figura 5.3</b>	Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do filtro.....	79
<b>Figura 5.4</b>	Foto do protótipo construído (1kVA/ 220V).....	80
<b>Figura 5.5</b>	Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do bloqueador.....	81
<b>Figura 5.6</b>	Detalhes construtivos das bobinas.....	82
<b>Figura 5.7</b>	Protótipo do bloqueador eletromagnético.....	82
<b>Figura 5.8</b>	Diagrama esquemático para estudos experimentais.....	83
<b>Figura 5.9</b>	Identificação dos equipamentos na plataforma experimental.....	84
<b>Figura 5.10</b>	Carga não-linear trifásica e detalhe dos retificadores.....	86
<b>Figura 5.11</b>	Carga não linear trifásica e detalhe dos retificadores.....	86
<b>Figura 5.12</b>	Carga linear trifásica.....	87
<b>Figura 5.13</b>	Carga linear trifásica e detalhe dos indutores ajustáveis.....	87
<b>Figura 5.14</b>	Procedimento para ajuste de sintonia do filtro ressonante de 300hz.....	89
<b>Figura 5.15</b>	Arranjo físico utilizado no filtro ressonante de 300hz.....	89
<b>Figura 5.16</b>	Transformador de acoplamento.....	90
<b>Figura 5.17</b>	Diagrama unifilar simplificado.....	91
<b>Figura 5.18</b>	Resultado experimental da corrente total de carga.....	91
<b>Figura 5.19</b>	Resultados de simulação digital da corrente total de carga.....	91
<b>Figura 5.20</b>	Resultado Experimental da corrente de alimentação sem a presença do bloqueador eletromagnético.....	92
<b>Figura 5.21</b>	Resultado de simulação digital da corrente de alimentação sem a presença do bloqueador eletromagnético.....	92
<b>Figura 5.22</b>	Resultado Experimental da corrente de alimentação com a presença do bloqueador eletromagnético.....	93
<b>Figura 5.23</b>	Resultado de simulação digital da corrente de alimentação com a presença do bloqueador eletromagnético.....	93

<b>Figura 5.24</b>	Diagrama unifilar para síntese dos experimentos.....	95
<b>Figura 5.25</b>	Caso 1 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	96
<b>Figura 5.26</b>	Caso 2 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	97
<b>Figura 5.27</b>	Caso 3 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	99
<b>Figura 5.28</b>	Caso 4 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	100
<b>Figura 5.29</b>	Caso 5 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	102
<b>Figura 5.30</b>	Caso 6 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	103
<b>Figura 5.31</b>	Caso 7 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	104
<b>Figura 5.32</b>	Caso 8 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	106
<b>Figura 5.33</b>	Caso 9 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	107
<b>Figura 5.34</b>	Caso 10 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	109
<b>Figura 5.35</b>	Caso 11 – Resultados para as componentes sequencias das correntes e tensões no PAC.....	111
<b>Figura 6.1</b>	Diagrama de simulação simplificado em ambiente Matlab/Simulink®.....	115
<b>Figura 6.2</b>	Supressor Eletromagnético de Sequência Zero em ambiente Matlab/Simulink®.....	115
<b>Figura 6.3</b>	Carga linear e carga não-linear.....	115
<b>Figura 6.4</b>	Correntes e tensões da carga e do sistema de alimentação.....	116
<b>Figura 6.5</b>	Arranjo Unifilar.....	117
<b>Figura 6.6</b>	Tensões de alimentação e correntes de carga.....	119
<b>Figura 6.7</b>	Topologia do sistema para o caso 1.....	120

<b>Figura 6.8</b>	Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 1.....	120
<b>Figura 6.9</b>	Comportamento da transmitância $A_h$ para o caso 1.....	121
<b>Figura 6.10</b>	Topologia do sistema para o caso 2.....	121
<b>Figura 6.11</b>	Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 2.....	122
<b>Figura 6.12</b>	Comportamento da transmitância $A_h$ para o caso 2.....	122
<b>Figura 6.13</b>	Topologia do sistema para o caso 3.....	123
<b>Figura 6.14</b>	Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 3.....	124
<b>Figura 6.15</b>	Comportamento da transmitância $A_h$ para o caso 3.....	124

## LISTA DE TABELAS

	DESCRIÇÃO	PAG
<b>Tabela 1.1</b>	Distribuição sequencial de correntes harmônicas.....	23
<b>Tabela 1.2</b>	Valores de referência global das distorções harmônicas totais (% da tensão fundamental).....	28
<b>Tabela 1.3</b>	Níveis de referência para Distorção Harmônica Individual de Tensão (% da tensão fundamental).....	29
<b>Tabela 5.1</b>	Dados Nominais da carga não-linear.....	86
<b>Tabela 5.2</b>	Dados nominais da carga linear.....	87
<b>Tabela 5.3</b>	Dados nominais do filtro eletromagnético.....	88
<b>Tabela 5.4</b>	Dados nominais do bloqueador eletromagnético.....	88
<b>Tabela 5.5</b>	Dados nominais dos filtros ressonantes.....	89
<b>Tabela 5.6</b>	Transformador de acoplamento.....	90
<b>Tabela 5.7</b>	Dados do sistema e dos filtros.....	90
<b>Tabela 5.8</b>	Valores obtidos para o ensaio 1.....	92
<b>Tabela 5.9</b>	Valores obtidos para o ensaio 2.....	94
<b>Tabela 5.10</b>	Dados do sistema.....	95
<b>Tabela 5.11</b>	Comparativo entre os casos 1 e 2.....	98
<b>Tabela 5.12</b>	Comparativo entre os casos 1, 2 e 3.....	99
<b>Tabela 5.13</b>	Comparativo entre os casos 1, 2, 3 e 4.....	101
<b>Tabela 5.14</b>	Comparativo entre os casos 5 e 6.....	103
<b>Tabela 5.15</b>	Comparativo entre os casos 5, 6 e 7.....	105
<b>Tabela 5.16</b>	Comparativo entre os casos 5, 6, 7 e 8.....	106
<b>Tabela 5.17</b>	Comparativo entre os casos 5, 6, 7, 8 e 9.....	108
<b>Tabela 5.18</b>	Tensões desequilibradas e com distorções para os casos 10 e 11.....	108
<b>Tabela 5.19</b>	Comparativo entre os casos 8 e 10.....	110
<b>Tabela 5.20</b>	Comparativo entre os casos 10 e 11.....	111
<b>Tabela 6.1</b>	Dados do sistema e da carga não- linear.....	117
<b>Tabela 6.2</b>	Dados do filtro eletromagnético.....	117
<b>Tabela 6.3</b>	Dados do bloqueador eletromagnético.....	118
<b>Tabela 6.4</b>	Correntes da carga não-linear.....	118
<b>Tabela 6.5</b>	Tensão de alimentação.....	118

<b>Tabela 6.6</b>	Correntes totais de carga.....	119
<b>Tabela 6.7</b>	Correntes na fonte para o caso 1.....	121
<b>Tabela 6.8</b>	Correntes na fonte para o caso 2.....	123
<b>Tabela 6.9</b>	Correntes na fonte para o caso 3.....	125

## SIMBOLOGIA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$V_h$	Valor eficaz da tensão para h-ésima ordem harmônica.
$I_h$	Valor eficaz da corrente para h-ésima ordem harmônica.
$V_1$	Valor eficaz da tensão fundamental.
$I_1$	Valor eficaz da corrente fundamental.
$h$	Ordem da componente harmônica.
$L_{P_i}$	Indutância própria do enrolamento principal da fase i do filtro.
$L_{A_i}$	Indutância própria do enrolamento auxiliar da fase i.
$M_{PA_i}$	Indutância mútua entre os enrolamentos principal e auxiliar da fase i do filtro.
$M_{PP_{ij}}$	Indutância mútua entre enrolamentos principais das fases i e j do filtro.
$M_{PA_{ij}}$	Indutância mútua entre enrolamentos principal e auxiliar das fases i e j do filtro.
$M_{AA_{ij}}$	Indutância mútua entre enrolamentos auxiliares das fases i e j.
$i_R, i_S, i_T$	Correntes nas fases R, S e T.
$L_f$	Indutâncias próprias idênticas do filtro.
$M_f$	Indutâncias mútuas entre bobinas de uma mesma coluna idêntica do filtro.
$M_{adj}$	Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e adjacentes do filtro.
$M_{ext}$	Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e externas do filtro.
$L_{Pf}$	Indutância do enrolamento principal do filtro.
$L_{Af}$	Indutância do enrolamento auxiliar do filtro.
$\lambda$	Fator de acoplamento entre bobinas.
$\omega$	Frequência fundamental.
$\varphi$	Defasamento angular.
$L_b$	Indutâncias próprias do bloqueador.

$M_b$	Indutâncias mútuas entre as bobinas de diferentes fases do bloqueador.
$L_{b_p}$	Indutância própria do primário do bloqueador.
$L_{b_s}$	Indutância própria do secundário.
$Z_{SZ_f}$	Impedância de sequência zero do filtro paralelo.
$Z_{SZ_b}$	Impedância de sequência zero do bloqueador em série.
$Z_f$	Impedância do filtro.
$Z_b$	Impedância do bloqueador.
$\lambda_f$	Fator de acoplamento do filtro.
$\lambda_b$	Fator de acoplamento do bloqueador.
$\xi_f$	Fator de conformidade do filtro.
$\xi_b$	Fator de conformidade do bloqueador.
$J_{SZ_{NL}}$	Corrente de sequência zero gerada pela carga não-linear.
$I_{SZ_F}$	Corrente de sequência zero através do filtro paralelo.
$Z_{SZ_S}$	Impedância de sequência zero do sistema de suprimento.
$I_{SZ_S}$	Corrente de sequência zero do sistema.
$k$	Sequência de fase.
$E_k$	Tensão de alimentação sequencial do sistema supridor.
$I_k$	Corrente de alimentação de sequencial.
$U_k$	Tensão sequencial no barramento da carga.
$J_k$	Corrente de carga sequencial.
$f_h$	Frequência harmônica.
$f$	Frequência.
$Z_S$	Impedâncias complexas equivalentes do sistema.
$Z_{pr}$	Impedâncias complexas do filtro passivo ressonante.
$Z_L$	Impedâncias complexas da carga.
$I_j$	Contribuição da corrente de carga $J$ na corrente de alimentação $I$ .
$U_j$	Contribuição da corrente de carga $J$ na tensão da carga $U$ .
$I_E$	Contribuição da tensão da fonte $E$ na corrente de alimentação $I$ .

$U_E$	Contribuição da tensão da fonte $E$ na tensão da carga $U$ .
$Z_{sb}$	Somatória da impedância do sistema $Z_s$ e a impedância do bloqueador $Z_b$ .
$Z$	Impedância paralela do filtro eletromagnético, do filtro passivo ressonante e da carga linear.
$Y_k^h$	Transmitância que reflete o efeito da corrente da carga como uma parcela da corrente total de alimentação.
$Z_k^h$	Transmitância que reflete o efeito das componentes harmônicas da tensão de alimentação sobre as harmônicas da tensão na carga.
$A_k^h$	Transmitância que reflete efeitos da tensão de alimentação sobre a corrente alimentação.
$B_k^h$	Transmitância que reflete efeitos da corrente da carga sobre a tensão de carga.

## ABREVIATURAS

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.
<i>DTT</i>	Distorção harmônica total de tensão.
<i>DTI</i>	Distorção harmônica total de corrente.
<i>DIT<sub>h</sub></i>	Distorção harmônica individual de tensão para h-ésima ordem harmônica.
<i>DII<sub>h</sub></i>	Distorção harmônica individual de corrente para h-ésima ordem harmônica.
DFT	<i>Discrete Fourier Transformer</i> (Transformada Discreta de Fourier).
TP	Transformador de Potencial.
TC	Transformador de corrente.
LQEE	Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.
FP	Fator de Potência.
Conversor A/D	Conversor Analógico / Digital.
X/R	Relação entre a reatância equivalente a 60Hz e a resistência.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
RMS	<i>Root Means Square</i> (Valor Eficaz).
Seq +	Sequência positiva.
Seq -	Sequência negativa.
Seq 0	Sequência zero.
PAC	Ponto de acoplamento comum.

## SUMÁRIO

---

<b>CAPÍTULO I – ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>22</b>
1.1 – Considerações Iniciais.....	22
1.2 – Distorções Harmônicas.....	22
1.3 – Distorções Harmônicas de Sequência Zero.....	24
1.4 – Quantificação das Distorções Harmônicas.....	26
1.5 – Legislações e Normas sobre Harmônicos.....	27
1.6 – Soluções para Mitigação das Distorções Harmônicas.....	29
1.7 – Contribuições desta Dissertação.....	31
1.8 – Organização da Dissertação.....	31
<b>CAPÍTULO II – FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO.....</b>	<b>33</b>
2.1 – Considerações Iniciais.....	33
2.2 – Filtros Eletromagnéticos.....	33
2.3 – Modelagem Matemática - Arranjo Eletromagnético com núcleo de Três Colunas..	34
2.4 – Condições Simplificadoras para Arranjo com Núcleo de Três Colunas.....	40
2.5 – Considerações Finais.....	45
<b>CAPÍTULO III – BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO.....</b>	<b>46</b>
3.1 – Considerações Iniciais.....	46
3.2 – Bloqueador Eletromagnético.....	46
3.3 – Modelagem Matemática.....	47
3.4 – Arranjo Eletromagnético.....	51
3.5 – Análise Funcional do Bloqueador Eletromagnético.....	54
3.6 – Considerações Finais.....	55
<b>CAPÍTULO IV – MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO.....</b>	<b>57</b>
4.1 – Considerações Iniciais.....	57
4.2 – Supressor Eletromagnético.....	58
4.3 – Fundamentação Física da Compensação Harmônica .....	59

4.4 – Avaliação do Sistema de Filtragem.....	62
4.5 – Modelagem das Fontes Harmônicas.....	62
4.6 – Transmitâncias Sequenciais.....	65
4.7 – Síntese para Análise de Causas e Efeitos.....	70
4.8 – Considerações Finais.....	73
<b>CAPÍTULO V – DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE DE DESEMPENHO E TESTE DE ADERÊNCIA DO MODELO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO.....</b>	<b>75</b>
5.1 – Considerações Iniciais.....	75
5.2 – Aspectos Teóricos Simplificados.....	75
5.3 – Dimensionamento e Projeto do Supressor Eletromagnético.....	78
5.4 – Procedimentos Experimentais, Materiais e Equipamentos.....	83
5.4.1 – Fonte de Alimentação e Aquisição de Dados.....	84
5.4.2 – Aplicativos Computacionais para Controle e Processamento de Sinais.....	85
5.4.3 – Carga Não-Linear.....	85
5.4.4 – Carga Linear.....	86
5.4.5 – Filtro Eletromagnético.....	88
5.4.6 – Bloqueador Eletromagnético.....	88
5.4.7 – Filtros Ressonantes.....	88
5.4.8 – Transformador de Acoplamento.....	89
5.5 – Teste de Aderência para o Modelo do Supressor Eletromagnético.....	90
5.6 – Resultados Experimentais.....	94
5.7 – Considerações Finais.....	112
<b>CAPÍTULO VI – OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM HARMÔNICA.....</b>	<b>114</b>
6.1 – Considerações Iniciais.....	114
6.2 – Análise no Domínio do Tempo e Validação dos Resultados do Modelo.....	114
6.3 – Otimização da Filtragem.....	117
6.4 – Considerações Finais.....	125
<b>CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>127</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>132</b>

## CAPÍTULO I

---

### ESTADO DA ARTE

#### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, temas relacionados à “Qualidade da Energia Elétrica” vêm despertando crescente interesse dentro do cenário elétrico mundial.

Com o desenvolvimento acelerado da eletrônica de potência, o sistema elétrico vem atravessando uma série de transformações decorrentes de diversos fatores, dentre eles, a constante alteração da natureza das cargas consumidoras, a proliferação da co-geração, o peso crescente de questões ambientais relacionadas à questão da geração e a desregulamentação quanto a normas para emissão de “energia limpa”.

Grande parte das cargas atuais é composta por dispositivos não-lineares, como diodos, tiristores, transistores, etc. Esses dispositivos estão associados ao uso da energia elétrica de modo mais eficiente e possibilitam um processo de controle mais preciso no setor industrial. Decorrente da não-linearidade esses dispositivos são a causa de muitos dos problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

Os prejuízos econômicos decorrentes de falha e má operação na transmissão da energia elétrica atingem os mais distintos grupos de consumidores, tais como, residencial, comercial e industrial. Ainda que muito pequenas, as perturbações da ordem de mil segundos podem ocasionar uma pane geral no sistema onde tais dispositivos encontram-se alocados.

Consumidores da energia elétrica têm se mostrado cada vez mais exigentes quanto à questão da qualidade da energia fornecida, da mesma forma as concessionárias de eletricidade buscam atender às expectativas dos consumidores, mantendo sua confiança. A existência de uma legislação própria, a qual prevê penalidade aos fornecedores que não adéquam seu produto aos índices estabelecidos, contribui para o estudo e análise da qualidade da energia, objetivando conformidade e continuidade nos padrões da qualidade do fornecimento.

#### 1.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

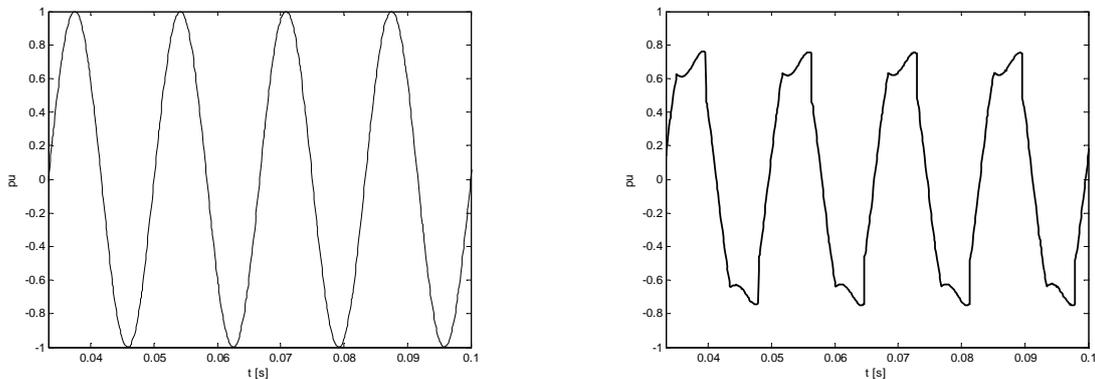
Diversos aspectos estão relacionados às definições do termo “Qualidade de Energia Elétrica”. Entre eles é possível citar a qualidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e corrente, e ainda interferências

em sistemas de comunicação. Neste contexto, desvios que possam ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracterizam uma rede elétrica com qualidade de suprimento comprometida (DUGAN, 2003).

As distorções harmônicas são um tipo de energia “poluída” que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma permanente, associadas ao elevado emprego de cargas não-lineares.

Nos sistemas elétricos os harmônicos são definidos como frequências múltiplas da forma de onda fundamental, ou seja, um circuito com 3ª ordem harmônica possui frequência harmônica de 180Hz para um sistema de frequência nominal de 60Hz. Os sistemas mecânicos também possuem harmônicos oscilatórios, onde existem vibrações com frequências múltiplas da fundamental ou múltiplas da frequência de escorregamento para o caso de motores de indução.

Os harmônicos, especialmente as correntes harmônicas, geradas por todas as cargas chamadas “não-lineares”, apresentam como resposta a um sinal elétrico de frequência fixa (tensão senoidal) uma resposta diferente do sinal de alimentação (FIGUEREDO, 1986). A seguir, apresenta-se o exemplo de uma forma de onda com distorções harmônicas em sua forma de onda original, figura 1.1.



(a) Forma de onda senoidal e periódica

(b) Forma de onda submetida a distorções harmônicas

Figura 1.1 – Comparativo entre formas de onda.

Em sistemas elétricos equilibrados com cargas não-lineares são detectadas distorções harmônicas que, por muitas vezes ocasionam desequilíbrios de tensões e correntes. Neste contexto, para que seja possível separar as tensões e correntes desequilibradas em três sistemas equilibrados o método das componentes simétricas se apresenta como uma ferramenta muito atrativa para a descrição de tais arranjos. A metodologia das componentes

simétricas consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos diferentes, sendo extensivamente útil em estudos de desempenho de sistemas de potência. Tratando-se de sistemas elétricos trifásicos equilibrados, decompondo-se uma forma de onda de tensão ou corrente distorcida, as ordens harmônicas advindas desta decomposição, em termos de componentes simétricas de sequências de fase positiva, negativa e zero, são as apresentadas na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Distribuição sequencial de componentes harmônicas.

<i>Seq.</i>	<i>Fund.</i>	<i>2h</i>	<i>3h</i>	<i>4h</i>	<i>5h</i>	<i>6h</i>	<i>7h</i>	<i>8h</i>	<i>9h</i>
$I_+$	✓			✓			✓		
$I_-$		✓			✓			✓	
$I_0$			✓			✓			✓

Conhecer a sequência de fases de cada ordem harmônica é fundamental em decorrência ao fato de que os princípios de funcionamento dos equipamentos de atenuação harmônica, bem como o comportamento das harmônicas de sequência zero, estão baseados nas propriedades apresentadas na tabela acima.

### 1.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE SEQUÊNCIA ZERO

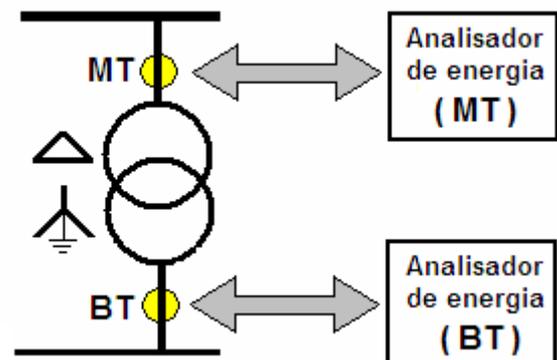
Tendo em vista o interesse desta dissertação, nesta seção a atenção é voltada especialmente à presença das denominadas harmônicas triplas ou “*triplens*”, ou seja, aquelas que são múltiplas da terceira harmônica ( $h = 3, 9, 15, 21, \dots$ ). Estas frequências se manifestam na forma de componentes de sequência zero exigindo, para sua presença no sistema elétrico, a existência de conexões em estrela aterrada para o suprimento e para a carga e, quando isto ocorre surge um grande carregamento para o neutro do sistema trifásico (VENDRAMINI, 2006). Este carregamento de neutro, dentre outros efeitos, constitui-se em grande nocividade para o funcionamento de muitos sistemas.

As componentes de sequência zero podem ainda ser notadas em instalações trifásicas em que a rede e/ou carga se apresentam desequilibradas. Em situações como essa além das chamadas “*triplens*”, é possível perceber que as demais frequências também podem produzir componentes de sequência com as características da sequência zero, aqui consideradas. A título de exemplo, a figura 1.2 ilustra o emprego real de dois analisadores de energia

instalados na baixa e média tensão da rede elétrica. É possível efetuar a análise harmônica das correntes medidas realizando decomposição do sinal através da Transformada Discreta de Fourier. A figura 1.3 ilustra as componentes harmônicas sequenciais das correntes na baixa tensão, as quais apresentam uma densa distribuição sequencial.



(a) Analisador de energia instalado no sistema.



(b) Pontos de instalação do analisador de energia.

Figura 1.2 - Ilustra a instalação real de um analisador de energia na rede elétrica.

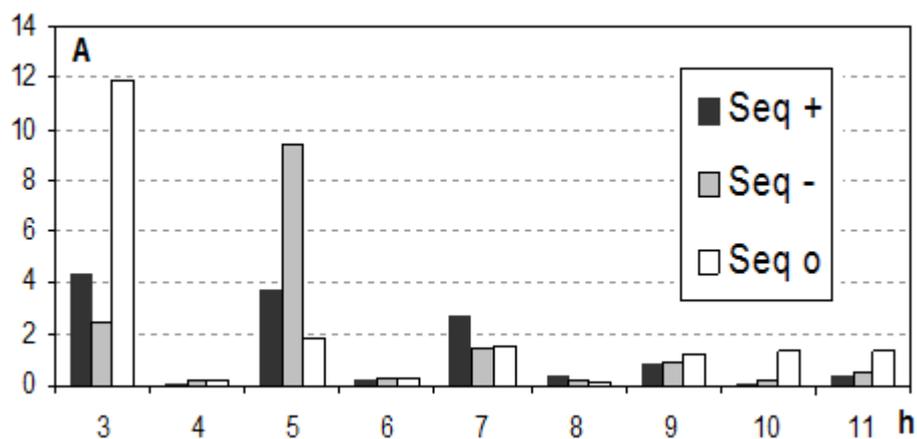


Figura 1.3 – Espectro harmônico de componentes sequenciais das correntes na baixa tensão.

Alguns problemas são comumente ocasionados pelas distorções harmônicas de sequência zero, dentre eles pode-se citar o sobreaquecimento do condutor neutro, interferências em sistemas de comunicação, diferenças de potenciais entre terra e neutro, etc.

Em decorrência de prejuízos econômicos causados por distorções harmônicas de tensão e/ou corrente na rede elétrica e objetivando manter a emissão de harmônicos dentro dos níveis recomendados, surge a necessidade de medidas mitigadoras para redução dessas distorções presentes nos barramentos e linhas de um complexo elétrico.

#### 1.4 QUANTIFICAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Com base nas formulações de Fourier, chegou-se a uma expressão muito utilizada, que determina a distorção total de uma forma de onda não-senoidal em função de sua componente fundamental. A taxa de distorção harmônica foi definida como consequência da necessidade de se quantificar numericamente os harmônicos de tensão ou corrente existentes em um determinado ponto do sistema elétrico. Segundo a definição dada pela norma IEEE AS 519-1992 este parâmetro representa a relação entre o valor eficaz dos harmônicos e o valor eficaz da componente fundamental, sendo calculado com base nas equações (1.1) a (1.4):

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100(\%) \quad (1.1)$$

$$DTI = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100(\%) \quad (1.2)$$

Sendo:

*DTT* - distorção harmônica total de tensão;

*DTI* - distorção harmônica total de corrente;

$V_h$  - valor eficaz da tensão para h-ésima ordem harmônica;

$I_h$  - o valor eficaz da corrente para h-ésima ordem harmônica;

$V_1$  - valor eficaz da tensão fundamental;

$I_1$  - valor eficaz da corrente fundamental;

$h$  - ordem da componente harmônica.

A fórmula para cálculo da Taxa de Distorção Harmônica Individual de tensão e corrente é mostrada a seguir:

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100(\%) \quad (1.3)$$

$$DII_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100(\%) \quad (1.4)$$

Sendo:

$DIT_h$  - distorção harmônica individual de tensão para h-ésima ordem harmônica;

$DII_h$  - distorção harmônica individual de corrente para h-ésima ordem harmônica.

Com base na distorção harmônica total, deduz-se que quando não existe poluição harmônica a distorção é nula. Portanto, quanto mais baixa for a distorção, menor será o grau de deformação da onda amostrada.

## 1.5 NORMAS E LEGISLAÇÕES SOBRE HARMÔNICOS

As distorções nas grandezas do sistema elétrico, provocadas pela presença de harmônicos têm crescido em grandes proporções pelas razões previamente apontadas.

Os principais efeitos nocivos dos harmônicos nos equipamentos e componentes dos sistemas elétricos são (IEEE TASK FORCE, 1993):

- Avarias, falhas e mau funcionamento de aparelhos mais sensíveis ligados à rede, nomeadamente computadores, sistemas de controle comandados por microcontroladores, etc;
- Aumento nas perdas dos condutores;
- Disparos intempestivos de alguns dispositivos de corte e proteção;
- Erros nos aparelhos de medida de energia elétrica e nos instrumentos de medição;
- Vibrações mecânicas nas máquinas elétricas;
- Aumento das perdas, saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil dos transformadores;
- Aquecimento, ruído audível, fadiga mecânica e consequente redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas e acessórios mecânicos a elas acoplados;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker*) no caso da ocorrência de inter-harmônicos;

- Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Interferência eletromagnética com equipamentos de comunicações.

No quesito “Normas de Qualidade de Energia” a Europa é continente mais avançado. A norma EN50160 foi adotada por vários países do continente (EUROPEAN STANDARD EN 50160, 1994). Já nos EUA, muitas concessionárias têm usado a norma IEEE AS 519-1992 apenas como referência e raramente incluem cláusulas sobre este tema nos contratos com clientes. Entretanto, o clima de desregulamentação pode significar que contratos com cláusulas de qualidade de energia possam vir a ser comuns no futuro.

No âmbito nacional, as ações recentemente encaminhadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), fixaram limites operacionais aceitáveis para as distorções harmônicas (PRODIST, 2008).

O monitoramento dos sinais através de sistemas de medição baseados em tecnologia com microprocessadores é imprescindível para a avaliação dos níveis de distorção harmônica. A capacidade de armazenamento dos sinais deve ser compatível com o protocolo de medição a ser definido pela ANEEL. Considerando sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônicas devem ser feitas no esquema fase-neutro para sistema estrela aterrado e fase-fase para as demais configurações.

Tendo como objetivo o cálculo da distorção harmônica total, o espectro harmônico deve compreender uma faixa de frequências que contenha desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais devem ser iguais ou inferiores aos valores dados na tabela 1.2 (EUROPEAN STANDARD EN 50160, 1994).

*Tabela 1.2 – Valores de referência global das distorções harmônicas totais (% da tensão fundamental)*

<b>Tensão nominal do Barramento</b>	<b>Distorção Harmônica Total de Tensão (%)</b>
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$	3

Devem ser obedecidos também os demais valores das distorções harmônicas individuais de tensão indicadas na tabela 1.3 (EUROPEAN STANDARD EN 50160, 1994).

Tabela 1.3 – Níveis de referência para Distorção Harmônica Individual de Tensão (% da tensão fundamental)

harmônicas	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	h	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$
<i>Ímpares não múltiplas de 3</i>	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
<i>ímpares múltiplas de 3</i>	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
<i>pares</i>	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

## 1.6 SOLUÇÕES PARA MITIGAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Diversos procedimentos são utilizados para correção de distorções na forma de onda em sistemas de distribuição. Os equipamentos eletromagnéticos têm se firmado como uma importante alternativa para a preservação da qualidade do suprimento em esquemas de filtragem de correntes harmônicas.

A utilização de filtros e dispositivos de compensação harmônica são técnicas comumente aplicadas para a mitigação harmônica.

Os filtros ativos firmaram-se como uma solução tecnicamente acessível. Esses dispositivos são fundamentados na eletrônica de potência e seu funcionamento é dado pela injeção de correntes harmônicas de mesma magnitude que as produzidas pelas cargas não-lineares, porém com uma defasagem tal que proporcione a compensação harmônica desejada no projeto do equipamento (PENG, 2001). Esses filtros incorporam funções adicionais de controle para a compensação de energia reativa e desbalanceamento de correntes. Ao mesmo tempo eles não provocam ressonâncias que poderão prejudicar o sistema de distribuição, evitando assim a amplificação de harmônicos. Os filtros ativos apresentam inúmeras vantagens operacionais sobre os passivos.

Na escala de filtros passivos, podem-se identificar duas principais categorias, os filtros ressonantes e os supressores eletromagnéticos.

Os filtros passivos ressonantes compostos por indutores, capacitores e resistores são configurados de forma a sintonizar a frequência que se deseja eliminar. Entre as principais vantagens de sua aplicação, destacam-se a robustez, a confiabilidade operacional, a ausência de sensibilidade a surtos e sua operação silenciosa, sendo ainda amplamente utilizados por apresentarem menores custos se comparados a outros dispositivos de mitigação harmônica (OLIVEIRA, 2010).

O supressor eletromagnético é composto pela operação conjunta de dois distintos dispositivos de atenuação harmônica, o bloqueador e o filtro eletromagnético. Para melhor compreensão de seus princípios operacionais, os dispositivos eletromagnéticos são divididos em duas categorias diferenciadas pela funcionalidade apresentada com respeito à sua impedância de sequência zero.

Os filtros eletromagnéticos baseiam-se exclusivamente no uso de arranjos eletromagnéticos e dispensam o emprego de capacitores ou outros recursos. Ainda dentro da categoria de filtros eletromagnéticos são apresentadas duas vertentes. A primeira está associada à sua utilização como compensador de harmônicos. Neste caso o princípio operacional está relacionado com o controle do nível de saturação magnética do dispositivo eletromagnético para controlar a amplitude e a defasagem das componentes harmônicas geradas no sentido de proporcionar a compensação dos demais harmônicos no sistema elétrico (APOLÔNIO, 2004). A segunda está associada à sua utilização como atenuador da propagação das componentes harmônicas de sequência zero, promovendo a minimização da impedância equivalente de sequência zero do filtro através de um arranjo de enrolamentos por fase, ligado em paralelo com a carga não-linear. As referências (APOLÔNIO, 2003 – APOLÔNIO, 2004) apresentam um estudo específico sobre o filtro eletromagnético de sequência zero.

Outra aplicação ainda pouco explorada na literatura é a utilização de bloqueadores eletromagnéticos. Este dispositivo é concebido a partir de três bobinas magneticamente acopladas e dispostas sobre um mesmo núcleo e quando conectados em série com a rede elétrica, apresentam uma alta impedância para as componentes de sequência zero e podem minimizar a circulação das harmônicas “triplens” (OLIVEIRA, 2009). Estes dispositivos podem operar isoladamente ou atuar como dispositivo auxiliar adaptador de impedâncias para os filtros eletromagnéticos instalados em sistemas com alto nível de curto circuito no PAC (CZARNECKI, 1994; DAHONO, 1997).

## **1.7 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação tem como proposta o estudo da operação combinada de dois distintos dispositivos redutores de componentes harmônicas de sequência zero.

Nesta associação, o dispositivo é composto por um bloqueador de alta impedância e um filtro de baixa impedância para as componentes harmônicas de sequência zero, proporcionando o bloqueio e desvio de sua circulação, respectivamente. Por outro lado, visando à maximização do sistema de filtragem de um modo geral, são associados ainda, filtros ressonantes sintonizados, que têm sua funcionalidade direcionada especificamente para a supressão ou atenuação de determinadas ordens harmônicas as quais os dispositivos eletromagnéticos não afetam, criando, para estas, um caminho de baixa impedância. Sob determinadas condições de geração de harmônicas, este arranjo se apresenta como uma solução bastante atraente tanto do ponto de vista operacional quanto econômico.

Em decorrência dos benefícios citados, esta dissertação apresenta estudos teóricos, simulados e experimentais sobre o comportamento deste novo arranjo de filtragem harmônica.

Quanto ao emprego de modelos matemáticos para estudos abrangendo filtros e bloqueadores eletromagnéticos, destacam-se algumas iniciativas envolvendo técnicas no domínio do tempo, as quais, por vezes, não oferecem recursos para uma análise detalhada do desempenho de um sistema de filtragem harmônica, dificultando, assim, a identificação de ações para a melhoria contínua de sua funcionalidade. Esta causa representa uma limitação considerável quando se trata da operação conjunta de diferentes arranjos de filtragem. Sendo assim, esta dissertação tem como principais metas, a busca de modelos matemáticos que reúnam as vantagens proporcionadas pelos modelos no domínio da frequência e que, como um complemento, as técnicas no domínio do tempo venham, através de uma base comparativa, afirmar a consistência dos resultados e destacar as potencialidades do modelo proposto.

## **1.8 ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO**

Os capítulos II e III reúnem as considerações teóricas e os desenvolvimentos matemáticos relacionados com a proposição de modelos para representação analítica de filtros e bloqueadores eletromagnéticos, respectivamente.

O capítulo IV apresenta as metodologias utilizadas para avaliação de desempenho do sistema de filtragem proposto, composto pelo supressor eletromagnético e por filtros

ressonantes. O método de avaliação foi concebido a partir de técnicas no domínio da frequência, associada à representação da rede elétrica pelas suas componentes sequenciais.

No capítulo V são abordados os principais aspectos relacionados com o dimensionamento do supressor eletromagnético, com ênfase a maximização de sua funcionalidade como bloqueador e filtro de sequência zero. São apresentadas as principais características dos protótipos de baixa potência construídos, utilizados para investigações experimentais e, são realizados testes de aderência do modelo proposto através de uma confrontação entre resultados experimentais e simulados.

O capítulo VI apresenta diferentes combinações de filtragem sobre diferentes condições operacionais e parâmetros do sistema, utilizando-se um aplicativo computacional com interface interativa baseado nos modelos propostos. Para destacar as potencialidades do modelo, ainda na ótica de simulação digital, utiliza-se também um simulador no domínio do tempo de ampla aceitação no meio de ciências exatas e engenharias, o *Matlab/Simulink*<sup>®</sup>.

Finalmente, no capítulo VII, são destacadas, resumidamente, as principais conclusões obtidas ao longo dos capítulos anteriores, indicando as contribuições distintas relativas à originalidade e importância deste trabalho na atenuação de harmônicas. São apresentadas também algumas propostas de trabalhos futuros e sugestões abrangendo o desenvolvimento do tema.

## FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das formas para atenuação da injeção de harmônicas de sequência zero nas redes elétricas de suprimento e respectivos neutros fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos (VENDRAMINI, 2006). Este estudo está direcionado ao emprego da estratégia que consiste no uso de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se obtém um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de sequência zero. Este arranjo foi denominado “Filtro Eletromagnético de Sequência Zero” (APOLÔNIO, 2004; OLIVEIRA, 2009).

### 2.2 FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

Através do arranjo mostrado na figura 2.1 é possível visualizar o mecanismo de compensação das componentes harmônicas de sequência zero, ou seja, a terceira harmônica e seus múltiplos. O objetivo do filtro conectado em paralelo a uma carga geradora de harmônicas é prover meios para que as mencionadas componentes harmônicas de sequência zero fiquem restritas ao circuito composto pela carga e o filtro propriamente dito (VENDRAMINI, 2006), não havendo alteração do conteúdo harmônico produzido pela carga, e sim, um desvio em seu caminho de circulação.

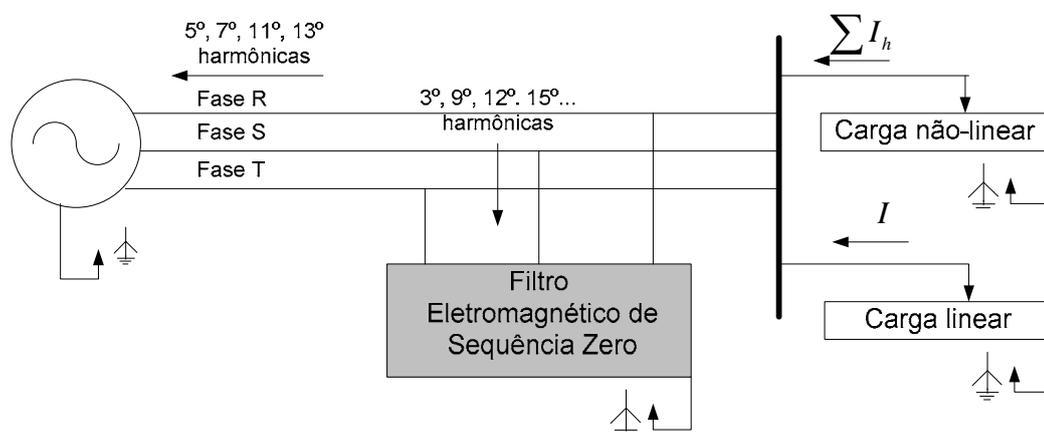


Figura 2.1 - Instalação convencional do filtro eletromagnético de sequência zero.

As componentes harmônicas de sequência zero predominam em instalações elétricas cujas cargas não-lineares estão conectadas entre uma fase e o neutro. Como exemplo de uso comum é possível citar microcomputadores, iluminação fluorescente, impressoras, etc. Nestes casos, há possibilidade de sobrecargas nos condutores neutros devido à presença de correntes harmônicas, que poderão vir a causar efeitos indesejáveis no sistema, como por exemplo, diferença de potencial entre o neutro e a terra, ruídos, ressonâncias, etc.

Para reduzir a gravidade destes efeitos, uma das soluções consiste na utilização de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se obtém um dispositivo capaz de oferecer caminho de baixa impedância, que pode se tornar preponderante em relação ao restante do circuito elétrico ao qual pertence o dispositivo (OLIVEIRA, 2006).

As melhorias deste método na mitigação harmônica são perceptíveis e se mostram claramente reduzindo os níveis de corrente no condutor neutro.

Os filtros convencionais, estabelecidos em circuitos ressonantes sintonizados, utilizam combinações R, L e C para filtrar ordens harmônicas sintonizadas, enquanto o filtro eletromagnético de componentes de sequência zero, cuja função também é a de oferecer um caminho de baixa impedância para determinadas ordens harmônicas, se fundamenta na compensação interna dos harmônicos de ordem três e seus múltiplos (RAVAGNANI, 2007). O filtro eletromagnético é composto, por fase, de duas bobinas com mesmo número de espiras e dispostas em um mesmo braço magnético, sendo que, nesta dissertação, os enrolamentos superiores são denominados bobinas principais (P) e os inferiores bobinas auxiliares (A). A denominação não implica o grau de importância das bobinas, uma vez que é utilizada apenas para identificar cada conjunto de bobinas. Cada bobina principal de uma fase é interligada à bobina auxiliar de outra fase, e estas conectadas ao condutor neutro, formando, então, uma conexão zigue-zague (RAVAGNANI, 2007).

### **2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA – ARRANJO ELETROMAGNÉTICO COM NÚCLEO DE TRÊS COLUNAS**

Baseado em modelagens desenvolvidas em trabalhos anteriores (RAVAGNANI, 2007) pode-se concluir que, qualquer que seja a configuração do núcleo magnético, os arranjos eletromagnéticos propostos apresentam um comportamento similar com respeito às impedâncias sequenciais. Portanto, será abordado neste trabalho, um arranjo de núcleos

trifásicos. A figura 2.2 mostra o arranjo eletromagnético com núcleo de três colunas utilizado na concepção dos filtros eletromagnéticos de sequência zero.

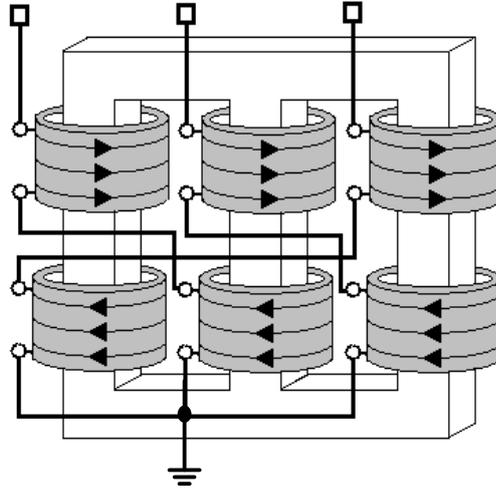


Figura 2.2 – Arranjo eletromagnético.

Este arranjo é composto por duas bobinas idênticas, denominadas principal e auxiliar, dispostas sobre uma mesma coluna do núcleo magnético. A associação série é composta pela bobina de um ramo magnético do núcleo denominada principal, conectada diretamente a uma das fases do sistema alimentador, e em contra-fase a uma bobina denominada auxiliar de outro ramo magnético do núcleo. A interligação trifásica do conjunto de bobinas é efetuada no sentido de compor um sistema trifásico em estrela aterrado (BELCHIOR, 2006).

Visando redução de custo, é comum a utilização de núcleos magnéticos trifásicos. Esta escolha implica em acoplamentos mútuos entre todas as bobinas que compõe o arranjo magnético, refletindo diretamente em uma maior complexidade do modelo matemático. No decorrer deste trabalho algumas simplificações serão adotadas tendo o objetivo de estabelecer alguns procedimentos construtivos que maximizem a funcionalidade desejada (RAVAGNANI, 2007).

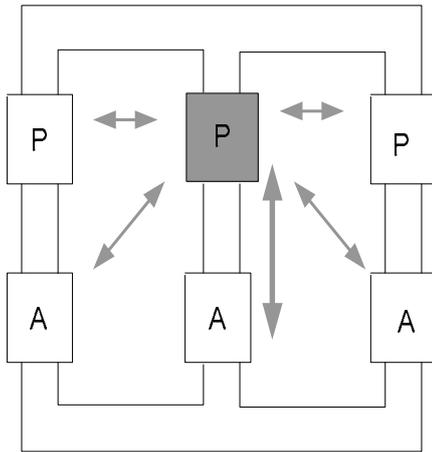
Algumas das simplificações expostas aqui estão diretamente relacionadas à similaridade construtiva dos enrolamentos, simetrias do núcleo e linearidade do meio magnético.

O filtro eletromagnético de sequência zero deve (BELCHIOR, 2006):

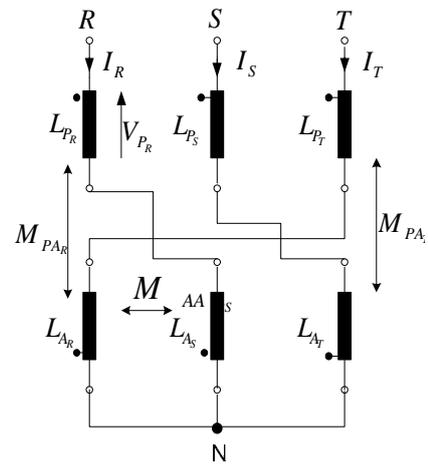
- Operar na região linear;
- Possuir enrolamentos de uma mesma coluna, com indutâncias próprias de igual valor que proporcionarão um filtro ideal para as componentes de sequência zero;

- Apresentar coeficiente de acoplamento magnético ( $\lambda$ ), entre os enrolamentos principal e auxiliar de uma mesma coluna de valor unitário.

A figura 2.3(a) ilustra para uma das bobinas, todos os acoplamentos magnéticos a serem considerados. A interconexão dos conjuntos das bobinas é mostrado na figura 2.3(b).



(a) Acoplamentos magnéticos



(b) Conexões elétricas

Figura 2.3 – Filtro eletromagnético com núcleo de três colunas.

A partir do diagrama elétrico ilustrado na figura 2.3(b) podem ser obtidas as equações que regem o funcionamento do filtro eletromagnético. O conjunto de equações (2.1) e (2.2) mostram as relações entre tensões e correntes nas bobinas principais e auxiliares, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 V_{P_R} &= L_{P_R} \cdot \frac{di_R}{dt} + M_{P_{ARS}} \cdot \frac{di_R}{dt} + M_{P_{ART}} \cdot \frac{di_S}{dt} - M_{P_{AR}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{P_{PRS}} \cdot \frac{di_S}{dt} - M_{P_{PRT}} \cdot \frac{di_T}{dt} \\
 V_{P_S} &= L_{P_S} \cdot \frac{di_S}{dt} + M_{P_{AST}} \cdot \frac{di_S}{dt} + M_{P_{ASR}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{P_{AS}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{P_{PSR}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{P_{PST}} \cdot \frac{di_T}{dt} \\
 V_{P_T} &= L_{P_T} \cdot \frac{di_T}{dt} + M_{P_{ATR}} \cdot \frac{di_T}{dt} + M_{P_{ATS}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{P_{AT}} \cdot \frac{di_S}{dt} - M_{P_{PTR}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{P_{PTS}} \cdot \frac{di_S}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
 V_{A_R} &= L_{A_R} \cdot \frac{di_T}{dt} + M_{A_{PRS}} \cdot \frac{di_S}{dt} + M_{A_{PRT}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{P_{AR}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{A_{ARS}} \cdot \frac{di_R}{dt} - M_{A_{ART}} \cdot \frac{di_S}{dt} \\
 V_{A_S} &= L_{A_S} \cdot \frac{di_R}{dt} + M_{A_{PSR}} \cdot \frac{di_R}{dt} + M_{A_{PST}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{P_{AS}} \cdot \frac{di_S}{dt} - M_{A_{ASR}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{A_{AST}} \cdot \frac{di_S}{dt} \\
 V_{A_T} &= L_{A_T} \cdot \frac{di_S}{dt} + M_{A_{PTR}} \cdot \frac{di_R}{dt} + M_{A_{PTS}} \cdot \frac{di_S}{dt} - M_{P_{AT}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{A_{ATR}} \cdot \frac{di_T}{dt} - M_{A_{ATS}} \cdot \frac{di_R}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Sendo:

$L_{P_i}$  – indutância própria do enrolamento principal da fase  $i$ ;

$L_{A_i}$  – indutância própria do enrolamento auxiliar da fase  $i$ ;

$M_{PA_i}$  – indutância mútua entre os enrolamentos principal e auxiliar da fase  $i$ ;

$M_{PP_{ij}}$  – indutância mútua entre enrolamentos principais das fases  $i$  e  $j$ ;

$M_{PA_{ij}}$  – indutância mútua entre enrolamentos principal e auxiliar das fases  $i$  e  $j$ ;

$M_{AA_{ij}}$  – indutância mútua entre enrolamentos auxiliares das fases  $i$  e  $j$ ;

$i_R, i_S, i_T$  – correntes nas fases R, S e T, respectivamente.

De forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{P_R} \\ V_{P_S} \\ V_{P_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{P_R} + M_{PA_{RS}}) & -(M_{PP_{RS}} - M_{PA_{RT}}) & -(M_{PA_R} + M_{PP_{RT}}) \\ -(M_{PA_S} + M_{PP_{SR}}) & (L_{P_S} + M_{PA_{ST}}) & -(M_{PP_{ST}} - M_{PA_{SR}}) \\ -(M_{PP_{TR}} - M_{PA_{TS}}) & -(M_{PA_T} + M_{PP_{TS}}) & (L_{P_T} + M_{PA_{TR}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_R/dt \\ di_S/dt \\ di_T/dt \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{A_R} \\ V_{A_S} \\ V_{A_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(M_{PA_R} + M_{AA_{RS}}) & -(M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) & (L_{A_R} + M_{AP_{RT}}) \\ (L_{A_S} + M_{AP_{SR}}) & -(M_{PA_S} + M_{AA_{ST}}) & -(M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) \\ -(M_{AA_{TS}} - M_{AP_{TR}}) & (L_{A_T} + M_{AP_{TS}}) & -(M_{PA_T} + M_{AA_{TR}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_R/dt \\ di_S/dt \\ di_T/dt \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

As relações entre tensões e correntes harmônicas para as bobinas principais e auxiliares no domínio da frequência, para  $h$ -ésima ordem, são apresentadas nas equações (2.5) e (2.6):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{P_R} \\ \dot{V}_{P_S} \\ \dot{V}_{P_T} \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} (L_{P_R} + M_{PA_{RS}}) & -(M_{PP_{RS}} - M_{PA_{RT}}) & -(M_{PA_R} + M_{PP_{RT}}) \\ -(M_{PA_S} + M_{PP_{SR}}) & (L_{P_S} + M_{PA_{ST}}) & -(M_{PP_{ST}} - M_{PA_{SR}}) \\ -(M_{PP_{TR}} - M_{PA_{TS}}) & -(M_{PA_T} + M_{PP_{TS}}) & (L_{P_T} + M_{PA_{TR}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_R \\ \dot{i}_S \\ \dot{i}_T \end{bmatrix}^h \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A_R} \\ \dot{V}_{A_S} \\ \dot{V}_{A_T} \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} -(M_{PA_R} + M_{AA_{RS}}) & -(M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) & (L_{A_R} + M_{AP_{RT}}) \\ (L_{A_S} + M_{AP_{SR}}) & -(M_{PA_S} + M_{AA_{ST}}) & -(M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) \\ -(M_{AA_{TS}} - M_{AP_{TR}}) & (L_{A_T} + M_{AP_{TS}}) & -(M_{PA_T} + M_{AA_{TR}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_R \\ \dot{i}_S \\ \dot{i}_T \end{bmatrix}^h \quad (2.6)$$

A equação (2.7) mostra as tensões compostas para as fases R, S e T:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{V}_S \\ \dot{V}_T \end{bmatrix}^h = \begin{bmatrix} \dot{V}_{P_R} \\ \dot{V}_{P_S} \\ \dot{V}_{P_T} \end{bmatrix}^h + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A_S} \\ \dot{V}_{A_T} \\ \dot{V}_{A_R} \end{bmatrix}^h \quad (2.7)$$

Nestas condições, as equações de análise são:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Rh} \\ \dot{V}_{Sh} \\ \dot{V}_{Th} \end{bmatrix} = jh\omega \begin{bmatrix} L_{RR} & -L_{RS} & -L_{RT} \\ -L_{SR} & L_{SS} & -L_{ST} \\ -L_{TR} & -L_{TS} & L_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{Rh} \\ \dot{I}_{Sh} \\ \dot{I}_{Th} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A representação da equação (2.8) em função das suas componentes sequenciais pode ser obtida a partir das expressões (2.9) a (2.17).

$$L_{RR} = L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{PA_{SR}} \quad (2.9)$$

$$L_{SS} = L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{PA_{TS}} \quad (2.10)$$

$$L_{TT} = L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{PA_{RT}} \quad (2.11)$$

$$L_{RS} = M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{TR}} \quad (2.12)$$

$$L_{SR} = M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{AP_{TR}} \quad (2.13)$$

$$L_{ST} = M_{PA_T} + M_{PP_{ST}} + M_{AA_{TR}} - M_{PA_{SR}} \quad (2.14)$$

$$L_{TS} = M_{PA_T} + M_{PP_{ST}} + M_{AA_{TR}} - M_{PA_{RS}} \quad (2.15)$$

$$L_{TR} = M_{PA_R} + M_{PP_{TR}} + M_{AA_{RS}} - M_{PA_{ST}} \quad (2.16)$$

$$L_{RT} = M_{PA_R} + M_{PP_{TR}} + M_{AA_{RS}} - M_{AP_{TS}} \quad (2.17)$$

A modelagem deste trabalho deve ser direcionada a uma análise no espaço matemático das componentes sequenciais. Genericamente, a transformação linear de componentes de fase para componentes simétricas, é dada por:

$$T \cdot \dot{V}_{012} = jh\omega \cdot L \cdot T \cdot \dot{I}_{012} \quad (2.18)$$

Onde a matriz de transformação ‘ $T$ ’, é dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sendo:

$$\alpha = 1\angle 120^\circ \quad (2.20)$$

Desta maneira, multiplicando a equação (2.18) pela matriz de transformação inversa, tem-se:

$$T^{-1} \cdot T \cdot \dot{V}_{012} = jh\omega T^{-1} \cdot L \cdot T \cdot \dot{I}_{012} \quad (2.21)$$

Onde:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Deste modo, obtem-se a transformação linear das componentes de fase para as componentes simétricas, como mostra a equação (2.23):

$$\dot{V}_{012} = jh\omega T^{-1} \cdot L \cdot T \cdot \dot{I}_{012} \quad (2.23)$$

Nestas condições, têm-se, resumidamente:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^h \quad (2.24)$$

A equação (2.24) pode ser escrita de maneira compacta:

$$\dot{V}_{012} = jh\omega L_{012} \cdot \dot{I}_{012} \quad (2.25)$$

Sendo  $L_{012}$  a matriz de indutâncias sequenciais.

As indutâncias sequenciais são dadas pelas expressões (2.26) a (2.33).

$$L_{00} = \frac{1}{3} \left[ \sum (L_{P_i} + L_{A_i} - 2M_I) - 2M_{PP_{RS}} - 2M_{PP_{RT}} - 2M_{PP_{ST}} - 2M_{AA_{ST}} - 2M_{AA_{SR}} - 2M_{AA_{TR}} + M_{PA_{RS}} + M_{PA_{ST}} + M_{PA_{TR}} + 2M_{PA_{RT}} + 2M_{PA_{SR}} + M_{AP_{SR}} + M_{AP_{ST}} + M_{AP_{RT}} + 2M_{AP_{ST}} \right] \quad (2.26)$$

$$L_{11} = L_{22} = \frac{1}{3} \left[ \sum (L_{P_i} + L_{A_i} + M_i) + M_{PP_{RS}} + M_{PP_{RT}} + M_{PP_{ST}} + M_{AA_{ST}} + M_{AA_{SR}} + M_{AA_{TR}} + M_{PA_{RS}} + M_{PA_{ST}} + \right. \\ \left. + M_{PA_{TR}} - M_{PA_{RT}} - M_{PA_{SR}} + M_{AP_{SR}} + M_{AP_{TS}} + M_{AP_{RT}} - M_{AP_{ST}} \right] \quad (2.27)$$

$$L_{01} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} + M_{PA_{TR}} + M_{PP_{TS}} + M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) + \alpha^2 (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + \right. \\ \left. + M_{PA_{AR}} + M_{PP_{RT}} + M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) + \alpha (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} + M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.28)$$

$$L_{02} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} + M_{PA_{TR}} + M_{PP_{TS}} + M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) + \alpha (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + M_{PA_R} + \right. \\ \left. + M_{PP_{RT}} + M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) + \alpha^2 (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} + M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.29)$$

$$L_{10} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} + M_{PA_{TR}} + M_{PP_{TS}} + M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) + \alpha (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + M_{PA_R} + \right. \\ \left. + M_{PP_{RT}} + M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) + \alpha^2 (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} + M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.30)$$

$$L_{12} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} - 2M_{PA_{TR}} - 2M_{PP_{TS}} - 2M_{AA_{RT}} - 2M_{AP_{RS}} + \alpha^2 (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + \right. \\ \left. - 2L_{m_R} - 2M_{PP_{RT}} - 2M_{AA_{SR}} - 2M_{AP_{ST}}) + \alpha (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} - 2L_{m_S} - 2M_{PP_{RS}} - 2M_{AA_{ST}} - 2M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.31)$$

$$L_{02} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} + M_{PA_{TR}} + M_{PP_{TS}} + M_{AA_{RT}} - M_{AP_{RS}}) + \alpha^2 (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + M_{PA_R} + \right. \\ \left. + M_{PP_{RT}} + M_{AA_{SR}} - M_{AP_{ST}}) + \alpha (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} + M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.32)$$

$$L_{21} = \frac{1}{3} \left[ (L_{P_R} + L_{A_S} + M_{PA_{RS}} + M_{AP_{SR}} - 2M_{PA_{TR}} - 2M_{PP_{TS}} - 2M_{AA_{RT}} + 2M_{AP_{RS}}) + \alpha (L_{P_S} + L_{A_T} + M_{PA_{ST}} + M_{AP_{TS}} + \right. \\ \left. - 2M_{PA_R} - 2M_{PP_{RT}} - 2M_{AA_{SR}} + 2M_{AP_{ST}}) + \alpha^2 (L_{P_T} + L_{A_R} + M_{PA_{TR}} + M_{AP_{RT}} - 2M_{PA_S} - 2M_{PP_{RS}} - 2M_{AA_{ST}} + 2M_{PA_{RT}}) \right] \quad (2.33)$$

## 2.4 CONDIÇÕES SIMPLIFICADORAS PARA ARRANJO COM NÚCLEO DE TRÊS COLUNAS

As simplificações aqui adotadas se referem às equações (2.26) a (2.33), as quais fornecem as indutâncias sequenciais para o dispositivo fundamentado em um núcleo magnético de três colunas. O arranjo eletromagnético é formado por dois enrolamentos justapostos sobre um mesmo núcleo magnético e tem por objetivo fazer com que haja um acoplamento livre de dispersões, que proporcione a maximização de sua funcionalidade, obtido através de um coeficiente de acoplamento de valor unitário, figura 2.4.

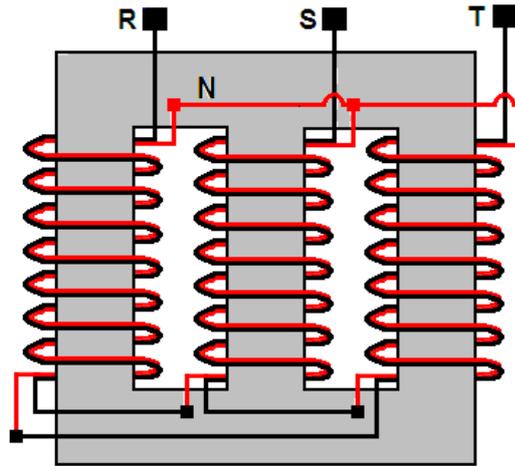


Figura 2.4 – Detalhe dos enrolamentos e interligação das bobinas..

Considerando-se, portanto, as indutâncias próprias idênticas de valor  $L_f$ , as indutâncias mútuas entre bobinas de uma mesma coluna idêntica  $M_f$ , e as indutâncias mútuas entre bobinas de colunas distintas idênticas,  $M$ , tem-se as seguintes igualdades:

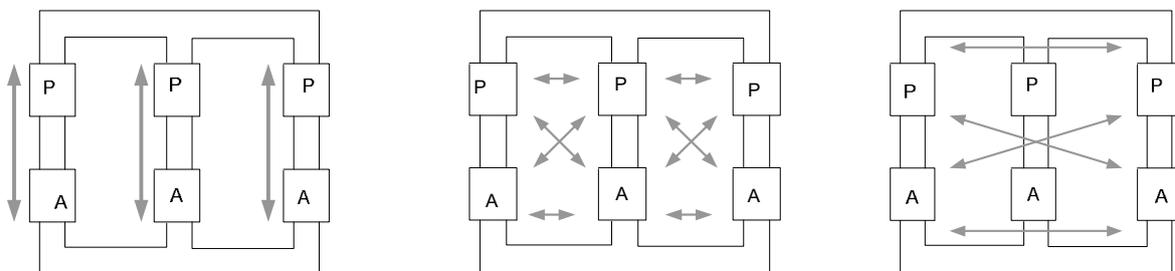
$$L_{P_R} = L_{P_S} = L_{P_T} = L_{A_R} = L_{A_S} = L_{A_T} = L_f \quad (2.34)$$

$$M_{PA_{TR}} = M_{PA_{RT}} \quad (2.35)$$

$$M_{PA_{ST}} = M_{PA_{TS}} \quad (2.36)$$

$$M_{PA_{SR}} = M_{PA_{RS}} \quad (2.37)$$

Pretendendo simplificar o item anterior, é possível considerar ainda outras simplificações fundamentadas na similaridade construtiva dos enrolamentos. Os aspectos geométricos e construtivos do núcleo ainda propõem simplificações referidas às indutâncias mútuas utilizadas no modelo, conforme ilustrado na figura 2.5.



(a) Indutância Mútua  $M_f$

(b) Indutância Mútua  $M_{adj}$

(c) Indutância Mútua  $M_{ext}$

Figura 2.5 – Indutâncias Mútuas.

Admitindo-se que as indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de uma mesma coluna magnética sejam idênticas, figura 2.5(a):

$$M_{PA_R} = M_{PA_S} = M_{PA_T} = M_f \quad (2.38)$$

As indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e adjacentes, figura 2.5(b), também podem ser consideradas iguais, pois, usualmente a montagem das bobinas é realizada de forma concêntrica e os fluxos mútuos percorrem o mesmo caminho magnético (RAVAGNANI, 2008). Sendo assim, pode-se considerar:

$$M_{PP_{RS}} = M_{PP_{ST}} = M_{AA_{RS}} = M_{AA_{ST}} = M_{PA_{RS}} = M_{PA_{ST}} = M_{adj} \quad (2.39)$$

As indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e externas, figura 2.5(c), são consideradas idênticas entre si, pelas mesmas razões mencionadas anteriormente, ou seja:

$$M_{PP_{RT}} = M_{AA_{RT}} = M_{PA_{RT}} = M_{ext} \quad (2.40)$$

$$M_{PP_{RT}} = M_{AA_{RT}} = M_{PA_{RT}} = M_{ext} \quad (2.41)$$

As simplificações adotadas até agora estão diretamente associadas à similaridade construtiva dos enrolamentos, simetrias do núcleo e linearidade do meio magnético, sendo, portanto, direcionadas a partir de uma sistemática construtiva direcionada para tais objetivos.

As indutâncias sequenciais calculadas a partir das expressões (2.26) a (2.33) resultam em:

$$L_{00} = 2(L_f - M_f) \quad (2.42)$$

$$L_{11} = L_{22} = 2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext} \quad (2.43)$$

$$L_{10} = L_{01} = \frac{1}{3}[(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext}) + \alpha^2(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext}) + \alpha(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext})] \quad (2.44)$$

$$L_{20} = L_{02} = \frac{1}{3}[(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext}) + \alpha(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext}) + \alpha^2(2L_f + M_f + 2M_{adj} + M_{ext})] \quad (2.45)$$

Então:

$$L_{10} = L_{01} = L_{20} = L_{02} \quad (2.46)$$

Considerando-se:

$$L_{12} = \frac{1}{3}[(2L_f - 2M_f - 2M_{ext} - 2M_{adj}) + \alpha^2(2L_f - 2M_f - 2M_{ext} - 2M_{adj}) + \alpha(2L_f - 2M_f - 4M_{adj})] \quad (2.47)$$

Então, tem-se:

$$L_{12} = \frac{2}{3}[-(1 + \alpha^2).(M_{ext} + M_{adj}) - \alpha(2M_{adj})] = \frac{2\alpha}{3}(M_{ext} - M_{adj}) \quad (2.48)$$

Considerando-se também:

$$L_{21} = \frac{1}{3}[(2L_f - 2M_f - 2M_{ext} + 2M_{adj}) + \alpha(2L_f - 2M_f - 2M_{ext} + 2M_{adj}) + \alpha^2(2L_f + 4M_{ext} - 2M_f - 4M_{adj})] \quad (2.49)$$

Tem-se, então:

$$L_{21} = \frac{2}{3}[-(1 + \alpha^2).(M_{ext} - M_{adj}) - 2\alpha^2(M_{ext} - M_{adj})] = 2\alpha(M_{ext} - M_{adj}) \quad (2.50)$$

Para as simplificações adotadas, é possível notar que as indutâncias mútuas entre o circuito equivalente de sequência zero e os circuitos equivalentes de seqüências positiva e negativa,  $L_{10}$  e  $L_{20}$ , são nulas. Este fato garante sob o ponto de vista de análise, que o comportamento das componentes de sequência zero de tensão e corrente pode ser investigado isoladamente (RAVAGNANI, 2008). O mesmo fato não se aplica para as demais seqüências, positiva e negativa, pois ainda persiste um acoplamento entre essas componentes, dados pelas indutâncias  $L_{12}$  e  $L_{21}$ .

Para um caso particular, onde novas aproximações são introduzidas, é possível admitir-se as igualdades destas indutâncias sem que a precisão numérica dos resultados almejados seja comprometida, já que o objetivo maior deste trabalho depende exclusivamente da indutância equivalente de sequência zero. Portanto, admitindo-se a igualdade:

$$M_{adj} = M_{ext} = M \quad (2.51)$$

Consequentemente:

$$L_{12} = L_{21} = 0 \quad (2.52)$$

$$L_{11} = L_{22} = 2L + M_f + 3M \quad (2.53)$$

Obtêm-se então, as relações entre as tensões e correntes sequenciais:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = jh\omega \begin{bmatrix} 2(L_f - M_f) & 0 & 0 \\ 0 & 2L_f + M_f + 3M & 0 \\ 0 & 0 & 2L_f + M_f + 3M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Pela equação (2.54) constata-se que, na medida em que o valor da indutância mútua entre as bobinas principal e auxiliar,  $M_f$ , se aproxima do valor da indutância própria das bobinas,  $L_f$ , a indutância equivalente de sequência zero tende a um valor mínimo. Idealmente, estas indutâncias se relacionam conforme apresentado na equação (2.55).

$$M_f = \lambda \sqrt{L_{Pf} \cdot L_{Af}} \quad (2.55)$$

Onde:

$\lambda$  - fator de acoplamento entre as bobinas;

$L_{Pf}$  - indutância própria do enrolamento principal;

$L_{Af}$  - indutância própria do enrolamento auxiliar;

O sistema de equações obtido em (2.54) representa os circuitos sequenciais desacoplados ilustrados na figura 2.6.

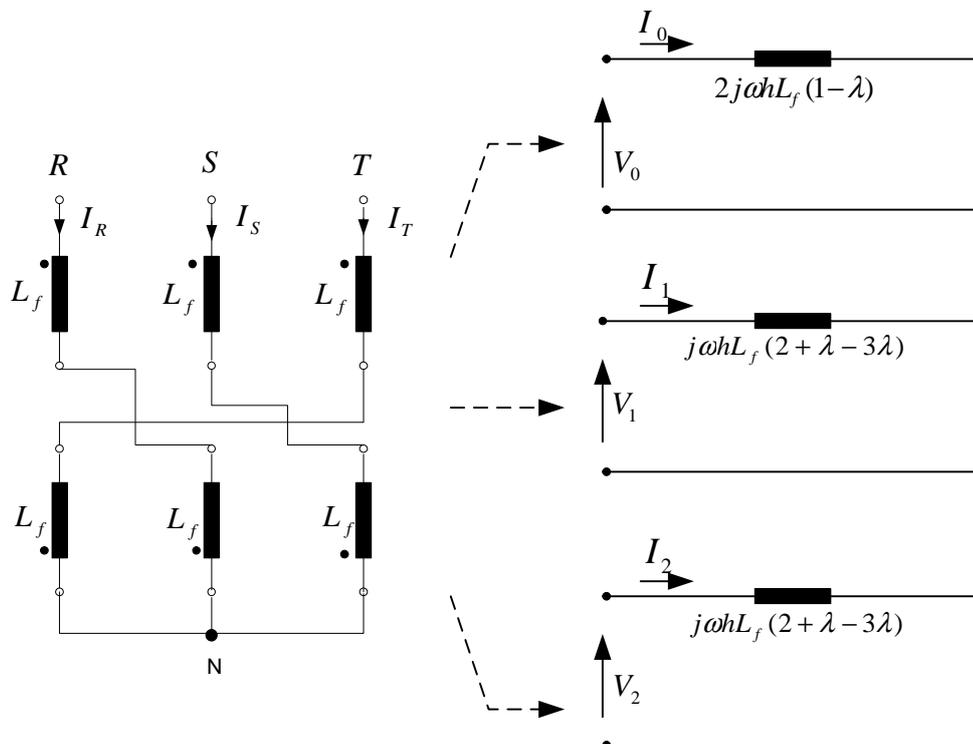


Figura 2.6 – Circuitos sequenciais desacoplados.

Vale dizer que, para um acoplamento perfeito ( $\lambda = 1$ ), a indutância para sequência zero resulta nula, ou seja,  $M_f = L_f$ . Pode-se dizer então que o dispositivo proposto representa um curto-circuito para todas as correntes de sequência zero, sendo, portanto, um filtro ideal para esta sequência.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as premissas metodológicas para a definição do modelo de um filtro eletromagnético no domínio da frequência, que contribui na mitigação de correntes harmônicas de sequência zero.

Foram feitos alguns comentários que tiveram como objetivo esclarecer os princípios físicos que norteiam a operação do filtro eletromagnético de sequência zero, ficando assim evidenciado o mecanismo através do qual se dá o surgimento de um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de sequência zero.

Foi proposto um modelo baseado nas componentes sequenciais de tensões e correntes de alimentação desse dispositivo e foram apresentadas hipóteses simplificadoras consideradas aceitáveis para a precisão numérica pretendida, tendo em vista a melhor interpretação de suas funcionalidades como filtro de componentes de sequência zero.

É possível afirmar que o principal parâmetro associado ao comportamento do dispositivo como filtro é o fator de acoplamento entre as bobinas de uma mesma coluna magnética, e que a maximização deste desempenho operacional está diretamente associada à concretização de acoplamentos quase perfeitos, ou seja, ideais.

O modelo apresentado neste capítulo será tomado como base para o prosseguimento desse trabalho.

## BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização do bloqueador eletromagnético de sequência zero propõe uma solução alternativa no que diz respeito à atenuação de componentes harmônicas nas redes elétricas de suprimento.

O emprego desse dispositivo eletromagnético consiste na inserção de um equipamento, que será conectado em série entre a fonte e um conjunto de cargas, oferecendo alta impedância para componentes harmônicas de sequência zero.

### 3.2 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

O bloqueador eletromagnético analisado neste trabalho foi desenvolvido e dimensionado para executar o bloqueio de sinais elétricos de tensões ou correntes harmônicas com forte expressão das componentes triplas. O arranjo eletromagnético ilustrado na figura 3.1 mostra o mecanismo de atenuação das referidas componentes harmônicas. O bloqueador de sequência zero realiza duas funções. A primeira é evitar que as correntes harmônicas de sequência zero produzidas pela carga fluam para a fonte. A segunda é impedir o fluxo das correntes harmônicas advindas da fonte, quando a mesma gera tensões de sequência zero. Este dispositivo pode operar isoladamente ou atuar como dispositivo auxiliar adaptador de impedâncias para os filtros eletromagnéticos instalados em sistemas com alto nível de curto circuito no PAC (CZARNECKI, 1994; DAHONO, 1997).

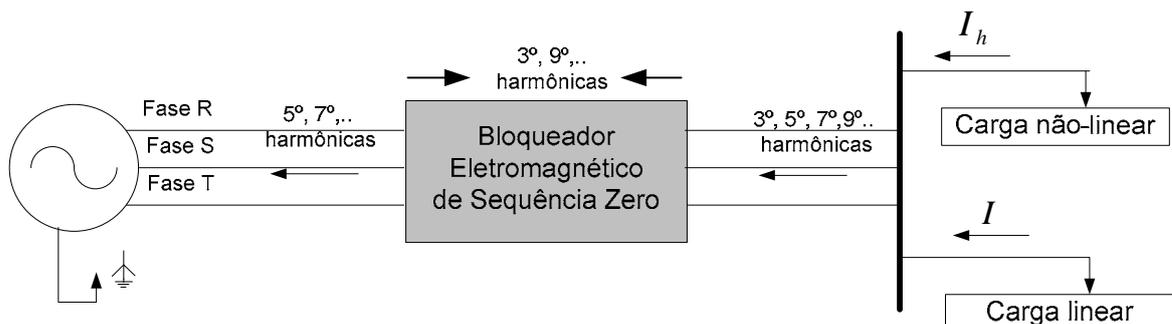


Figura 3.1 – Instalação do bloqueador eletromagnético em um sistema elétrico.

Como mencionado no capítulo anterior, as cargas não-lineares que apresentam características predominantes para este tipo de situação são aquelas conectadas entre uma fase e o neutro da instalação elétrica, ocasionando uma sobrecarga no condutor neutro.

O processo de bloqueio das componentes harmônicas de sequência zero é alcançado através da construção de um núcleo magnético composto por três bobinas de mesmo número de espiras, no qual as mesmas são enroladas uma sobre posta à outra, tendo como objetivo o alcance de um acoplamento ideal entre elas.

### 3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático para o dispositivo eletromagnético é desenvolvido com base nas relações de tensão e corrente das bobinas mutuamente acopladas e alimentadas por um sistema trifásico. O bloqueador eletromagnético opera de forma a evidenciar a frequência de excitação da fonte, uma vez que a reatância do enrolamento das bobinas tem uma variação diretamente proporcional ao aumento ou diminuição da frequência. A figura 3.2, ilustra o comportamento das indutâncias mútuas e próprias para o dispositivo eletromagnético.

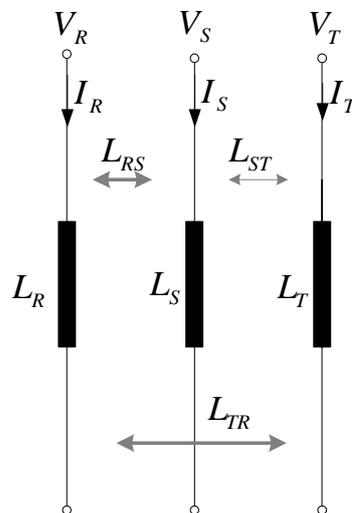


Figura 3.2 – Indutâncias dos enrolamentos das bobinas.

Com base na relação de acoplamento dos enrolamentos, pode-se escrever a matriz de tensão em função da corrente e das indutâncias mútuas e próprias do enrolamento das bobinas, representada no domínio do tempo. Desconsiderando-se o efeito resistivo do cobre das bobinas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{RR'} \\ V_{SS'} \\ V_{TT'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_R & L_{RS} & L_{RT} \\ L_{SR} & L_S & L_{ST} \\ L_{TR} & L_{TS} & L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_R / dt \\ di_S / dt \\ di_T / dt \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A equação pode ser reescrita ainda no domínio da frequência, tomando-se por base a frequência angular fundamental  $\omega$  e a ordem harmônica genérica  $h$ , então, a relação entre tensões e correntes harmônicas no domínio da frequência é dada na equação (3.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{RR'} \\ \dot{V}_{SS'} \\ \dot{V}_{TT'} \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_R & L_{RS} & L_{RT} \\ L_{SR} & L_S & L_{ST} \\ L_{TR} & L_{TS} & L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_R \\ \dot{I}_S \\ \dot{I}_T \end{bmatrix}^h \quad (3.2)$$

A equação (3.2) pode ser representada de forma compacta como:

$$\dot{V}_{RR'SS'TT'}^h = jh\omega.L.T.\dot{I}_{RST}^h \quad (3.3)$$

A modelagem matemática do bloqueador eletromagnético requer uma análise no espaço matemático das componentes simétricas, dessa forma deve-se remeter a equação (3.3) a uma transformação linear que visa converter as componentes de fase para componentes simétricas. Reescrevendo a equação (3.3), tem-se:

$$T.\dot{V}_{012} = jh\omega.L.T.\dot{I}_{012} \quad (3.4)$$

Onde a matriz 'T', é dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sendo:

$$\alpha = 1\angle 120^\circ \quad (3.6)$$

Desta forma, multiplicando a equação (3.4) pela matriz de transformação inversa, tem-se:

$$T^{-1}.T.\dot{V}_{012} = jh\omega T^{-1}.L.T.\dot{I}_{012} \quad (3.7)$$

Onde:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Obtem-se assim, a transformação linear das componentes de fase para as componentes simétricas:

$$\dot{V}_{012} = jh\omega T^{-1}.L.T.\dot{I}_{012} \quad (3.9)$$

Analisando minuciosamente a equação (3.9), pode-se notar que a matriz de indutância pré-multiplicada pela matriz 'T' e sua parcela inversa 'T<sup>-1</sup>', descreve a relação de tensão e corrente para o filtro eletromagnético, assim tem-se:

$$T^{-1}.L.T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_R & L_{RS} & L_{RT} \\ L_{SR} & L_S & L_{ST} \\ L_{TR} & L_{TS} & L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Multiplicando a matriz de indutância 'L' pela matriz 'T', tem-se:

$$T^{-1}.L.T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_R + L_{RS} + L_{RT} & L_R + L_{RS}.\alpha^2 + L_{RT}.\alpha & L_R + L_{RS}.\alpha + L_{RT}.\alpha^2 \\ L_{SR} + L_S + L_{ST} & L_{SR} + L_S.\alpha^2 + L_{ST}.\alpha & L_{SR} + L_S.\alpha + L_{ST}.\alpha^2 \\ L_{TR} + L_{TS} + L_T & L_{TR} + L_{TS}.\alpha^2 + L_T.\alpha & L_{TR} + L_{TS}.\alpha + L_T.\alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Logo:

$$T^{-1}.L.T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Onde:

$$L_{00} = L_R + L_{RS} + L_{RT} + L_{SR} + L_S + L_{ST} + L_{TR} + L_{TS} + L_T \quad (3.13)$$

$$L_{01} = L_R + L_{RS}.\alpha^2 + L_{RT}.\alpha + L_{SR} + L_S.\alpha^2 + L_{ST}.\alpha + L_{TR} + L_{TS}.\alpha^2 + L_T.\alpha \quad (3.14)$$

$$L_{02} = L_R + L_{RS} \cdot \alpha + L_{RT} \cdot \alpha^2 + L_{SR} + L_S \cdot \alpha + L_{ST} \cdot \alpha^2 + L_{TR} + L_{TS} \cdot \alpha + L_T \cdot \alpha^2 \quad (3.15)$$

$$L_{10} = L_R + L_{RS} + L_{RT} + L_{SR} \cdot \alpha + L_S \cdot \alpha + L_{ST} \cdot \alpha + L_{TR} \cdot \alpha^2 + L_{TS} \cdot \alpha^2 + L_T \cdot \alpha^2 \quad (3.16)$$

$$L_{11} = L_R + L_{RS} \cdot \alpha^2 + L_{RT} \cdot \alpha + L_{SR} \cdot \alpha + L_S \cdot \alpha^3 + L_{ST} \cdot \alpha^2 + L_{TR} \cdot \alpha^2 + L_{TS} \cdot \alpha^4 + L_T \cdot \alpha^3 \quad (3.17)$$

$$L_{12} = L_R + L_{RS} \cdot \alpha + L_{RT} \cdot \alpha^2 + L_{SR} \cdot \alpha + L_S \cdot \alpha^2 + L_{ST} \cdot \alpha^3 + L_{TR} \cdot \alpha^2 + L_{TS} \cdot \alpha^3 + L_T \cdot \alpha^4 \quad (3.18)$$

$$L_{20} = L_R + L_{RS} + L_{RT} + L_{SR} \cdot \alpha^2 + L_S \cdot \alpha^2 + L_{ST} \cdot \alpha^2 + L_{TR} \cdot \alpha + L_{TS} \cdot \alpha + L_T \cdot \alpha \quad (3.19)$$

$$L_{21} = L_R + L_{RS} \cdot \alpha^2 + L_{RT} \cdot \alpha + L_{SR} \cdot \alpha^2 + L_S \cdot \alpha^4 + L_{ST} \cdot \alpha^3 + L_{TR} \cdot \alpha + L_{TS} \cdot \alpha^3 + L_T \cdot \alpha^2 \quad (3.20)$$

$$L_{22} = L_R + L_{RS} \cdot \alpha + L_{RT} \cdot \alpha^2 + L_{SR} \cdot \alpha^2 + L_S \cdot \alpha^3 + L_{ST} \cdot \alpha^4 + L_{TR} \cdot \alpha + L_{TS} \cdot \alpha^2 + L_T \cdot \alpha^3 \quad (3.21)$$

Considerando-se que o dispositivo em análise seja construído a partir de um núcleo de aço silício e opere rigorosamente dentro da região linear da curva de magnetização do material, podem ser realizadas algumas considerações:

$$L_S = L_R = L_T = L_b \quad (3.22)$$

$$L_{RS} = L_{SR} = M_{b0} \quad (3.23)$$

$$L_{ST} = L_{TS} = M_{b1} \quad (3.24)$$

$$L_{RT} = L_{TR} = M_{b2} \quad (3.25)$$

Tomando por base as igualdades consideradas, tem-se, então:

$$L_{00} = 3 \cdot L_b + 2 \cdot M_{b0} + 2 \cdot M_{b2} + 2 \cdot M_{b1} \quad (3.26.)$$

$$L_{01} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha + M_{b0} + L_b \cdot \alpha^2 + M_{b1} \cdot \alpha + M_{b2} + M_{b1} \cdot \alpha^2 + L_b \cdot \alpha \quad (3.27)$$

$$L_{02} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha + M_{b2} \cdot \alpha^2 + M_{b0} + L_b \cdot \alpha + M_{b1} \cdot \alpha^2 + M_{b2} + M_{b1} \cdot \alpha + L_b \cdot \alpha^2 \quad (3.28)$$

$$L_{10} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha + M_{b2} \cdot \alpha^2 + M_{b0} + L_b \cdot \alpha + M_{b1} \cdot \alpha^2 + M_{b2} + M_{b1} \cdot \alpha + L_b \cdot \alpha^2 \quad (3.29)$$

$$L_{11} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha + M_{b0} \cdot \alpha + 2 \cdot L_b \cdot \alpha^3 + M_{b1} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha^2 + M_{b1} \cdot \alpha^4 \quad (3.30)$$

$$L_{12} = L_b + 2 \cdot M_{b0} \cdot \alpha + 2 \cdot M_{b2} \cdot \alpha^2 + L_b \cdot \alpha^2 + 2 \cdot M_{b1} \cdot \alpha^3 + L_b \cdot \alpha^4 \quad (3.31)$$

$$L_{20} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha + M_{b0} + L_b \cdot \alpha^2 + M_{b1} \cdot \alpha + M_{b2} + M_{b1} \cdot \alpha^2 + L_b \cdot \alpha \quad (3.32)$$

$$L_{21} = L_b + 2 \cdot M_{b0} \cdot \alpha^2 + 2 \cdot M_{b2} \cdot \alpha + L_b \cdot \alpha^4 + 2 \cdot M_{b1} \cdot \alpha^3 + L_b \cdot \alpha^2 \quad (3.33)$$

$$L_{22} = L_b + M_{b0} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha + M_{b0} \cdot \alpha + 2 \cdot L_b \cdot \alpha^3 + M_{b1} \cdot \alpha^2 + M_{b2} \cdot \alpha^2 + M_{b1} \cdot \alpha^4 \quad (3.34)$$

Nestas condições, têm-se, resumidamente, as equações da síntese:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^h \quad (3.35)$$

Reescrevendo a equação (3.35) de maneira compacta, tem-se:

$$\dot{V}_{012} = jh\omega.L_{012}.\dot{I}_{012} \quad (3.36)$$

Sendo  $L_{012}$  a matriz de indutâncias sequenciais.

As equações matemáticas desenvolvidas representam genericamente a relação entre as componentes sequenciais das tensões e correntes para o bloqueador eletromagnético idealizado.

### 3.4 ARRANJO ELETROMAGNÉTICO

A figura 3.3 ilustra o arranjo eletromagnético realizado para o bloqueador eletromagnético.

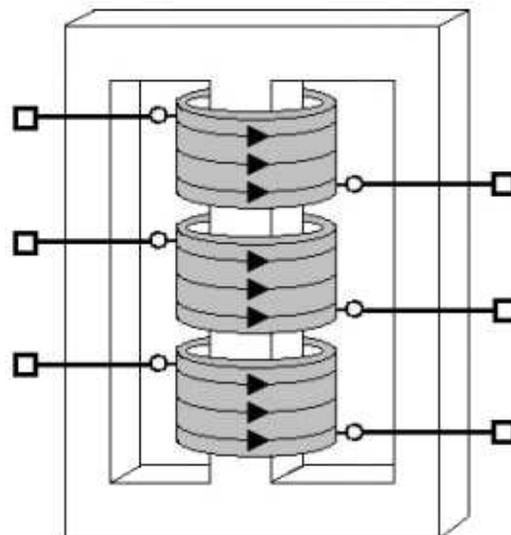


Figura 3.3 – Arranjo eletromagnético.

O arranjo eletromagnético é formado por três enrolamentos dispostos em um mesmo núcleo magnético e tem por objetivo fazer com que haja entre as bobinas um acoplamento livre de dispersões, ou seja, obter um coeficiente de acoplamento de valor unitário que, proporcionará a maximização de sua funcionalidade. A figura 3.4, apresenta o diagrama elétrico do dispositivo e permite a obtenção das equações matemáticas que orientam seu funcionamento.

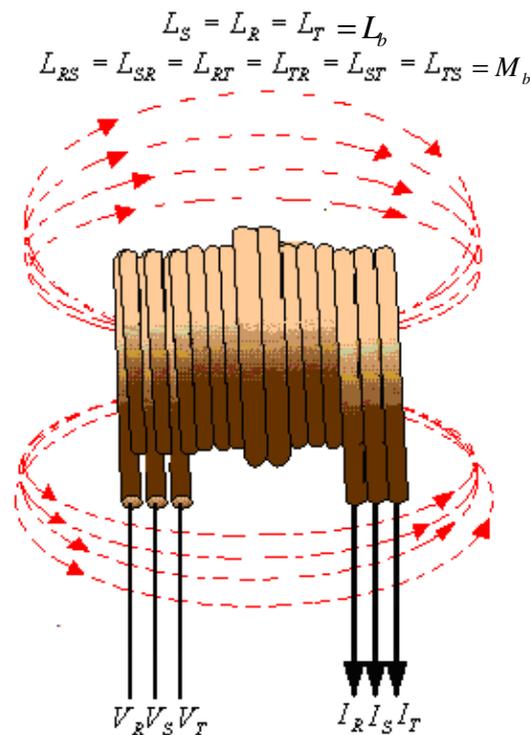


Figura 3.4 – Acoplamentos magnéticos.

Uma vez realizado o arranjo eletromagnético para as bobinas, podem ser então, adotadas algumas considerações, baseadas na similaridade dos enrolamentos e dos aspectos geométricos e construtivos do núcleo magnético. Admitindo-se, portanto, igualdade entre as indutâncias próprias e entre as indutâncias mútuas entre as bobinas de diferentes fases, tem-se:

$$L_S = L_R = L_T = L_b \quad (3.37)$$

$$L_{RS} = L_{SR} = L_{RT} = L_{TR} = L_{ST} = L_{TS} = M_b \quad (3.38)$$

Logo, as indutâncias sequenciais calculadas anteriormente resultam em:

$$L_{00} = 3.L_b + 6.M_b \quad (3.39)$$

$$L_{01} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.M_b + L_b.\alpha^2 + L_b.\alpha \quad (3.40)$$

$$L_{02} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.M_b + L_b.\alpha^2 + L_b.\alpha \quad (3.41)$$

$$L_{10} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.M_b + L_b.\alpha^2 + L_b.\alpha \quad (3.42)$$

$$L_{11} = L_b + 3.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.L_b.\alpha^3 + M_b.\alpha^4 \quad (3.43)$$

$$L_{12} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + L_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha^3 + L_b.\alpha^4 \quad (3.44)$$

$$L_{20} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.M_b + L_b.\alpha^2 + L_b.\alpha \quad (3.45)$$

$$L_{21} = L_b + 2.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + L_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha^3 + L_b.\alpha^4 \quad (3.46)$$

$$L_{22} = L_b + 3.M_b.\alpha^2 + 2.M_b.\alpha + 2.L_b.\alpha^3 + M_b.\alpha^4 \quad (3.47)$$

Constata-se assim que:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (3.48)$$

E que:

$$L_{01} = L_{10} = L_{02} = L_{20} \quad (3.49)$$

$$L_{12} = L_{21} \quad (3.50)$$

Para as simplificações adotadas, nota-se que as indutâncias mútuas intersequenciais,  $L_{01}$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{02}$ ,  $L_{20}$ ,  $L_{12}$  e  $L_{21}$  são nulas. Este fato garante sob o ponto de vista de análise, que o comportamento das componentes de sequência zero de tensão e corrente seja investigado isoladamente.

Obtêm-se então, as relações entre as tensões e correntes sequenciais:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_b + 2M_b & 0 & 0 \\ 0 & L_b - M_b & 0 \\ 0 & 0 & L_b - M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^h \quad (3.51)$$

Observa-se pela equação (3.51), que as componentes fora da diagonal principal da matriz de indutâncias são nulas. Este fato indica que houve um desacoplamento entre as componentes de sequência para o arranjo proposto, restando apenas componentes de sequência zero, positiva e negativa.

### 3.5 ANÁLISE FUNCIONAL DO BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

A modelagem matemática desenvolvida até aqui, demonstrou que o processo de bloqueio realizado pelo dispositivo eletromagnético depende do acoplamento entre as bobinas. O bloqueador será conectado em série entre a fonte e a carga no sistema elétrico e, para garantia de um funcionamento adequado, o mesmo deverá realizar o bloqueio das componentes de sequência zero, sendo necessário o aumento da indutância para esta sequência e, em contra partida, deverá proporcionar um caminho livre para as demais sequências.

Analisando a matriz de indutância da equação (3.51), constata-se que a mesma possui componentes sequenciais apenas na diagonal principal, sendo elas:

$$L_{00} = L_b + 2.M_b \quad (3.52)$$

$$L_{11} = L_{22} = L_b - M_b \quad (3.53)$$

Observa-se nas equações (3.52) e (3.53), que para que o dispositivo efetue o bloqueio da sequência zero proporcionando uma alta indutância e, simultaneamente, ofereça baixa indutância para as sequências positiva e negativa, há necessidade de obter um acoplamento  $\lambda$  entre os enrolamentos das bobinas de tal forma que as indutâncias próprias ' $L_b$ ' e mútuas ' $M_b$ ', sejam iguais. A equação (3.54) relaciona as indutâncias próprias e mútuas através de um fator de acoplamento, assim tem-se:

$$M_b = \lambda \sqrt{L_{b_i} . L_{b_j}} \quad (3.54)$$

Onde:

$L_{b_i}$  - indutância própria do primário;

$L_{b_j}$  - indutância própria do secundário;

Para que haja uma igualdade entre os valores de indutâncias próprias e mútuas há necessidade de um acoplamento ideal, ou seja ( $\lambda = 1$ ), dessa forma para a sequência zero, as indutâncias próprias e mútuas iriam se somar ocasionando uma indutância três vezes maior. O contrário acontece para as sequências positiva e negativa sendo que as indutâncias próprias e mútuas se anulam, formando um caminho livre para as mesmas. A figura 3.5 ilustra a análise

do ponto de vista dos circuitos sequenciais equivalentes para um acoplamento ideal entre as bobinas.

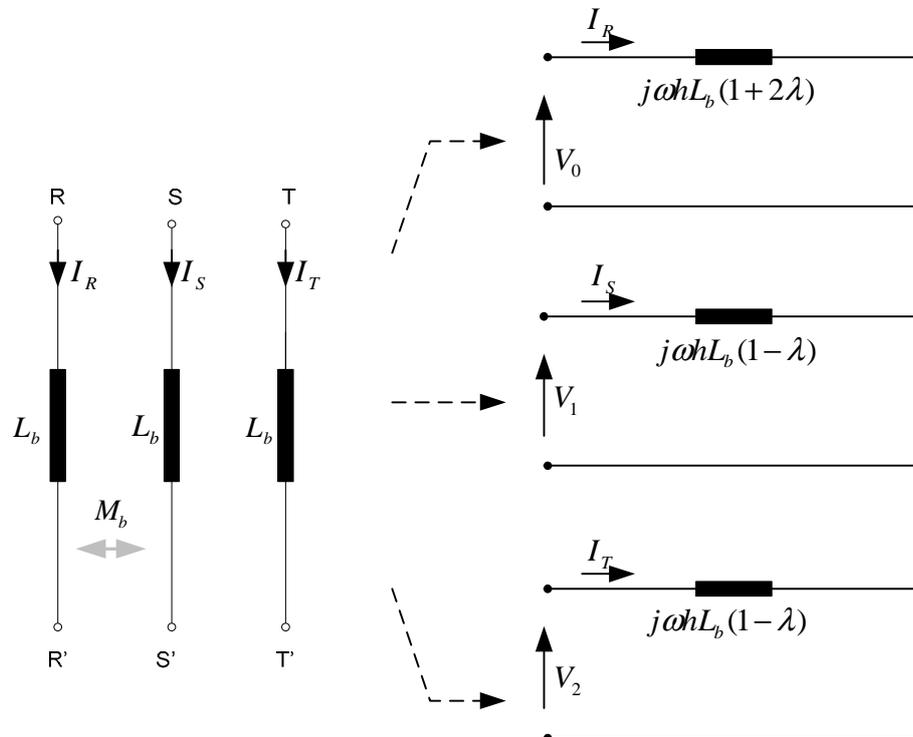


Figura. 3.5 – Circuitos sequenciais desacoplados.

Essas características revelam a ação do bloqueio às componentes de sequência zero, cuja eficácia é proporcional ao fator de acoplamento, sendo idealmente de valor unitário.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada neste capítulo a metodologia empregada para a definição do modelo de um bloqueador eletromagnético de componentes de sequência zero no domínio da frequência.

Alguns comentários foram realizados visando esclarecer as premissas que norteiam a operação do bloqueador, onde foi proposto um modelo baseado nas componentes sequenciais de tensões e correntes de alimentação desse dispositivo, sendo também apresentadas algumas considerações aceitáveis no processo de simplificação dos equacionamentos, que por sua vez, proporcionam uma melhoria na interpretação das funcionalidades do bloqueador de componentes de sequência zero.

Concluiu-se que, à medida que o fator de acoplamento ' $\lambda$ ' entre as bobinas do bloqueador eletromagnético se aproxima de um valor unitário, a eficiência no bloqueio das

componentes de sequência zero aumenta e em contra partida, para as demais sequências, positiva e negativa, obtem-se o equivalente a um curto-circuito.

Destaca-se finalmente que a modelagem apresentada neste capítulo é uma contribuição original deste trabalho e será tomada como base para os desenvolvimentos subsequentes a serem apresentados nos próximos capítulos.

---

**MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO****4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os sistemas de distribuição a quatro fios de baixa tensão, que suprem cargas com intensas características não-lineares, a exemplo de computadores, retificadores monofásicos não controlados, etc., manifestam elevados valores para correntes no condutor neutro. Sob circunstâncias não ideais para a carga esta situação constitui-se de grande nocividade para o funcionamento do sistema. Estudos direcionados revelaram que estas correntes no neutro possuem uma forte concentração em sequência zero. Esta condição estabelece, muitas vezes, o chamado carregamento de neutro com correntes que podem até serem superiores às correspondentes correntes de linha (BELCHIOR, 2006). Em decorrência deste fato alguns problemas são comumente ocasionados, dentre eles é possível citar o sobreaquecimento do condutor neutro, interferências em sistemas de comunicação, elevação do potencial do neutro e o aparecimento de ruídos de modo comum.

Neste cenário, os equipamentos eletromagnéticos são vistos como uma alternativa promissora no que diz respeito à filtragem de correntes harmônicas de sequência zero seja para uso isolado ou como dispositivo auxiliar em sistemas híbridos (OLIVEIRA, 2005). Estes dispositivos constituem-se exclusivamente de arranjos eletromagnéticos e dispensam o emprego de capacitores e outros recursos habitualmente empregados em outros dispositivos, a exemplo dos filtros ressonantes sintonizados. Por este motivo, estes dispositivos tornam-se economicamente atrativos e proporcionam uma solução mais robusta para os esquemas de filtragem harmônica (BELCHIOR, 2006).

Estes dispositivos podem ser classificados em duas modalidades distintas pela funcionalidade apresentada no que diz respeito às suas impedâncias de sequência zero (OLIVEIRA, 2007a; FREITAS, 2010). Na primeira modalidade, o arranjo eletromagnético utilizado faz com que o dispositivo apresente uma baixa impedância para correntes de sequência zero. Desta forma este dispositivo conectado em paralelo com a rede pode ser utilizado como um filtro de harmônicas de sequência zero. Na segunda modalidade, o arranjo eletromagnético de bobinas faz com que o dispositivo apresente uma alta impedância de

sequência zero. Deste modo, quando conectado em série com a rede, pode ser utilizado para o bloqueio de correntes harmônicas de sequência zero (CZARNECKI, 1994).

Será, portanto, abordado nos itens subsequentes a eficácia do uso conjunto destes dispositivos eletromagnéticos como sistema de filtragem de correntes harmônicas de sequência zero geradas por cargas não-lineares.

## 4.2 SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO

O denominado supressor eletromagnético de sequência zero é formado por um filtro conectado em paralelo ao sistema e um bloqueador conectado em série, figura 4.1.

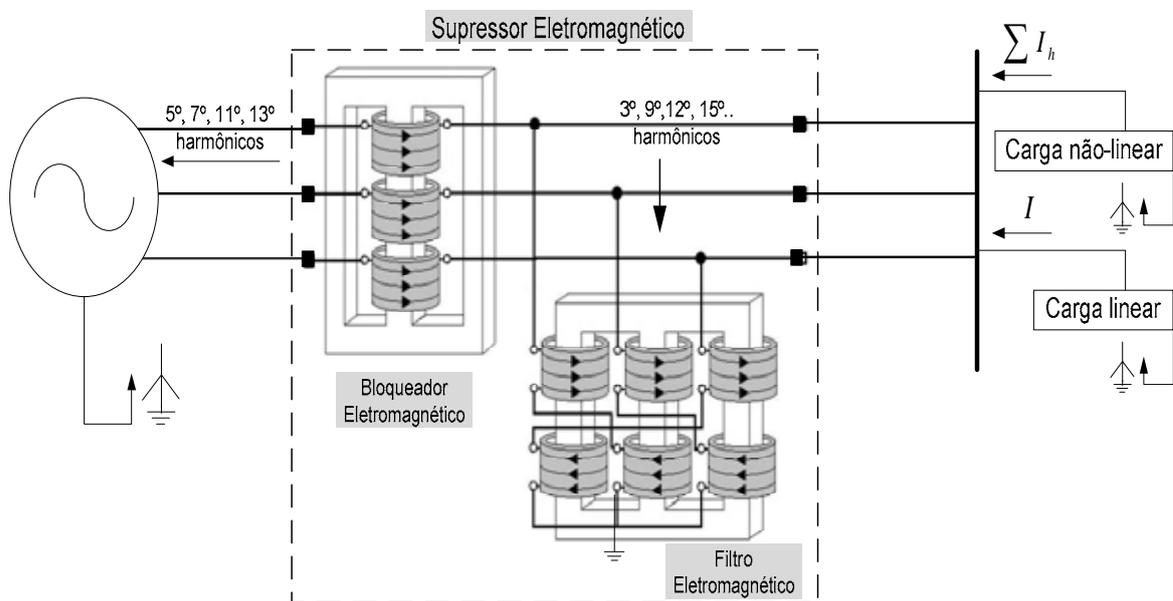


Figura. 4.1 – Instalação conjunta do filtro e do bloqueador de sequência zero em um sistema.

A eficiência na operação do filtro eletromagnético depende da proporção entre sua impedância de sequência zero e a respectiva impedância do sistema no ponto de acoplamento comum, PAC (FREITAS, 2010).

O bloqueador de sequência zero, como destacado anteriormente, é um dispositivo que apresenta uma alta impedância de sequência zero. Neste sentido é possível identificar duas funções básicas para sua utilização. A primeira consiste em minimizar a circulação de correntes harmônicas de sequência zero entre a fonte e a carga. A segunda refere-se ao seu funcionamento como adaptador de impedância de sequência zero visando a maximização do funcionamento do filtro de sequência zero. Esta aplicação é importante na medida em que se vislumbra a utilização de filtros eletromagnéticos nos PAC com alto nível de curto circuito.

A eficácia do filtro eletromagnético será tanto maior quando menor for sua impedância de sequência zero frente à respectiva impedância da rede no PAC. Neste contexto, vislumbra-se a operação conjunta de um filtro e de um bloqueador eletromagnético com o objetivo de adaptar a impedância total no PAC vista pelo filtro eletromagnético objetivando um desempenho nos padrões requeridos.

O desempenho do supressor eletromagnético pode ser investigado a partir do método das transmitâncias harmônicas sequenciais proposto em trabalhos anteriores como citado na referência (OLIVEIRA, 2009). Esta metodologia está baseada na teoria da superposição de efeitos e é particularmente atraente, pois permite que sejam investigados os efeitos individuais de cada uma das fontes harmônicas presentes e de outros parâmetros físicos e construtivos do equipamento mitigador (OLIVEIRA, 2007b).

### 4.3 FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA DA COMPENSAÇÃO HARMÔNICA

Objetivando o entendimento relacionado à fundamentação física da compensação harmônica proporcionada pelo uso conjunto dos distintos dispositivos de atenuação harmônica que compõe o supressor eletromagnético, segue uma explicação sucinta.

Observando-se o circuito mostrado na figura 4.1, fica evidente que há conexão entre a impedância do filtro (em paralelo) e a impedância do bloqueador (série), como propõe o circuito equivalente simplificado de sequência zero na figura 4.2.

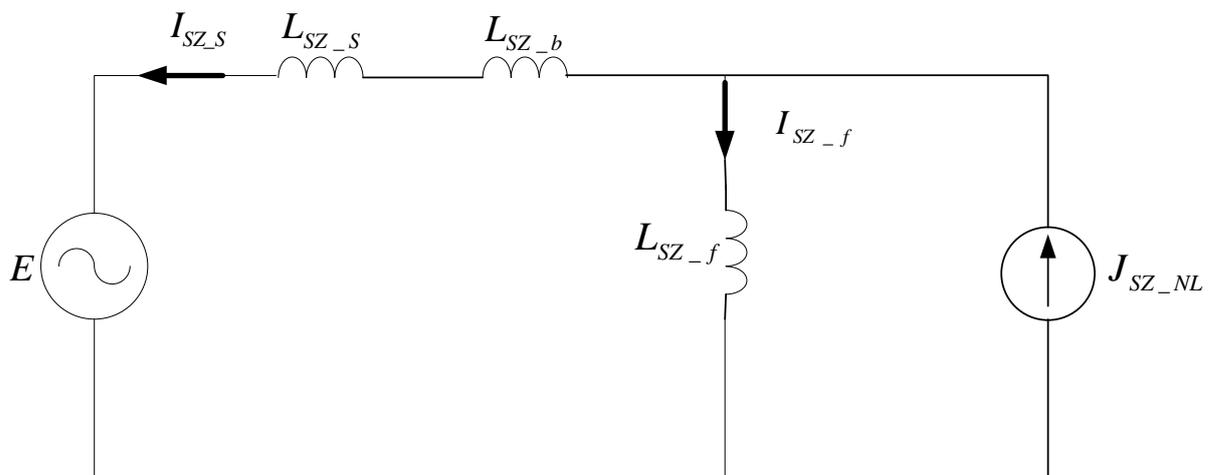


Figura 4.2 – Circuito equivalente simplificado.

A equação (4.1) relaciona as indutâncias mútuas com a indutância de acoplamento entre as bobinas principal e auxiliar de um mesmo braço magnético do filtro de sequência zero.

$$M_f = \lambda \sqrt{L_{Pf} \cdot L_{Af}} \quad (4.1)$$

A equação (4.2) apresenta o fator de conformidade do filtro eletromagnético, denominação atribuída neste trabalho para destacar as similaridades construtivas dos enrolamentos das bobinas de um mesmo braço magnético.

$$\xi_b = \frac{L_{Af}}{L_{Pf}} \quad (4.2)$$

Considerando-se a indutância característica do filtro dada pela equação (4.3):

$$L_f = L_P \quad (4.3)$$

Então, a indutância de sequência zero do filtro é dada por:

$$L_{sz\_f} = L_f \cdot (1 - \lambda \cdot \sqrt{\xi_f}) \quad (4.4)$$

Tratando-se de bloqueadores eletromagnéticos, a equação (4.5) relaciona as indutâncias próprias do primário e secundário e indutâncias mútuas através de um fator de acoplamento:

$$M_b = \lambda \sqrt{L_{b_i} \cdot L_{b_j}} \quad (4.5)$$

Novamente, assim como para o caso do filtro e, tendo em vista destacar a similaridade construtiva dos enrolamentos entre as bobinas do bloqueador, o fator de conformidade é dado pela equação:

$$\xi_b = \frac{L_{b_i}}{L_{b_j}} \quad (4.6)$$

A equação (4.7) mostra a indutância característica do bloqueador:

$$L_{sz\_b} = L_{b_p} \quad (4.7)$$

Tem-se então, a indutância de sequência zero do bloqueador:

$$L_{SZ\_b} = L_b \cdot (1 + 2\lambda \cdot \sqrt{\xi_b}) \quad (4.8)$$

Considerando, por simplicidade, apenas as indutâncias e tomando como base o princípio do divisor de corrente, a parcela de corrente de sequência zero produzida pela carga e desviada para o filtro pode ser determinada pela seguinte equação:

$$I_{SZ\_f} = \frac{L_{SZ\_S}}{(L_{SZ\_S} + L_{SZ\_b}) + L_{SZ\_f}} \cdot J_{SZ\_NL} \quad (4.9)$$

Sendo:

$J_{SZ\_NL}$  - Corrente de sequência zero gerada pela carga não-linear;

$I_{SZ\_f}$  - Corrente de sequência zero através do filtro paralelo;

$L_{SZ\_S}$  - Indutância de sequência zero do sistema de suprimento;

A equação (4.9) mostra que quanto menor a indutância de sequência zero do filtro, em relação à mesma indutância do sistema de alimentação e a do bloqueador, maior será sua eficácia em drenar correntes harmônicas de sequência zero.

Por outro lado, analogamente, a corrente resultante na fonte pode ser calculada por:

$$I_{SZ\_S} = \frac{L_{SZ\_f}}{L_{SZ\_f} + (L_{SZ\_b} + L_{SZ\_S})} \cdot J_{SZ\_NL} \quad (4.10)$$

A equação (4.10) pode ainda ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{I_{SZ\_S}}{J_{SZ\_NL}} = \frac{L_f \cdot (1 - \lambda \cdot \sqrt{\xi_f})}{L_f \cdot (1 - \lambda \cdot \sqrt{\xi_f}) + L_b \cdot (1 + 2\lambda) + (V_n^2 / \omega \cdot S_{CC})} \cdot 100 \quad (4.11)$$

Sendo:

$I_{SZ\_S}$  - Corrente de sequência zero do sistema.

A equação (4.11) reafirma que o fluxo da corrente no sistema de suprimento será tão menor quanto maior for a indutância de sequência zero do sistema e do bloqueador quando comparada com a indutância de sequência zero do filtro. Desta forma, destaca-se ainda que, a eficácia do sistema na compensação harmônica pode ser comprometida pelas características da rede à qual o mesmo encontra-se instalado.

#### **4.4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAGEM**

A eficácia de um sistema de filtragem de harmônicas pode ser avaliada através de modelos computacionais para simulações no domínio do tempo ou da frequência (CZARNECKI, 2000). Os modelos no domínio do tempo baseiam-se em um conjunto de equações diferenciais e os efeitos gerados permitem uma rápida visualização do comportamento do sistema relativo às formas de onda de tensões e correntes.

Apesar dos modelos no domínio do tempo serem muito utilizados, os mesmos apresentam algumas desvantagens. Esse método não demonstra explicitamente as influências de diferentes variáveis no desempenho da filtragem harmônica, dificultando assim a identificação de ações para a melhoria contínua de sua funcionalidade. A prática de dimensionamento e ajuste dos parâmetros do sistema de filtragem normalmente se baseia em artifícios de aproximações sucessivas na busca de um desempenho geral adequado. Esta metodologia exige que a simulação seja retomada desde o início sempre que uma nova condição operacional é investigada, resultando em um grande esforço computacional e tornando o processo de dimensionamento e ajuste lento e trabalhoso (RAVAGNANI, 2004).

Uma forma alternativa para análise do desempenho do sistema de filtragem é através do cálculo de transmitâncias e as respectivas respostas em frequência. Esta metodologia está baseada na teoria da superposição de efeitos e é especialmente atrativa, pois permite que seja analisada individualmente a influência de parâmetros distintos do sistema supridor, dos supressores de harmônicas e da carga na eficiência dos supressores. Além do mais, permite não apenas a investigação do sistema de forma rápida e sistemática, mas também modificar o desempenho dos dispositivos de atenuação harmônica perante as novas condições de operação e, ainda, revelar as possíveis causas da diminuição de sua eficiência, contribuindo decisivamente para a melhoria do projeto dos sistemas de filtragem, mantendo-os dentro dos níveis de desempenho limite aceitáveis.

#### **4.5 MODELAGEM DAS FONTES HARMÔNICAS**

Para uma análise adequada do funcionamento de um sistema de filtragem harmônica se tornam indispensáveis o conhecimento das cargas presentes no sistema elétrico e suas modalidades de funcionamento. As cargas elétricas são divididas em dois grupos: cargas lineares e cargas não-lineares.

As cargas lineares, quando alimentadas por uma tensão senoidal, absorvem do sistema de alimentação uma corrente com a mesma característica senoidal, com amplitude dependente da própria carga, apresentando apenas deslocamento angular.

As cargas não-lineares consomem uma corrente não-senoidal, mesmo que a tensão aplicada a ela o seja. Essas cargas são fontes harmônicas para o sistema CA ao qual estão ligadas.

Tendo como meta um bom processo de filtragem, quanto melhor a representação de cargas não-lineares, maior será o crédito dos resultados alcançados.

Embora os consumidores industriais sejam os principais causadores de distorções harmônicas, os consumidores residenciais tem se firmado também como importante fonte de harmônicos. Grande parte dos equipamentos eletrônicos de uso residencial, como televisores, lâmpadas fluorescentes compactas, computadores e outros mais, funcionam com corrente contínua e são alimentados por tensão alternada. O circuito de entrada desses equipamentos é, normalmente, composto por um retificador com capacitor de filtragem, podendo ou não existir um transformador para adaptar as tensões da rede elétrica.

Geralmente, cargas não-lineares de natureza industrial são representadas como fonte de corrente, justificando assim, as formas de onda de corrente distorcidas, mesmo que a carga seja alimentada por uma tensão puramente senoidal. Um exemplo de fonte harmônica típica que apresenta estas características é o retificador controlado por tiristores. Este dispositivo, muito utilizado em diferentes acionamentos industriais, normalmente, possui uma indutância no lado CC suficientemente elevada ou uma carga indutiva muito alta para garantir uma corrente contínua aproximadamente constante (RAVAGNANI, 2008).

A figura 4.3 mostra a representação de um retificador controlado a tiristor. A figura 4.4 mostra a forma de onda da tensão e corrente no retificador. A distorção na forma de onda é resultado da operação dos tiristores. Dependendo do conteúdo da corrente harmônica, esta carga não-linear se comporta como uma fonte de corrente, podendo assim ser modelada.

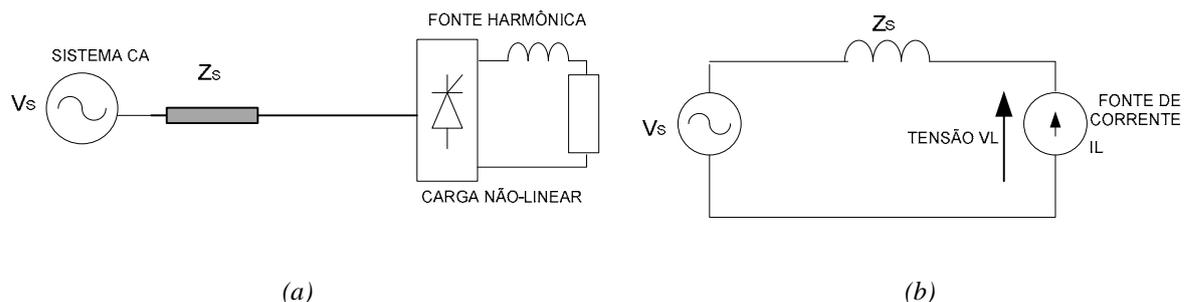


Figura 4.3 – Carga não-linear representada por fonte de corrente

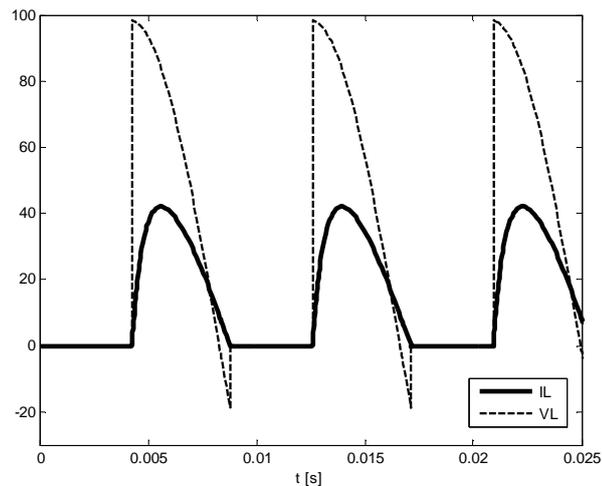


Figura 4.4 – Formas de onda típicas de tensão e corrente de uma carga alimentada por um retificador de meia onda controlado a tiristor, com ângulo de disparo fixado em  $90^\circ$ .

A modelagem de uma carga não-linear apenas como fonte de corrente ou tensão constante pode não ser exata o bastante, para o caso das condições de operação do sistema supridor variarem muito em relação às condições em que o espectro harmônico da tensão ou da corrente tenham sido previamente determinados.

Os sistemas de distribuição são constituídos em geral de diversas impedâncias conectadas em paralelo ao mesmo, e quando há mudança na condição de operação do sistema supridor, motivadas até mesmo pela ação dos dispositivos de atenuação harmônica, as correntes harmônicas previamente injetadas nas barras podem sofrer alterações significativas. Nestes casos, se torna indispensável a representação da interdependência entre as tensões e corrente das cargas não-lineares para estudos subsequentes. Neste contexto, destaca-se o uso de modelos equivalente de Norton, quando a carga apresentar características predominantes de fonte de corrente, modelos equivalente de Thevenin, para características típicas de fonte de tensão, ou ainda, uma combinação ponderada de ambas para representar um conjunto de cargas (RAVAGNANI, 2008).

Considerando-se que para a maioria das cargas não-lineares, quando a distorção harmônica total permanecer abaixo de 10%, é comum a adoção de modelos simplificados baseados apenas em fontes de corrente (CZARNECKI, 1997) e considerando-se, ainda, os erros e incertezas inerentes aos processos de simulação digital, entende-se que o uso de modelos simplificados não comprometerá o nível de precisão almejado. Sendo assim, neste trabalho tais simplificações são adotadas, objetivando direcionar os esforços para estudos relacionados com a modelagem e análise de desempenho do sistema de filtragem harmônica.

#### 4.6 TRANSMITÂNCIAS SEQUENCIAIS

O método das transmitâncias sequenciais é particularmente interessante, pois, possibilita uma análise específica e individual sobre as influências de diferentes parâmetros do sistema de alimentação, do sistema de filtragem e da carga. A definição de um modelo de análise no domínio da frequência deve reunir uma representação trifásica dos componentes da rede elétrica. Para a definição das transmitâncias sequenciais, considerou-se o circuito equivalente simplificado utilizado na figura 4.5.

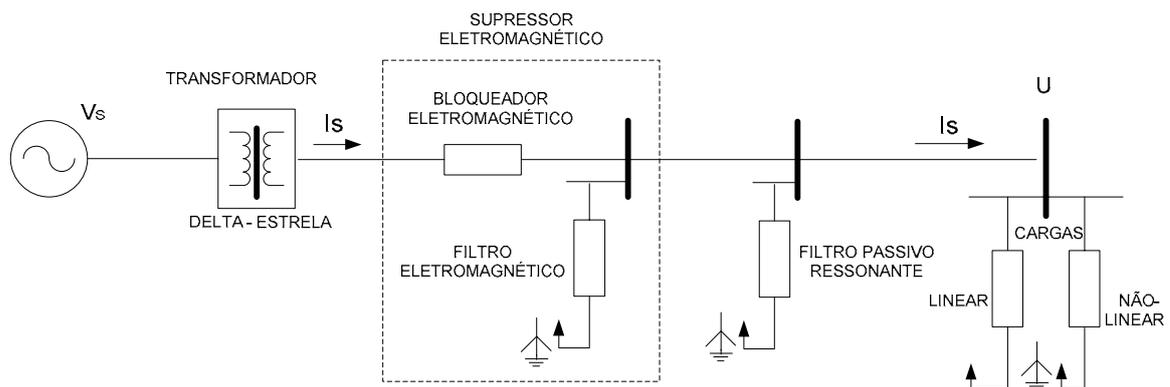


Figura 4.5 - Representação básica de um ramo da rede elétrica.

Para a viabilização teórica do princípio da superposição, os efeitos advindos da não-linearidade são representados pelas componentes sequenciais das correntes e/ou tensões harmônicas. O restante do circuito é composto apenas por dispositivos lineares e os efeitos de cada ordem harmônica são computados individualmente e integralizados a partir do princípio da superposição em cada circuito sequencial equivalente e, em seguida, compostos para a determinação das componentes harmônicas por fase (RAVAGNANI, 2008). O filtro passivo ressonante é um dispositivo auxiliar no sistema de filtragem responsável pela atenuação de correntes harmônicas que possuem uma distribuição sequencial com maior concentração não afetadas pelo supressor eletromagnético.

Usualmente, a conexão delta-estrela adotada para os transformadores de distribuição provê o bloqueio de componentes de sequência zero na rede de média tensão. Devido a este fato, qualquer possibilidade de propagação de componentes harmônicas de sequência zero na rede de média tensão é eliminada, reduzindo substancialmente as amplitudes das ordens harmônicas múltiplas de três.

O fluxo das componentes harmônicas de sequência zero na rede de baixa tensão pode ser intenso e, embora não se propagem totalmente para a média tensão, ao circularem pelos enrolamentos do transformador, provocam uma sobre elevação de temperatura, reduzindo o

tempo de vida útil do transformador. Em decorrência disso, subentende-se que os estudos de compensação ou filtragem harmônica devem ser realizados preferencialmente na rede de baixa tensão, visando à redução do fluxo de correntes harmônicas no transformador, atenuando, assim, os efeitos nocivos dos harmônicos, figura 4.6.

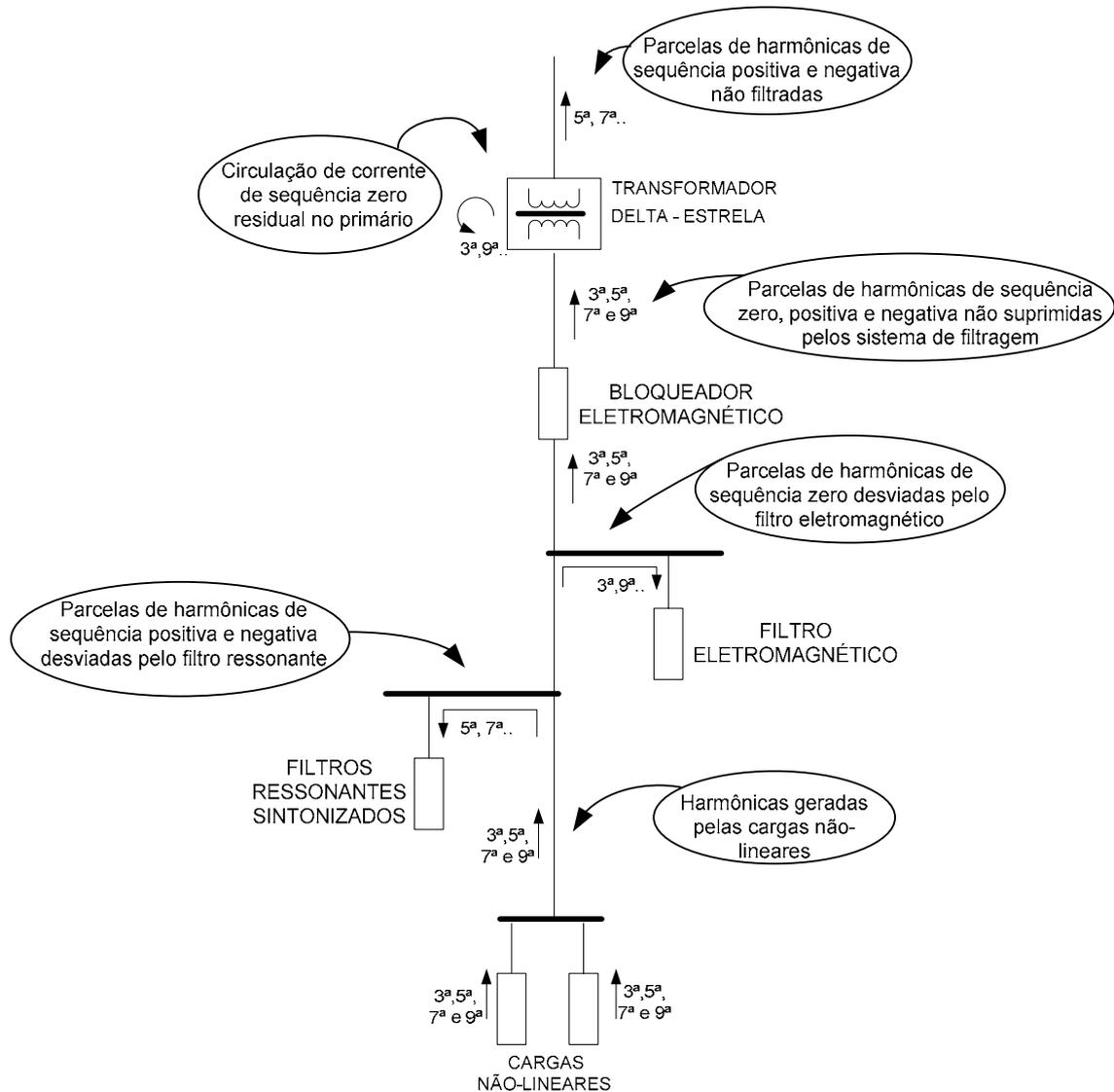


Figura 4.6 – Fluxo de correntes harmônicas.

Considerando-se os aterramentos ideais, o circuito sequencial simplificado referenciado à baixa tensão é ilustrado de acordo com a figura 4.7. É importante destacar que, sob o ponto de vista analítico, os circuitos sequenciais diferem-se apenas pelos valores das impedâncias sequenciais do filtro e do bloqueador eletromagnético,  $Zf_k$  e  $Zb_k$ , respectivamente, e pelas fontes de excitação  $E_k$  e  $J_k$ . O índice  $k$  representa a seqüência de

fase analisada. Os símbolos  $Z_s$ ,  $Z_{pr}$  e  $Z_L$ , representam, respectivamente, as impedâncias complexas equivalentes do sistema, do filtro passivo ressonante e da carga.

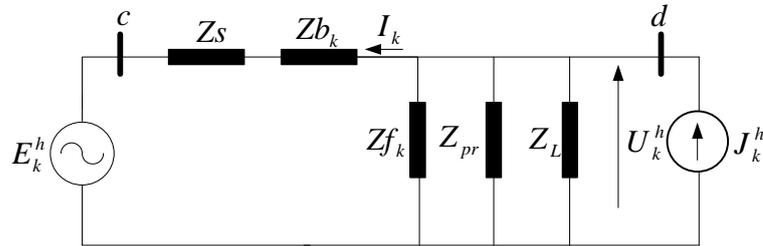


Figura 4.7 – Circuito equivalente na frequência  $f$  e seqüência  $k$ .

A relação entre a tensão de alimentação do sistema supridor  $E_k$ , a corrente de alimentação  $I_k$ , a tensão no barramento da carga  $U_k$  e a corrente de carga  $J_k$ , quando a mesma for representada por fonte de corrente ( $V_k$  quando representada por fonte de tensão) pode ser expressa em termos de transmitâncias sequenciais definidas em função das impedâncias da carga, dos filtros e do sistema supridor.

O foco das simulações está voltado para valores discretos de frequência, ou seja, componentes harmônicas com frequências  $f_h = h.f$ , no entanto, os estudos do comportamento das transmitâncias em função da frequência são realizados na forma contínua, pois a análise discreta não contém informações sobre as frequências de ressonância do filtro com o sistema supridor.

Fundamentado no princípio da superposição de efeitos é considerado apenas o efeitos da corrente de carga, anulando-se a fonte de tensão, para que seja realizada a representação da influência do filtro e do bloqueador para a frequência  $f$  da corrente de alimentação, associada à respectiva frequência da corrente da carga, figura 4.8.

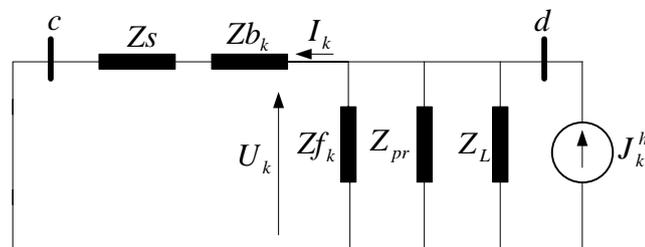


Figura 4.8 – Circuito equivalente reduzido representando o efeito da fonte de corrente.

As componentes no domínio da frequência da corrente  $J_k$  são determinadas genericamente pela equação (4.12).

$$J_k^\omega = \left[ \frac{1}{Z_{pr}} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_b} \right] U_k^\omega \quad (4.12)$$

As componentes no domínio da frequência da tensão de alimentação da carga não-linear são dadas por:

$$U_k^\omega = Z_s^\omega \cdot I_k^\omega \quad (4.13)$$

Substituindo-se (4.13) em (4.12), tem-se:

$$I_k^\omega = \left[ \frac{Z}{(Z_s + Z_b) + Z} \right] J_k^\omega \quad (4.14)$$

Sendo:

$$Z_k^\omega = \left[ \frac{Z_{pr} \cdot Z_f \cdot Z_L}{Z_{pr} \cdot Z_L + Z_f \cdot Z_L + Z_{pr} \cdot Z_f} \right] \quad (4.15)$$

A partir das expressões (4.14) e (4.15), define-se:

$$B_k^\omega = \frac{I_k^\omega}{J_k^\omega} \quad (4.16)$$

Sendo:

$$B_k^\omega = \left[ \frac{Z}{(Z_s \cdot Z_b) + Z} \right]_k^\omega \quad (4.17)$$

O efeito da tensão de alimentação sobre a tensão na carga também pode ser expresso em termos de transmitâncias (CZARNECKI, 2000). Fundamentado, portanto, no princípio da superposição, apenas o efeito da tensão de alimentação será considerado, anulando-se o efeito da fonte de corrente, conforme ilustrado na figura 4.9.

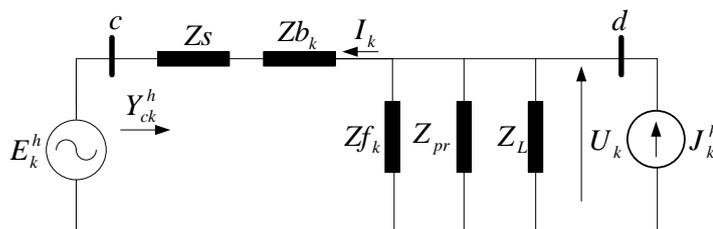


Figura 4.9 – Circuito equivalente reduzido representando o efeito da fonte de tensão.

A partir do circuito equivalente, tem-se:

$$I_k^\omega = \left[ \frac{1}{(Z_s + Z_b) + Z} \right] \cdot E_k^\omega \quad (4.18)$$

Sabendo-se que:

$$U_k^\omega = I_k^\omega \cdot Z_k^\omega \quad (4.19)$$

Substituindo-se (4.19) em (4.18), obtem-se:

$$U_k^\omega = \left[ \frac{Z}{(Z_s + Z_b) + Z} \right] \cdot E_k^\omega \quad (4.20)$$

Logo, define-se:

$$A_k^\omega = \frac{U_k^\omega}{E_k^\omega} \quad (4.21)$$

Sendo:

$$A_k^\omega = \left[ \frac{Z}{(Z_s + Z_b) + Z} \right] \cdot E_k^\omega \quad (4.22)$$

Por outro lado, as distorções na corrente de alimentação podem não ocorrer apenas devido à corrente absorvida pela carga, mas também devido à distorção na tensão de alimentação do sistema de distribuição. O valor da contribuição depende da admitância equivalente “vista” pelo barramento de alimentação, que pode ser obtida a partir do circuito equivalente ilustrado na figura 4.10.

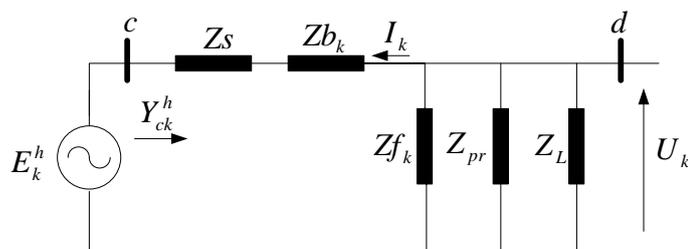


Figura 4.10 – Circuito equivalente reduzido e admitância “vista” pela fonte de alimentação.

A partir do circuito equivalente ilustrado na figura 4.10, obtém-se a equação (4.23).

$$Y_{ck}^{\omega} = \frac{I_k^{\omega}}{E_k^{\omega}} = \left[ \frac{1}{(Z_s + Z_b) + Z} \right]_k^{\omega} \quad (4.23)$$

Finalmente, o efeito das distorções da corrente de carga sobre a tensão na carga pode ser obtido a partir da impedância “vista” pelo barramento da carga, conforme ilustrado na figura 4.11.

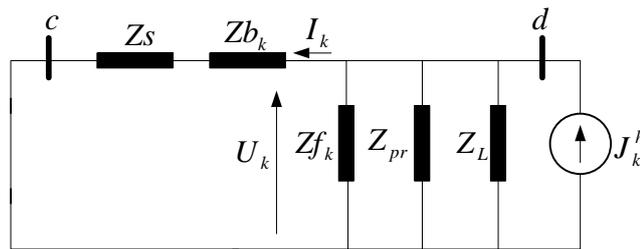


Figura 4.11 – Circuito equivalente reduzido e impedância “vista” pelo barramento da carga.

Considerando-se o circuito equivalente ilustrado na figura 4.10, obtém-se a equação (4.24).

$$Z_{dk}^{\omega} = \frac{U_k^{\omega}}{J_k^{\omega}} = \left[ \frac{(Z_s + Z_b) \cdot Z}{(Z_s + Z_b) + Z} \right]_k^{\omega} \quad (4.24)$$

#### 4.7 SÍNTESE PARA ANÁLISE DE CAUSAS E EFEITOS

Baseado no comportamento das transmitâncias harmônicas sequenciais definidas no item anterior, as principais grandezas elétricas envolvidas no processo de filtragem podem ser definidas. Neste sentido, a análise é realizada de forma discreta, considerando-se apenas as frequências harmônicas presentes, representadas genericamente pela ordem  $h$ . De acordo com o que foi exposto anteriormente, é possível, então, classificar as variáveis envolvidas como causas e efeitos.

As cargas não-lineares são consideradas fontes geradoras de distorções harmônicas, podendo ser representadas como fontes de correntes ( $J$ ), figura 4.12. Decorrentes das excitações harmônicas mencionadas apresentam-se as correntes de alimentação ( $I$ ) e as tensões no barramento das cargas ( $U$ ). Deste modo, tomando como bases as causas citadas, os efeitos são definidos a partir das quatro transmitâncias harmônicas sequenciais equivalentes.

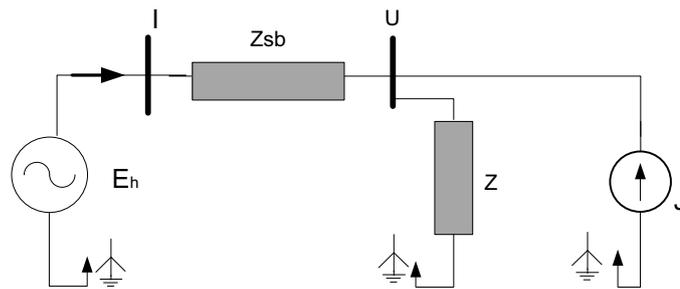


Figura 4.12 – Circuito equivalente simplificado.

As componentes harmônicas sequenciais das correntes de alimentação ( $I$ ) derivam simultaneamente de ambas as causas, ou seja, das componentes harmônicas sequenciais da corrente da carga não-linear ( $J$ ) e da tensão de alimentação ( $E$ ). Da mesma maneira se aplica para o caso das componentes sequenciais da tensão no barramento das cargas ( $U$ ). Assim, os resultados sobre a corrente total de alimentação e a tensão na carga podem ser totalizados a partir das contribuições individuais de cada parcela de excitação harmônica, conforme as equações (4.25) e (4.26).

$$I_k^h = [I_j + I_E]_k^h \quad (4.25)$$

$$U_k^h = [U_j + U_E]_k^h \quad (4.26)$$

Onde:

$I_j$  - contribuição da corrente de carga  $J$  na corrente de alimentação  $I$ ;

$U_j$  - contribuição da corrente de carga  $J$  na tensão da carga  $U$ ;

$I_E$  - contribuição da tensão da fonte  $E$  na corrente de alimentação  $I$ ;

$U_E$  - contribuição da tensão da fonte  $E$  na tensão da carga  $U$ ;

$k$  - sequência de fase;

$h$  - ordem harmônica.

Tendo em consideração os circuitos equivalentes ilustrados na figura 4.13, as contribuições são determinadas a partir de quatro transmitâncias sequenciais dadas em (4.27), (4.28), (4.29) e (4.30), calculadas para cada frequência harmônica de interesse, no seu respectivo circuito equivalente sequencial.

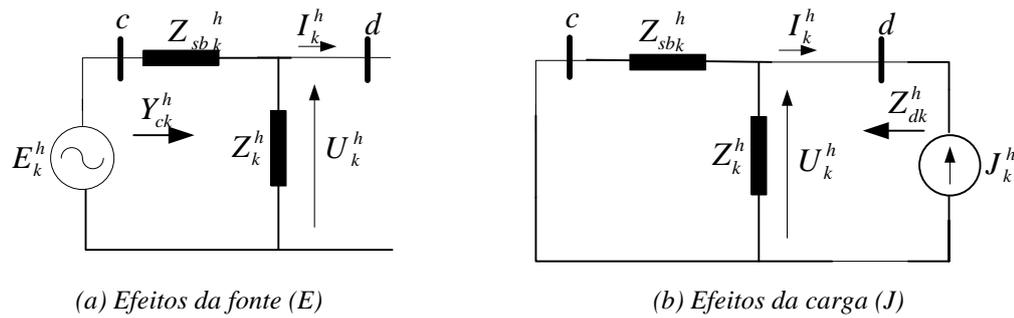


Figura 4.13 – Circuitos equivalentes sequenciais para análise de causas e efeitos.

$$A_k^h = \left[ \frac{I_j}{J} \right]_k^h = \left[ \frac{Z}{Z_{sb} + Z} \right]_k^h \quad (4.27)$$

$$B_k^h = \left[ \frac{U_e}{E} \right]_k^h = \left[ \frac{Z}{Z_{sb} + Z} \right]_k^h \quad (4.28)$$

$$Y_{ck}^h = \left[ \frac{I_e}{E} \right]_k^h = \left[ \frac{1}{Z_{sb} + Z} \right]_k^h \quad (4.29)$$

$$Z_{dk}^h = \left[ \frac{U_j}{J} \right]_k^h = \left[ \frac{Z_{sb} \cdot Z}{Z_{sb} + Z} \right]_k^h \quad (4.30)$$

A impedância adaptada  $Z_{sb}$  representa a somatória da impedância do sistema  $Z_s$  e a impedância do bloqueador  $Z_b$ . E a impedância  $Z$  representa a impedância paralela do filtro eletromagnético  $Z_f$ , do filtro passivo ressonante  $Z_{pr}$  e da carga linear  $Z_L$ .

Analisando as equações (4.27), (4.28), (4.29) e (4.30), observa-se que todas as transmitâncias apresentam um denominador comum dado pela impedância total equivalente composta pelas impedâncias  $Z_{sb}$  e  $Z$ .

Sob o ponto de vista quantitativo, é possível observar que as transmitâncias dadas nas equações (4.27) e (4.28) são idênticas, entretanto diferentes significados físicos.

A transmitância na equação (4.29),  $Y_{ck}^h$ , reflete o efeito da corrente da carga ( $J$ ) como uma parcela da corrente total de alimentação ( $I_j$ ), enquanto que em (4.30),  $Z_{dk}^h$ , reflete o efeito das componentes harmônicas da tensão de alimentação ( $E$ ) sobre as harmônicas da tensão na carga ( $U_e$ ). As outras transmitâncias (4.27) e (4.28) refletem respectivamente os efeitos da tensão de alimentação sobre a corrente alimentação e da corrente da carga sobre a tensão de carga.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a proposta para a operação de um arranjo eletromagnético para controle da injeção de correntes de sequência zero no sistema elétrico. Considerando-se a diversidade da distribuição sequencial das componentes harmônicas de uma corrente, o dispositivo proposto pode ser utilizado no processo de mitigação das componentes de sequência zero. Este dispositivo, aqui denominado supressor eletromagnético, é composto por um bloqueador e um filtro, ambos eletromagnéticos, cuja operação conjunta pode prover caminhos de alta e baixa impedâncias. Os parâmetros destes dispositivos podem ser convenientemente ajustados visando obter o desempenho almejado.

Foi apresentada, ainda, a metodologia adotada para a avaliação do desempenho do sistema de filtragem composto pelo supressor eletromagnético e por filtros ressonantes sintonizados, que auxiliam na filtragem de correntes harmônicas que possuem uma distribuição sequencial com maior concentração nas sequências positivas e negativas, e, portanto, não são afetadas pelos dispositivos eletromagnéticos, contribuindo desta maneira para a melhoria do desempenho global do sistema analisado.

Inicialmente, destacou-se a necessidade de uma representação analítica apropriada para as fontes geradoras de harmônicos, visando garantir resultados confiáveis durante o processo de adequação do sistema de filtragem. A partir dos preceitos operacionais envolvidos, foram investigadas as diretrizes que orientam a escolha das suas representações como fontes de corrente ou fontes de tensão.

No caso abordado, foram empregados modelos em que a representação das cargas não-lineares é dada apenas por fontes de corrente constantes. Esta escolha é devida ao fato de que, para a maioria das possíveis aplicações em sistemas reais, os níveis de distorções harmônicas nas tensões de alimentação apresentam valores abaixo de 10%, sendo este o limite recomendado para o uso desta representação. Além disso, outras incertezas e erros inerentes no processo de simulação, especialmente aqueles vinculados à representação dos demais componentes elétricos, podem superar os desvios acarretados pela simplificação adotada.

Baseando-se no princípio da superposição associado à técnica de representação da rede pelos seus respectivos circuitos equivalentes sequenciais, foram definidas quatro transmitâncias harmônicas que relacionam as principais grandezas elétricas compreendidas no processo. Utilizando esta metodologia é possível identificar, de forma inequívoca, as contribuições individuais de cada excitação harmônica, sejam elas advindas do sistema supridor ou das cargas não-lineares. Deste modo, esta metodologia, aliada à modelagem

proposta para a representação dos filtros eletromagnéticos, capítulo II e dos bloqueadores eletromagnéticos, capítulo III, formam um instrumento analítico eficaz para a determinação das topologias, ajustes e avaliação de desempenho, etapas imprescindíveis na fundamentação das diretrizes-bases que norteiam o projeto de um sistema de filtragem que atente para as exigências estabelecidas previamente.

## **CAPÍTULO V**

---

### **DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE DE DESEMPENHO E TESTE DE ADERÊNCIA DO MODELO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO**

#### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo, são apresentados os requisitos e etapas para o dimensionamento dos protótipos do bloqueador de sequência zero e do filtro de sequência zero, que constituem o aqui denominado supressor eletromagnético de componentes de sequência zero. A finalidade dos protótipos construídos é disponibilizar uma versão em baixa potência dos dispositivos abordados nesta dissertação que, auxiliarão em estudos experimentais das suas características operacionais junto à avaliação da funcionalidade do bloqueador e filtro de harmônicas. Considerando a disponibilidade dos equipamentos do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da FEIS – UNESP, optou-se pela construção de protótipos de 1kVA/ 220V.

As análises propostas neste capítulo são direcionadas para a validação dos modelos matemáticos abordados nos capítulos II, III e IV desta dissertação. Inicialmente, apresenta-se uma breve explicação dos procedimentos experimentais, incluindo uma descrição sucinta dos materiais e equipamentos utilizados. São realizados experimentos que tem por objetivo ilustrar as principais características operacionais dos sistemas de filtragem harmônica junto à suas dependências com alguns parâmetros do sistema. Para verificação da aderência entre os resultados obtidos a partir de experimentos e simulações digitais do modelo proposto neste trabalho, optou-se apenas por alguns casos específicos, sendo estes os mais representativos. Na sequência, tendo em vista uma apresentação mais esclarecedora, são realizados alguns ensaios nos quais o enfoque é ilustrar o comportamento do sistema frente a variações de topologia e condições operacionais.

#### **5.2 ASPECTOS TEÓRICOS SIMPLIFICADOS**

O estudo da operação conjunta do bloqueador e do filtro de componentes de sequência zero é baseado em técnicas no domínio da frequência e, possibilitam uma análise detalhada do funcionamento do intitulado supressor eletromagnético.

### A. Filtro Eletromagnético

O arranjo eletromagnético para o filtro é composto por duas bobinas idênticas, disposta sobre uma mesma coluna do núcleo magnético, denominadas principal e auxiliar. Uma dos terminais do enrolamento principal é ligado em série diretamente a uma das fases do sistema supridor e a outra é ligada a um enrolamento auxiliar, disposto em outro braço do núcleo magnético. A interligação das fases é realizada na direção de obter uma conexão em zig-zag (BELCHIOR, 2006), como ilustrado na figura 5.1(a). Visando a redução de custos a utilização de núcleos trifásicos é comum (OLIVEIRA, 2007b). Esta condição implica em acoplamentos mútuos entre todas as bobinas dispostas no arranjo magnético. Deriva deste fato, a complexidade do modelo matemático e as equações que regem seu funcionamento, obtidas a partir do diagrama elétrico ilustrado na figura 5.1(b).

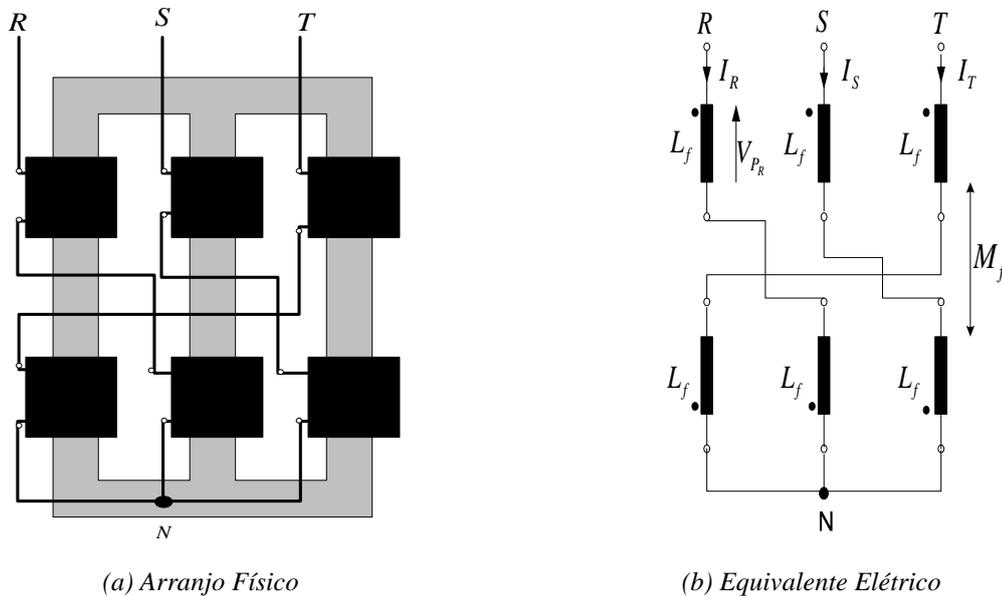


Figura 5.1 – Arranjo do Filtro Eletromagnético

Algumas simplificações podem ser consideradas, uma vez que embora introduzam aproximações no modelo matemático, não comprometem a funcionalidade do filtro. Considerando-se, portanto, as indutâncias próprias idênticas,  $L_f$ , indutâncias mútuas entre bobinas de uma mesma coluna idênticas,  $M_f$ , e indutâncias mútuas entre bobinas de colunas distintas idênticas,  $M$ , obtem-se a partir da referência (APOLÔNIO, 2004), as equações das tensões de seqüências positiva e negativa (5.1), que são similares uma vez que se trata de um equipamento estático e, a tensão sequencial zero (5.2).

$$V_h^{1,2} = j\omega h.[2L_f + M_f - 3M].I_h^{1,2} \quad (5.1)$$

$$V_h^0 = 2j\omega h.[L_f - M_f].I_h^0 \quad (5.2)$$

Considerando-se o fator de acoplamento entre as bobinas dado pela equação (5.3) e substituindo-a em (5.1) e (5.2), obtém-se então (5.4) e (5.5).

$$M_f = \lambda.L_f \quad (5.3)$$

$$V_h^{1,2} = j\omega h.[2 + \lambda - 3\lambda].I_h^{1,2} \quad (5.4)$$

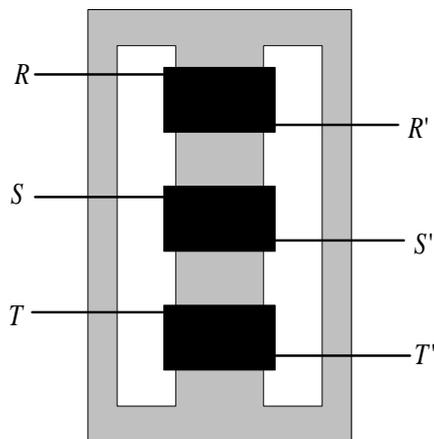
$$V_h^0 = 2j\omega h.[1 - \lambda].I_h^0 \quad (5.5)$$

Para um acoplamento perfeito ( $\lambda = 1$ ), a indutância para sequência zero resulta nula, ou seja,  $M_f = L_f$ . Pode-se dizer então que o dispositivo proposto representa um curto-circuito para todas as correntes de sequência zero, sendo, portanto, um filtro ideal para esta sequência.

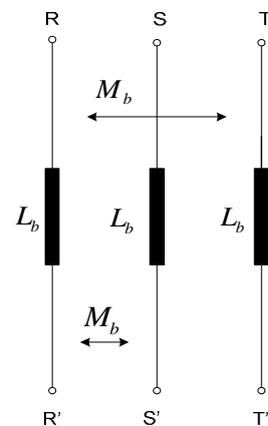
### B. Bloqueador Eletromagnético

O bloqueador eletromagnético se apresenta como mais uma opção nos processos de atenuação harmônica. Este dispositivo é conectado em série entre a fonte e a carga não-linear, oferecendo alta impedância para componentes harmônicas de sequência zero (DAHONO, 1997).

A figura 5.2(a) ilustra o arranjo eletromagnético do bloqueador, que é formado por três enrolamentos dispostos em um mesmo núcleo magnético. Assim como para o filtro eletromagnético, um acoplamento com baixa dispersão é fator preponderante no que tange a maximização de seu funcionamento como bloqueador de componentes de sequência zero. O diagrama elétrico do dispositivo utilizado para obtenção das equações matemáticas no domínio da frequência é elucidado na figura 5.2(b).



(a) Arranjo Físico



(b) Equivalente Elétrico

Figura 5.2 – Arranjo do Bloqueador Eletromagnético

Baseando-se na similaridade dos enrolamentos, aspectos geométricos e construtivos do núcleo magnético, algumas condições simplificadoras são novamente consideradas. Admite-se as indutâncias próprias idênticas,  $L_b$ , as indutâncias mútuas entre bobinas distintas também idênticas,  $M_b$ , obtêm-se as expressões das tensões sequenciais em (5.6) e (5.7).

$$V_h^{1,2} = j\omega h.[L_b - M_b].I_h^{1,2} \quad (5.6)$$

$$V_h^0 = j\omega h.[L_b + 2M_b].I_h^0 \quad (5.7)$$

Considerando-se o fator de acoplamento entre as bobinas dado pela equação (5.8), obtêm-se então (5.9) e (5.10).

$$M_b = \lambda.L_b \quad (5.8)$$

$$V_h^{1,2} = j\omega h.[1 - \lambda].I_h^{1,2} \quad (5.9)$$

$$V_h^0 = j\omega h.[1 + 2\lambda].I_h^0 \quad (5.10)$$

Considerando-se um acoplamento perfeito,  $\lambda = 1$ , é possível dizer que o dispositivo apresenta uma alta impedância para todas as correntes de sequência zero, realizando, portanto, o bloqueio das componentes de sequência zero, enquanto que as impedâncias de sequências positiva e negativa são nulas.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO E PROJETO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO

Além dos aspectos relacionados com o nível de potência a ser processado e a tensão nominal estabelecidos inicialmente, é preciso considerar ainda os demais aspectos construtivos necessários para alcançar a funcionalidade desejada, ou seja, o supressor eletromagnético, composto pela operação conjunta do bloqueador e do filtro de sequência zero. Portanto, é fundamental que o projeto confira algumas particularidades topológicas que aumentem e minimizem a impedância equivalente para sequência zero necessária para a atuação dos respectivos dispositivos.

Foram adotadas as seguintes premissas para o dimensionamento do projeto:

- Potência nominal: 1kVA;
- Tensão nominal: 220V, 60Hz;

#### *C. Dimensionamento do Filtro Eletromagnético*

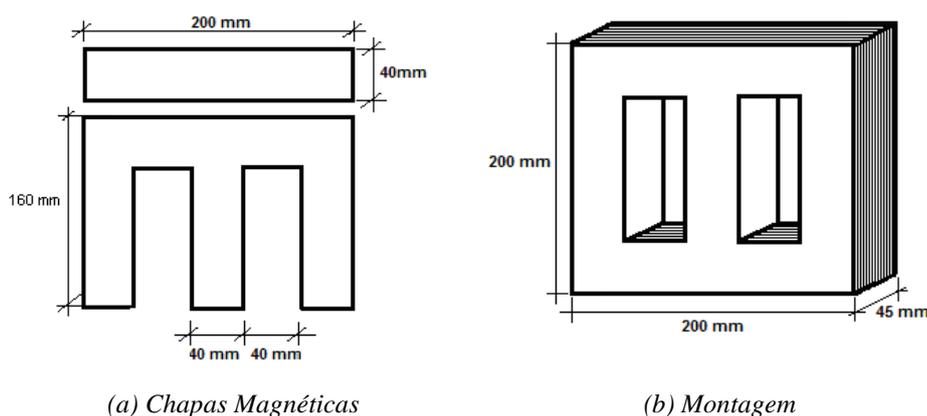
Para o dimensionamento do filtro eletromagnético, baseado no modelo teórico apresentado no capítulo II, constata-se que a indutância equivalente de sequência zero tende a

um valor mínimo à medida que as bobinas principal e auxiliares sejam similares, sob o ponto de vista das suas indutâncias próprias, e que o acoplamento magnético entre as mesmas se aproxime do ideal. Em (RAVAGNANI, 2007) o dimensionamento do filtro eletromagnético é abordado detalhadamente.

Com o intuito, portanto, de investigar experimentalmente o desempenho do filtro eletromagnético de sequência zero, um protótipo foi construído levando em consideração os seguintes parâmetros:

- Densidade de fluxo máxima: 11300 Gauss;
- Núcleo magnético: chapas de aço-silício;
- Arranjo magnético: três colunas (núcleo envolvido - “core type”);
- Enrolamentos: duas bobinas por coluna magnética;
- Fio:  $0,5\text{mm}^2$ ;

A figura 5.3 ilustra a representação física do protótipo em questão.



(a) Chapas Magnéticas

(b) Montagem

Figura 5.3 – Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do filtro.

O procedimento para projeto das bobinas e da seção transversal do núcleo é desenvolvido em (GRUZS, 1990). É importante destacar que, para garantir o limite máximo adotado da densidade de fluxo, deve-se considerar a tensão equivalente composta pelas bobinas principal e auxiliar de cada coluna do circuito magnético, as quais são alimentadas por diferentes fases. Nestas condições foram obtidas as seguintes especificações:

- Bobinas: 237 espiras;
- Seção transversal do núcleo:  $18\text{ cm}^2$ ;
- Lâminas de aço silício padrão E, I: 6HS-400 TFE.

Como mencionado anteriormente, no capítulo referente ao desenvolvimento teórico, a otimização da funcionalidade do dispositivo como filtro para correntes de sequência zero

depende, principalmente, da maximização do acoplamento magnético entre as bobinas principal e auxiliar de um mesmo braço magnético. Neste contexto, pretendendo alcançar o melhor acoplamento possível na montagem das bobinas, além da adoção de enrolamentos concêntricos, utilizou-se ainda uma técnica construtiva particular, onde cada espira é composta pelos condutores de cada um dos enrolamentos justapostos.

Em contra partida, no que se refere às indutâncias equivalentes de sequência positiva e negativa, é conveniente que as mesmas sejam maximizadas para que a interferência do filtro no sistema seja a menor possível. Por se tratar de um componente propriamente indutivo, o fator predominante neste aspecto refere-se à manutenção do fator de potência no sistema próximo ao seu valor original após a instalação do filtro (OLIVEIRA, 2007a). Além do mais, como pode ser visto em (OLIVEIRA, 2005), as impedâncias de sequência positiva e negativa normalmente apresentam altos valores e ainda crescem com o aumento da frequência. A figura 5.4 mostra uma foto do protótipo construído.



*Figura 5.4 – Foto do protótipo construído (1kVA/ 220V)*

#### ***D. Dimensionamento do Bloqueador Eletromagnético***

Para o dimensionamento do bloqueador eletromagnético, baseado no modelo teórico apresentado no capítulo III, verifica-se que os acoplamentos entre os enrolamentos das bobinas se aproximam de tal forma que as indutâncias mútuas e próprias se igualam e, conseqüentemente, o dispositivo proporcionará uma alta indutância de sequência zero, bloqueando assim estas componentes harmônicas. Para que haja essa igualdade entre as indutâncias próprias e mútuas há necessidade de um acoplamento ideal, que aumenta a eficiência do bloqueio das componentes de sequência zero e, para as demais componentes, de sequência positiva e negativa, acontece o contrário, pois obtem-se um curto-circuito para as mesmas.

Objetivando a investigação experimental do desempenho do bloqueador eletromagnético de sequência zero, também foi construído um protótipo do mesmo. Os parâmetros a serem considerados na construção do bloqueador são:

- Densidade de fluxo máxima: 11300 Gauss;
- Núcleo magnético: chapas de aço-silício;
- Arranjo magnético: três colunas (núcleo envolvido - “core type”);
- Enrolamentos: três bobinas na coluna magnética;
- Fio:  $0,5\text{mm}^2$ ;

O procedimento e as ponderações apontadas para projeto das bobinas e da seção transversal do núcleo seguem a mesma metodologia utilizada na construção do filtro eletromagnético, figura 5.5. O protótipo foi construído considerando as seguintes especificações:

- Bobinas: 237 espiras;
- Área do núcleo magnético:  $25\text{ cm}^2$ ;
- Lâminas de aço silício padrão E, I: 6HS-400 TFE;

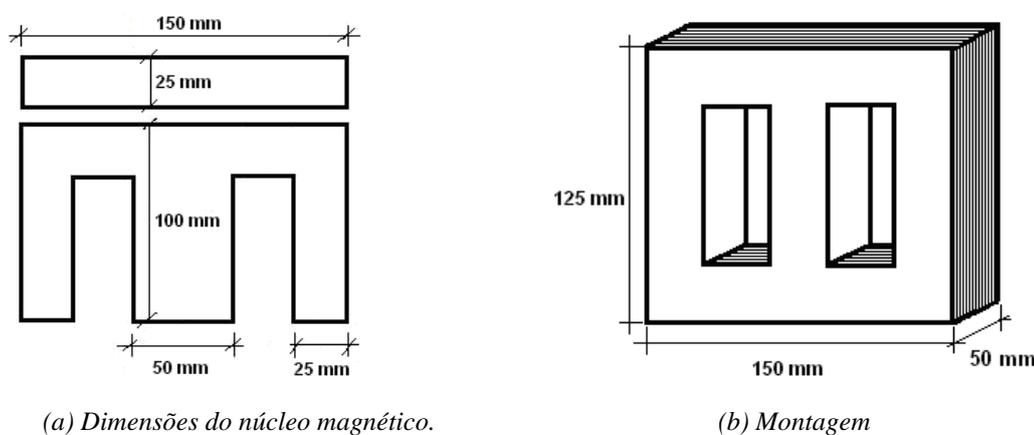


Figura. 5.5 - Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do bloqueador.

Considerando a investigação dos efeitos do valor total da indutância série e do acoplamento magnético no desempenho do dispositivo em questão, um arranjo com nove bobinas concêntricas, eletricamente isoladas foi adotado. Detalhes construtivos do bloqueador são ilustrados na figura 5.6.

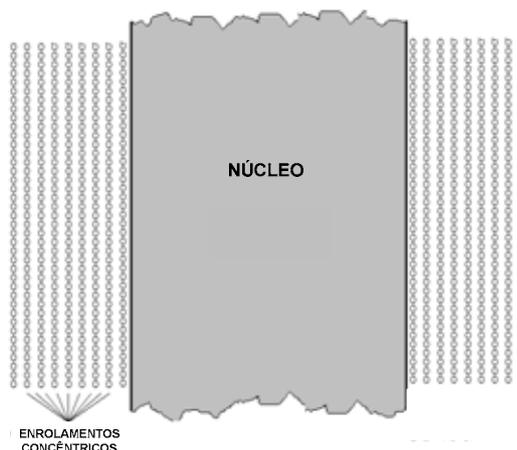


Figura. 5.6 - Detalhes construtivos das bobinas

Como já visto nos capítulo III, este dispositivo é concebido a partir de três bobinas magneticamente acopladas e dispostas sobre um mesmo núcleo constituindo-se, assim, os chamados bloqueadores eletromagnéticos de sequência zero. Para esta configuração, quando conectados em série com a rede elétrica, apresentam uma alta impedância para as componentes de sequência zero e podem minimizar a circulação das harmônicas “triplens”. Para estes dispositivos há possibilidade de operação isolada ou atuação como dispositivo auxiliar adaptador de impedâncias para os filtros eletromagnéticos instalados em sistemas com alto nível de curto circuito no PAC (DAHONO, 1997; CZARNECKI, 1994). A figura 5.7 mostra uma foto do bloqueador eletromagnético construído.



Figura. 5.7 – Protótipo do bloqueador eletromagnético.

## 5.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O sistema elétrico apresentado em síntese na figura 5.8, foi montado como plataforma para o desenvolvimento das análises experimentais. Este sistema é composto por uma carga não-linear, uma carga linear, um filtro eletromagnético, um bloqueador eletromagnético, um filtro ressonante sintonizado em ordens variáveis de acordo com a necessidade de cada experimento e a uma fonte de alimentação programável. Os diferentes equipamentos são acionados individualmente através de contatores, possibilitando prover as diferentes configurações a serem investigadas.

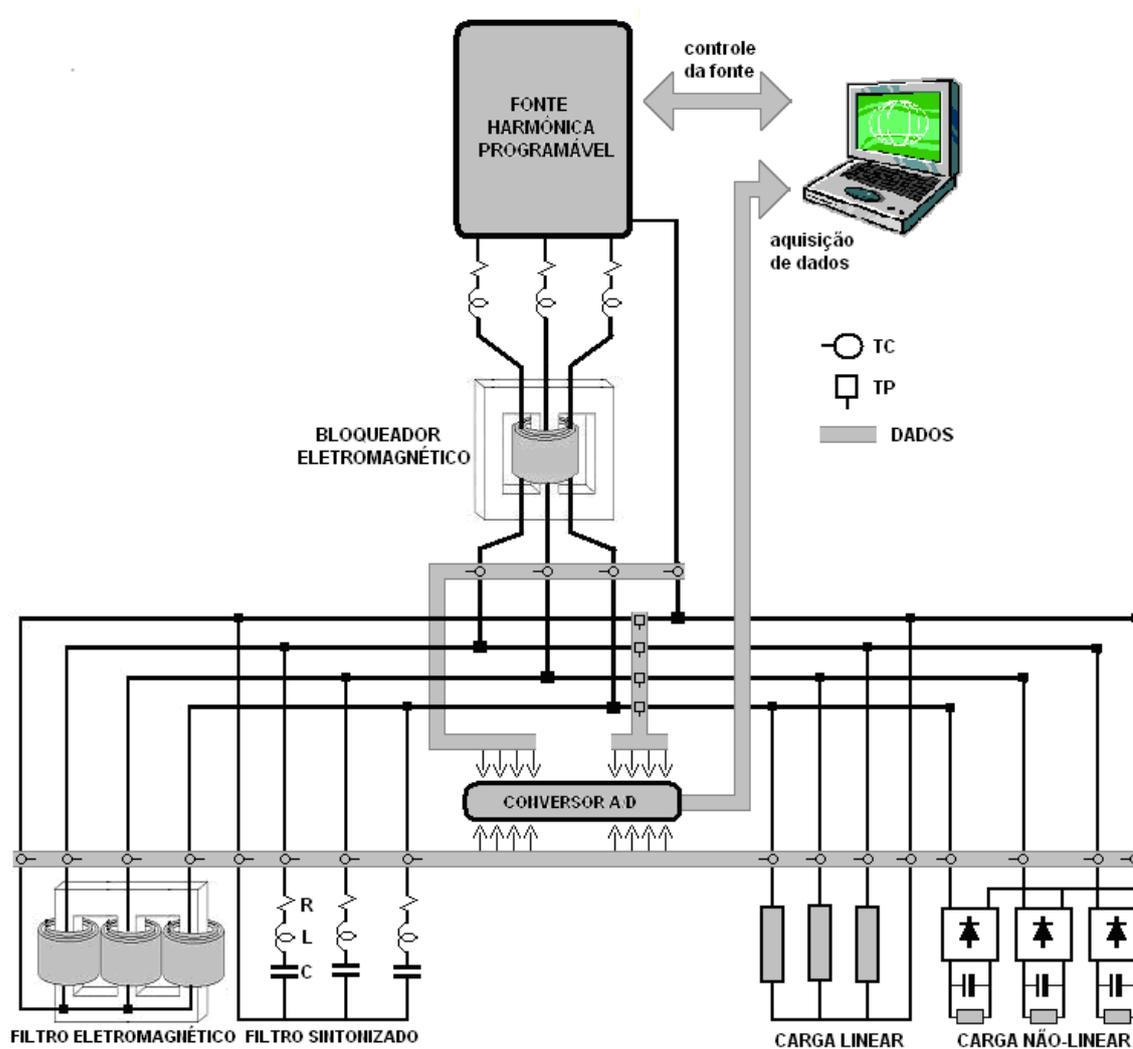


Figura 5.8 – Diagrama esquemático para estudos experimentais

Os procedimentos experimentais para levantamento das características operacionais do sistema foram proporcionados a partir de materiais e equipamentos disponíveis no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (LQEE) da FEIS- UNESP. Utilizou-se uma fonte de

alimentação trifásica programável em conjunto com um gerador de harmônicas, a partir dos quais foi possível definir as amplitudes, ângulos de fase e frequência para cada uma das tensões fase-neutro, de forma independente. O controle da aquisição de dados e da fonte programável, bem como o processamento dos sinais captados, é realizado através de um microcomputador a partir de aplicativos computacionais disponíveis no LQEE. Entre os aplicativos, destacam-se o DasyLab para controle da aquisição de dados, o CIGUI para controle da fonte de alimentação e a Planilha Excel para processamento de sinais.

#### 5.4.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

A fonte de alimentação programável foi utilizada, figura 5.9(a), na busca por garantir a integridade do experimento quanto à influência da distorção harmônica do sistema de alimentação da concessionária.

O uso deste equipamento garante um sistema de alimentação trifásico com distorções abaixo de 0,1% e desequilíbrios inferiores a 0,05%, praticamente ideal (CALIFORNIA INSTRUMENTS, 2001). Nestas condições, e ainda considerando-se a classe de precisão dos equipamentos de medida, assegura-se que a carga não-linear instalada seja, praticamente, a única fonte geradora de harmônicos do sistema. Por outro lado, o uso deste equipamento permite impor, sob total controle do usuário, diferentes níveis de distorções harmônicas e/ou desequilíbrios, quando necessários para os experimentos em questão (RAVAGNANI, 2008). O sistema de aquisição de dados utilizados dispõe de 8 canais simultâneos com resolução de 12 bits e taxa de amostragem máxima de 1MHz, figura 5.9 (b).



(a) Fonte programável



(b) sistema de aquisição de dados

Figura 5.9 - Identificação dos equipamentos na plataforma experimental.

#### 5.4.2 APLICATIVOS COMPUTACIONAIS PARA CONTROLE E PROCESSAMENTO DE SINAIS

O controle da fonte de alimentação foi realizado utilizando-se o aplicativo GUI-HGA<sup>®</sup>, disponibilizado pela *California Instruments*, através do qual é possível definir, a partir de um ambiente computacional, as condições operacionais desejadas. Diferentes condições de assimetria entre fases podem ser fixadas, tanto em amplitudes como em ângulos de fase, as quais podem ainda ser aplicadas individualmente para cada componente harmônica do sinal das tensões de alimentação.

O aplicativo DasyLab<sup>®</sup>, da *National Instruments*, foi utilizado para controle da aquisição de dados. Este aplicativo possibilita definir o número de canais a serem digitalizados, as condições operacionais dos conversores A/D, e demais processamentos dos sinais captados pelos conversores analógico/digital.

Para processamento dos sinais utilizou-se um aplicativo desenvolvido no contexto de um trabalho anterior realizado neste mesmo laboratório (RAVAGNANI, 2008), na forma de planilhas eletrônicas no ambiente Excel. Tem por objetivo efetuar a DFT (*Discrete Fourier Transformer*) e extrair o valor eficaz, considerando-se um ciclo de cada sinal amostrado, obtido a partir da média de 30 ciclos consecutivos. Os sinais são processados tomando-se por base uma taxa de 128 amostras por ciclo, assim fixadas pelo sistema de aquisição de dados. Destaca-se que este padrão de amostragem garante a recuperação adequada, dentro da classe de precisão dos equipamentos de medida e demais transdutores, de frequências harmônicas de até 900Hz, ou seja, até a 15<sup>a</sup> harmônica, tomando por base a frequência de 60Hz.

#### 5.4.3 CARGA NÃO-LINEAR

Os objetivos deste trabalho estão essencialmente direcionados, para o desenvolvimento de modelos e análise funcionais de bloqueadores e filtros eletromagnéticos. Como visto nos capítulos anteriores, o princípio básico de funcionamento está diretamente relacionado ao seu comportamento frente às diferentes formas de excitação no que tange à sua distribuição sequencial, apresentando notadamente uma alta e uma baixa impedância para as componentes de sequência zero.

Como se sabe existem inúmeras possibilidades para composição de uma carga não-linear trifásica. Neste sentido, visando destacar o desempenho operacional do bloqueador e do filtro eletromagnético, optou-se por um arranjo de cargas não-lineares com expressiva concentração de harmônicas de sequência zero. Para tanto, adotou-se uma carga trifásica não-

linear composta a partir de três retificadores monofásicos construídos na topologia em ponte, alimentando cargas resistivas variáveis, com filtragem capacitiva. As figuras 5.10 e 5.11 ilustram o arranjo utilizado e as fotografias do aspecto final de montagem dos retificadores, respectivamente. A tabela 5.1 apresenta os dados nominais da carga não-linear.

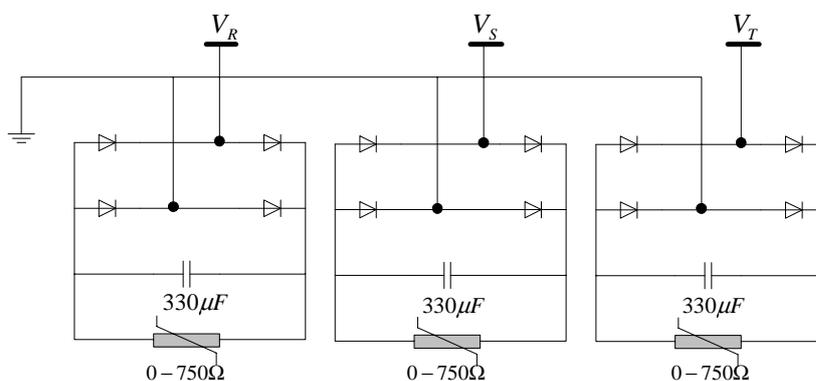
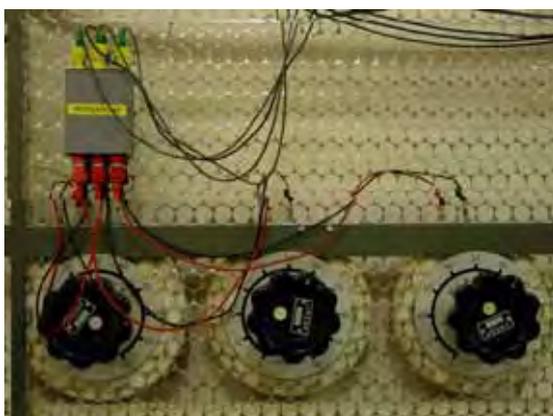


Figura 5.10 – Carga não-linear trifásica e detalhe dos retificadores.



(a) arranjo trifásico da carga não-linear

(b) detalhe das pontes de retificadores

Figura 5.11 – Carga não-linear trifásica e detalhe dos retificadores

Tabela 5.1 – Dados Nominais da carga não-linear

Potencia Nominal (kVA)	1
Capacitores de filtragem no lado CC ( $\mu\text{F}$ )	330
Valor fixado para os resistores de carga ( $\Omega$ )	370

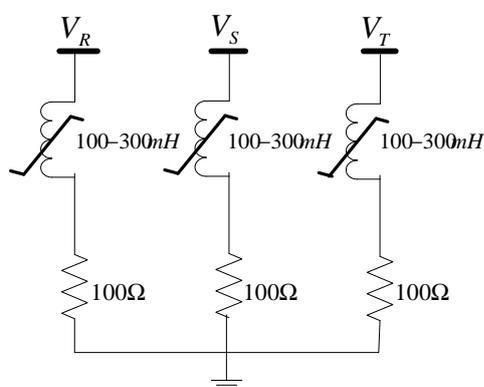
#### 5.4.4 CARGA LINEAR

Como carga linear adotou-se um arranjo trifásico composto por três arranjos monofásicos independentes de resistores e indutores. Para garantir a característica de

linearidade desejada para esta carga, foram utilizados indutores com entreferro. O dispositivo montado permite ajuste contínuo do valor da indutância total variando-se o comprimento do entreferro. Na tabela 5.2, são apresentados os dados nominais da carga linear. A figura 5.12 ilustra o arranjo utilizado e na figura 5.13 é possível visualizar a montagem trifásica utilizada.

*Tabela 5.2 – Dados nominais da carga linear*

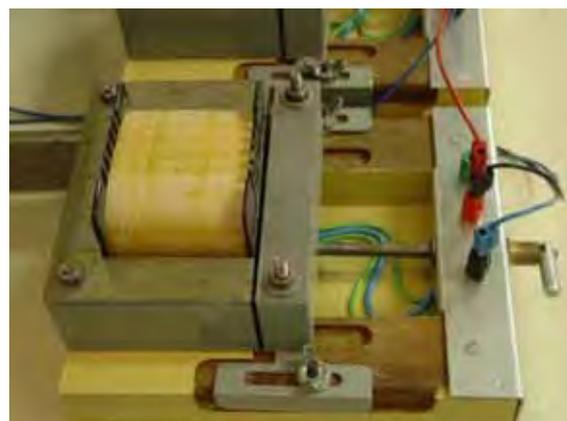
Potencia nominal (kVA)	0,4
Fator de Potência	0,83
Indutância total por fase (mH)	180
Resistência total por fase ( $\Omega$ )	100



*Figura 5.12 – Carga linear trifásica*



*(a) arranjo trifásico da carga linear*



*(b) detalhe do reator ajustável*

*Figura 5.13 – Carga linear trifásica e detalhe dos indutores ajustáveis*

#### 5.4.5 FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Para os ensaios experimentais utilizou-se o protótipo projetado segundo os critérios estabelecidos anteriormente neste mesmo capítulo, item 5.3 (referencial A). Na tabela 5.3 constam os dados nominais obtidos a partir de medições realizadas no protótipo construído.

*Tabela 5.3 – Dados nominais do filtro eletromagnético*

Potencia nominal de projeto (kVA)	1
Tensão nominal de projeto (V)	220
Indutância própria das bobinas (mH)	120
Relação X/R das bobinas	445
Fator de acoplamento entre bobinas de uma mesma coluna	0,9998
Fator de acoplamento entre bobinas de colunas distintas	0,70

#### 5.4.6 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

Para os ensaios experimentais utilizou-se o protótipo projetado segundo os critérios estabelecidos anteriormente neste mesmo capítulo, item 5.3 (referencial B). Na tabela 5.4 constam os dados nominais obtidos a partir de medições realizadas no protótipo construído.

*Tabela 5.4 – Dados nominais do bloqueador eletromagnético*

Potencia nominal de projeto (kVA)	1
Tensão nominal de projeto (V)	220
Indutância própria das bobinas (mH)	16
Fator de acoplamento entre bobinas de uma mesma coluna	0,9999

#### 5.4.7 FILTROS RESSONANTES

Os filtros ressonantes são constituídos de arranjo série de indutores variáveis e capacitores fixos (OLIVEIRA, 2010b). Foi construído um filtro ressonante, sintonizado na frequência de 300Hz. A sintonia é obtida a partir do ajuste do comprimento do entreferro dos indutores.

Para o controle de ajuste da sintonia utilizou-se o equipamento PsimetricQ – modelo PSM1700, marca N4L. A título de ilustração, apresenta-se o equipamento citado e a resposta em frequência para filtro ressonante sintonizado em 300Hz, figura 5.14.

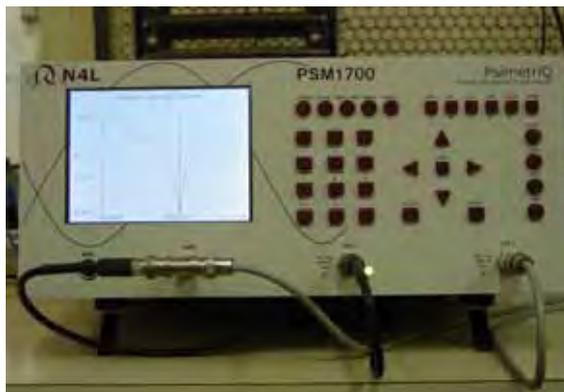


Figura 5.14 – Procedimento para ajuste de sintonia do filtro ressonante de 300Hz.

A tabela 5.5 fornece os dados nominais do filtro ressonante utilizado no experimento e a figura 5.15, mostra o arranjo trifásico de um dos filtros sintonizados.

Tabela 5.5 – Dados nominais dos filtros ressonantes

Sintonia	L (mH)	C( $\mu$ F)	Fator de Qualidade
300 Hz	57	5	30

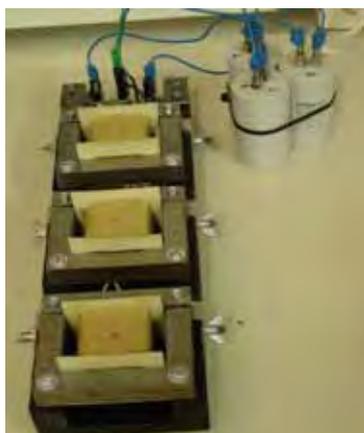


Figura 5.15 – Arranjo físico utilizado no filtro ressonante de 300 Hz.

#### 5.4.8 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

A funcionalidade dos filtros paralelos sejam eles de natureza eletromagnética ou ressonantes, depende fundamentalmente do nível de curto-circuito do barramento onde são instalados (RAVAGNANI, 2008). Desta forma, considerando-se as limitações de potência dos protótipos construídos, este transformador tem também por finalidade compatibilizar o nível de curto-circuito do barramento com as potências nominais do bloqueador e do filtro eletromagnético. A figura 5.16 ilustra o equipamento utilizado e na tabela 5.6, apresentam-se seus dados nominais e a conexão empregada.

Tabela 5.6 – Transformador de acoplamento

Potencia (kVA)	3
Tensão primária (V)	220
Dispersão (%)	20
Conexão	Triângulo / Estrela

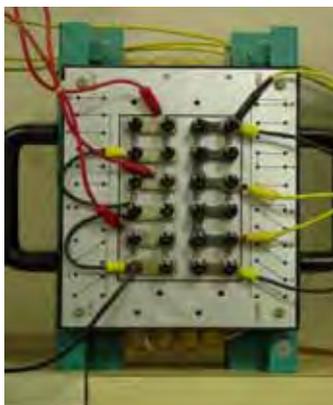


Figura 5.16 – Transformador de acoplamento

## 5.5 TESTE DE ADERÊNCIA PARA O MODELO DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO

Na busca de uma apresentação sintética e elucidativa apresentam-se, a seguir, resultados onde se procura destacar e ilustrar os princípios operacionais de um sistema composto por cargas lineares, não-lineares, filtro ressonante sintonizado, filtro eletromagnético de sequência zero e bloqueador eletromagnético de sequência zero. A tabela 5.7 traz os dados da utilizados na simulação.

Tabela 5.7 – Dados do sistema e dos filtros.

Tensão (V)	127
Frequência (Hz)	60
Relação X/R a 60 Hz	2
Sc <sub>c</sub> / P <sub>carga</sub>	25
Fator de Potência da carga linear	0.71
Filtro ressonante de 5h	L = 57mH; C = 5μF
Filtro eletromagnético	L = 120mH; λ = 0,99
Bloqueador eletromagnético	L = 16mH; λ = 0,99

Neste contexto, baseado no diagrama unifilar ilustrado na figura 5.17, foram implementados e simulados digitalmente através de um aplicativo computacional elaborado no programa *Excel*<sup>®</sup>, dois casos que abordam sistemas de filtragem distintos. No primeiro caso, o

sistema de filtragem sem a presença do bloqueador eletromagnético de sequência zero, chave S fechada. No segundo caso, a inclusão do bloqueador no sistema de filtragem, chave S aberta.

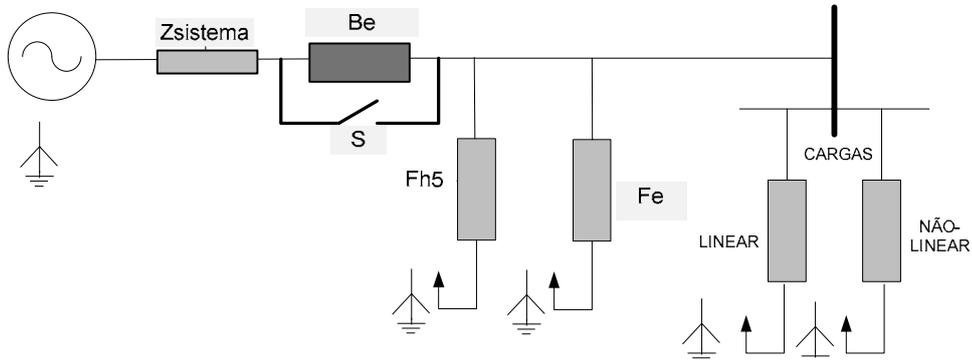
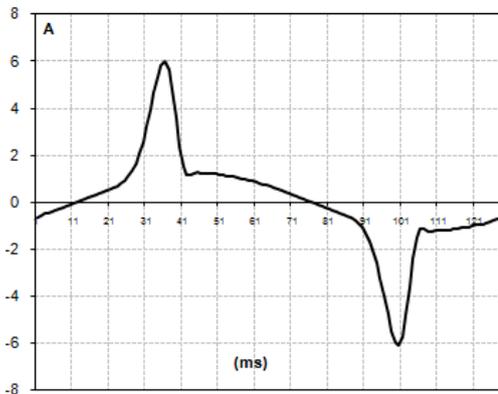
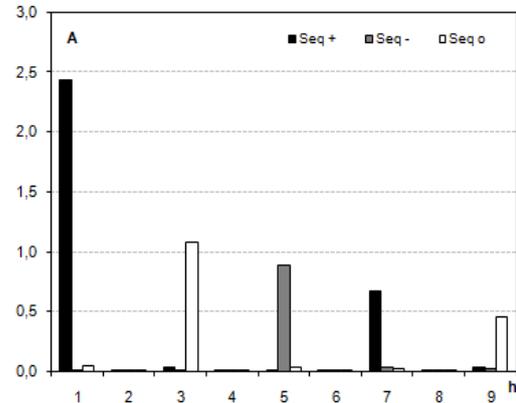


Figura 5.17- Diagrama uni filar simplificado.

O resultado experimental obtido para a corrente de alimentação da carga total é ilustrado na figura 5.18. Esta corrente foi tomada como referência para compor a fontes de corrente, representativa da carga não-linear no modelo teórico. A forma de onda da corrente de carga total e o espectro harmônico do modelo teórico são ilustrados na figura 5.19.

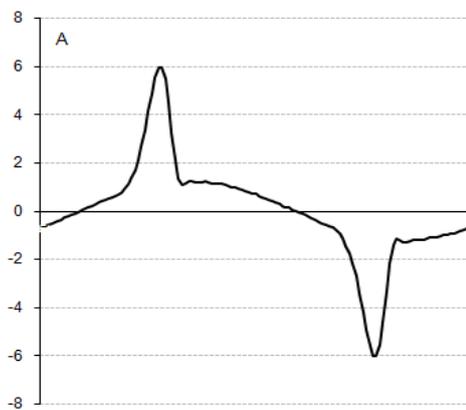


(a) Corrente total de carga.

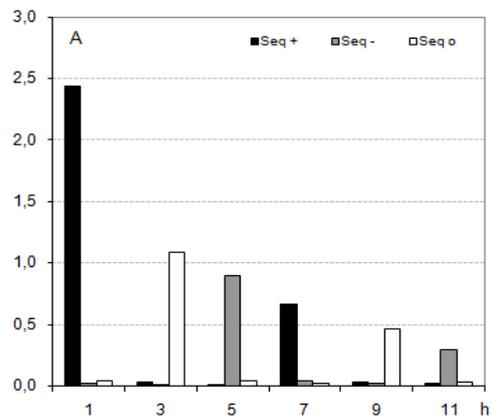


(b) Espectro Harmônico

Figura 5.18 – Resultado experimental da corrente total de carga.



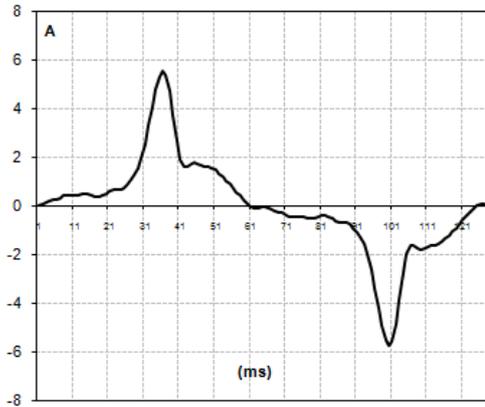
(a) Corrente total de carga.



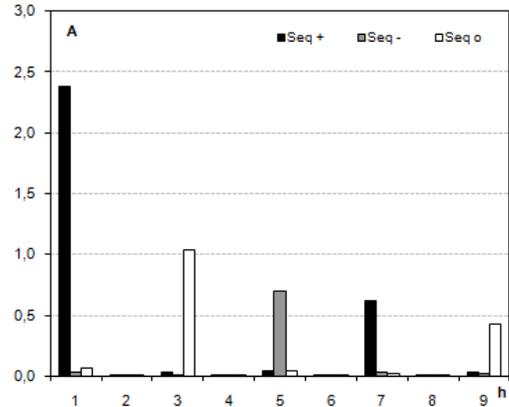
(b) Espectro Harmônico

Figura 5.19 – Resultados de simulação digital da corrente total de carga.

Considerando-se inicialmente o sistema de filtragem sem a presença do bloqueador eletromagnético de sequência zero, chave S aberta, obteve-se os resultados experimentais e teóricos ilustrados nas figuras 5.20 e 5.21, respectivamente, referentes ao ensaio 1. A tabela 5.8 mostra os valores para os resultados obtidos.

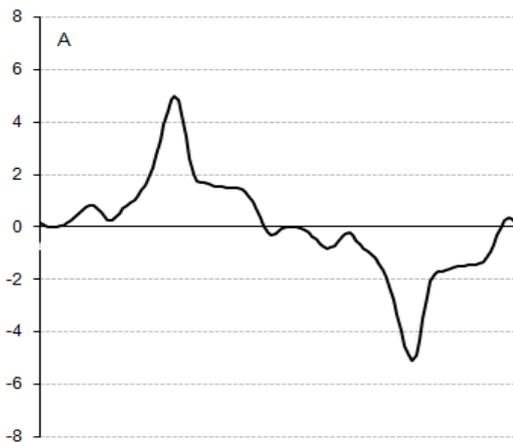


(a) Corrente de alimentação

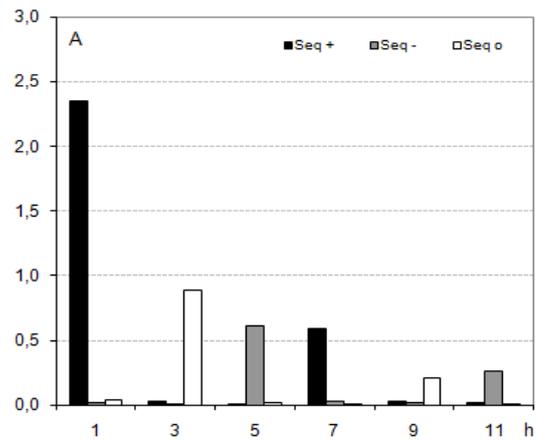


(b) Espectro Harmônico

Figura 5.20 – Resultado Experimental da corrente de alimentação sem a presença do bloqueador eletromagnético.



(a) Corrente de alimentação



(b) Espectro Harmônico

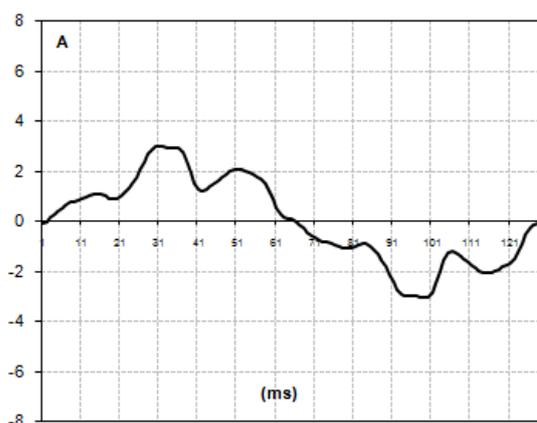
Figura 5.21 - Resultado de simulação digital da corrente de alimentação sem a presença do bloqueador eletromagnético.

Tabela 5.8 – Valores obtidos para o ensaio 1.

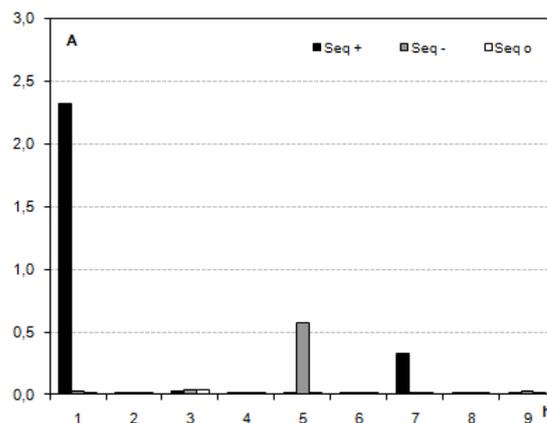
h	Resultado Experimental			Resultado Simulado		
	$I_+(A)$	$I(A)$	$I_0(A)$	$I_+(A)$	$I(A)$	$I_0(A)$
1	2,4	0	0,0	2,4	0,0	0,0
3	0	0	1,1	0	0	0,9
5	0	0,7	0	0	0,6	0
7	0,6	0	0	0,55	0	0
9	0	0	0,4	0	0	0,3

Neste caso, fica claro o desempenho insatisfatório dos filtros. Para a terceira harmônica, na qual se concentram as amplitudes mais relevantes, houve uma redução insignificante no fluxo desta componente harmônica para o sistema. Este fato ocorre devido à relação desfavorável entre a impedância de sequência zero do filtro eletromagnético e a impedância de sequência zero do sistema no PAC.

Com a inclusão do bloqueador eletromagnético de sequência zero, pretende-se compatibilizar a impedância de sequência zero do filtro eletromagnético com o nível de curto circuito no PAC. Nestas condições a impedância de sequência zero total no PAC será praticamente definida pela impedância de sequência zero imposta pelo bloqueador eletromagnético. Os resultados experimentais e de simulações digitais para este caso são ilustrados nas figuras 5.22 e 5.23, respectivamente, referentes ao ensaio 2, chave S aberta. A tabela 5.9 expressa em valores os resultados obtidos.

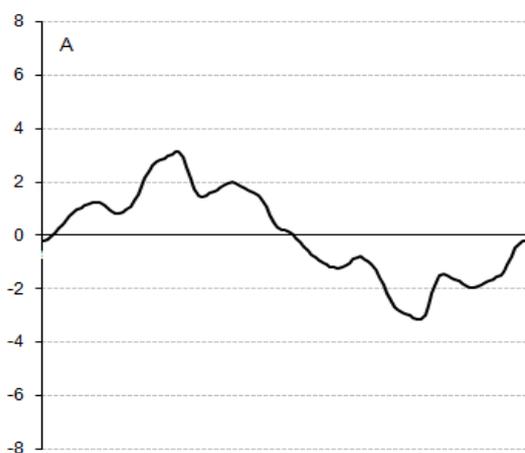


(a) Corrente de alimentação

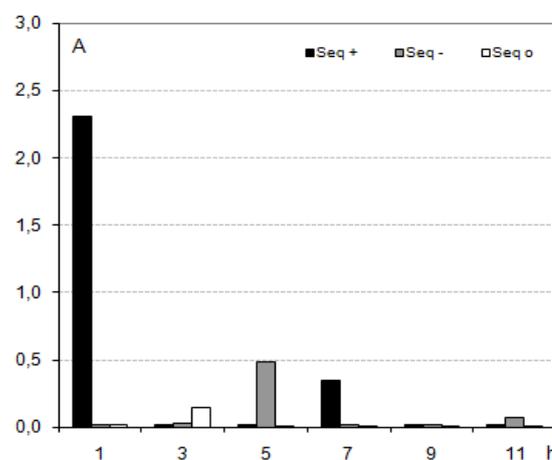


(b) Espectro Harmônico

Figura 5.22 – Resultado Experimental da corrente de alimentação com a presença do bloqueador eletromagnético.



(a) Corrente de alimentação



(b) Espectro Harmônico

Figura 5.23 - Resultado de simulação digital da corrente de alimentação com a presença do bloqueador eletromagnético.

Tabela 5.9 – Valores obtidos para o ensaio 2.

h	Resultado Experimental			Resultado Simulado		
	I <sub>+</sub> (A)	I(A)	I <sub>0</sub> (A)	I <sub>+</sub> (A)	I(A)	I <sub>0</sub> (A)
1	2,4	0	0	2,4	0,0	0,0
3	0	0	0	0	0	0,15
5	0	0,6	0	0	0,5	0
7	0,3	0	0	0,4	0	0
9	0	0	0	0	0	0

Os resultados ilustrados na figuras 5.22 e 5.23 mostram claramente uma redução drástica das componentes de sequência zero, especialmente a terceira harmônica. Isto é, devido à melhoria da relação entre a impedância de sequência zero do sistema e da impedância do filtro eletromagnético, favorecendo o aumento da corrente de sequência zero que flui através do filtro. Como esperado, este comportamento se deve à presença do bloqueador eletromagnético de sequência zero em série com o sistema de alimentação.

Particularmente, na ótica e objetivo deste trabalho verificou-se que para todos os casos investigados houve uma aderência satisfatória entre os resultados teóricos simulados e os experimentais, validando-se assim o modelo proposto para análise do desempenho de sistemas de filtragem contendo bloqueadores e filtros eletromagnéticos de sequência zero.

Destaca-se que as discrepâncias observadas se devem basicamente, em ordem crescente de importância, a três causas: erros de medição associados aos sensores de corrente e ao sistema de aquisição de dados, aproximações adotadas nos modelos teóricos e definição dos parâmetros elétricos e magnéticos dos dispositivos de filtragem e do bloqueador eletromagnético. Há de considerar ainda a limitação do conteúdo harmônico injetado pelas fontes de corrente utilizada para representar a carga não linear no modelo teórico.

## 5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Diversos resultados foram obtidos durante os processos de ajuste e teste de aderência do modelo do sistema de filtragem harmônica. Buscando uma apresentação mais esclarecedora, são apresentados a seguir alguns resultados de casos nos quais o foco é ilustrar o comportamento diverso do sistema frente a diferentes topologias e condições operacionais. Na Tabela 5.10 apresentam-se os principais dados do sistema e dos filtros e a figura 5.24

ilustra o diagrama unifilar utilizado para os ensaios experimentais. Os resultados para as correntes e tensões são obtidos através dos respectivos transdutores conectados ao PAC.

Tabela 5.10 – Dados do sistema

	Tensão (V)	127
	Frequência (Hz)	60
<b>Dados do Sistema</b>	Relação X/R a 60 Hz	2
	Sc <sub>c</sub> / P <sub>carga</sub>	25
	Fator de Potência da carga linear	0,71
	Filtro ressonante de 5h	L = 57mH; C = 5μF
<b>Dados dos Filtros</b>	Filtro eletromagnético	L = 16mH; λ = 0,99
	Bloqueador eletromagnético	L = 5,2mH; λ = 0,99

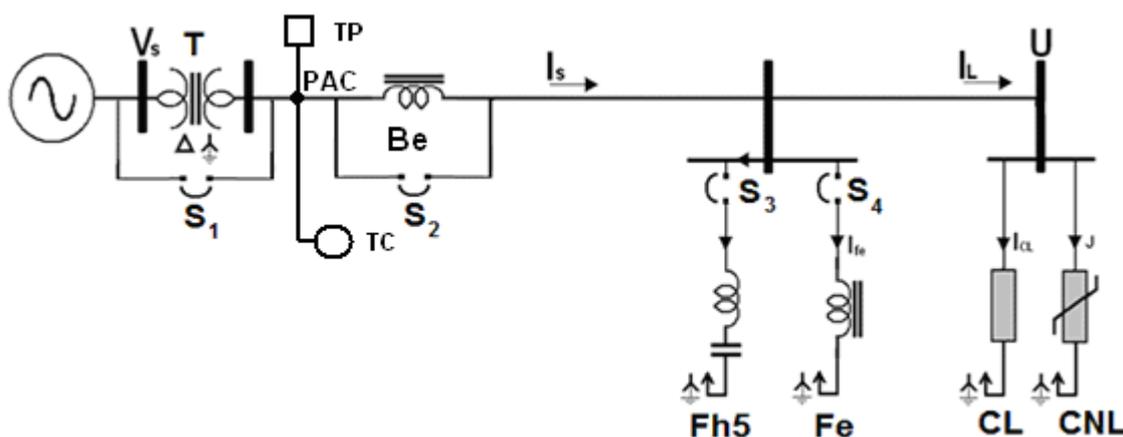
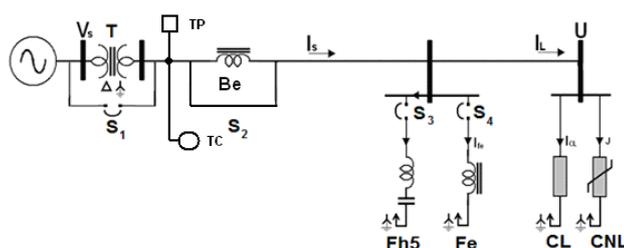


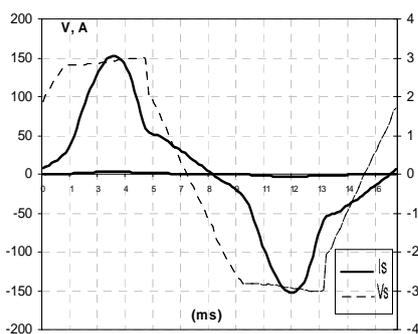
Figura 5.24 – Diagrama unifilar para síntese dos experimentos.

## CASO 1

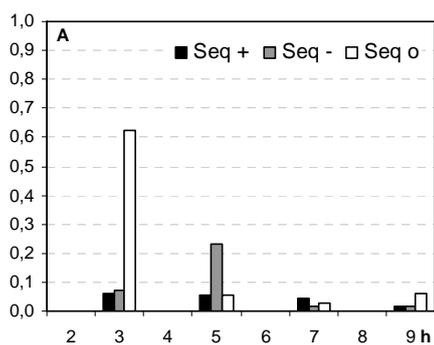
- **Objetivo:** Observar o comportamento das harmônicas injetadas pelo conjunto de cargas no sistema, em uma rede com baixo nível de curto-circuito. Este é o caso base, utilizado para análises comparativas dos casos 2, 3 e 4.
- **Características:** – Alimentação senoidal equilibrada, transformador ligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h desligado e filtro eletromagnético desligado.



(a) Diagrama experimental do caso 1.

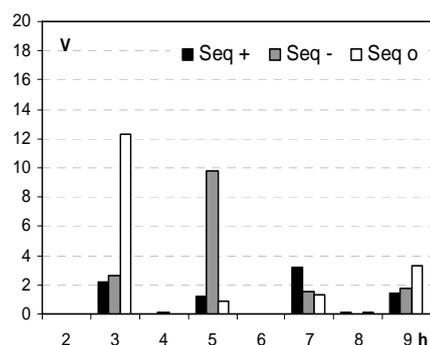


(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



DTI = 35,66%

(c) Espectro harmônico da corrente.



DTV = 10,2%

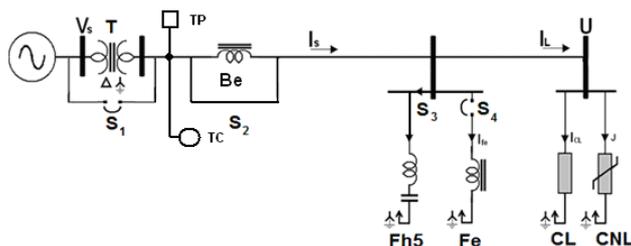
(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.25 – Caso 1 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

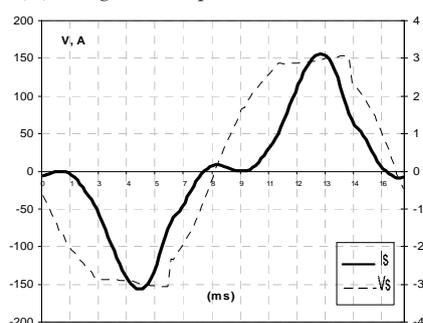
▪ **Comentário:** Esta topologia remete à operação do sistema sem nenhum dispositivo de filtragem, em um sistema com baixo nível de curto-circuito. Para isto, adotou-se um conjunto de cargas composto por uma carga não-linear e uma linear descrita no item 5.4.3 e 5.4.4, respectivamente, alimentadas através de uma fonte de tensão equilibrada e livre de distorções harmônicas, conectada ao sistema através de um transformador de acoplamento apresentado no item 5.4.8. Os resultados experimentais obtidos para a corrente de alimentação e tensão da carga total são ilustrados na figura 5.25. Estes resultados são tomados como referência para efeito comparativo da atuação do sistema de filtragem para os casos seguintes, destacando-se apenas as formas de onda e o espectro da corrente e tensão na fase A. Neste primeiro caso e para todos os casos seguintes, é retirada do gráfico a componente fundamental, visto que esta apresenta um alto valor e, deste modo, não se compromete a análise das demais componentes de valor substancialmente menor. Os resultados obtidos no experimento indicam uma distorção harmônica total da corrente de 35,66%, figura 5.25(c), onde nota-se que a 3ª harmônica apresenta a amplitude mais relevante. A distorção total de tensão medida é de 10,2%, figura 5.25(d), as harmônicas de 3ª e 5ª ordem apresentam-se como as mais notáveis, sendo as responsáveis por boa parte da distorção total.

## CASO 2

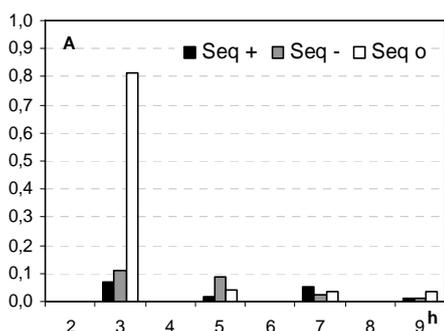
- **Objetivo:** analisar isoladamente o desempenho do filtro ressonante de 5ª harmônica, atuando em um sistema com baixo nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador ligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético desligado.



(a) Diagrama experimental do caso 2.

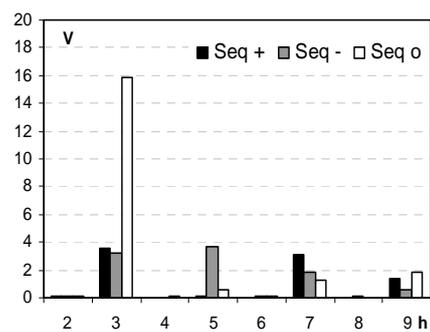


(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



DTI = 43,81%

(c) Espectro harmônico da corrente.



DTV = 9,4%

(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.26 – Caso 2 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

- **Comentário:** os resultados do caso 2, ilustrados na figura 5.26, foram obtidos considerando-se as mesmas condições operacionais do caso anterior, adicionando-se apenas o filtro ressonante de 300 Hz (5ª ordem), descrito no item 5.4.7. Por se tratar de um filtro sintonizado na 5ª ordem, a análise é direcionada especialmente para esta componente

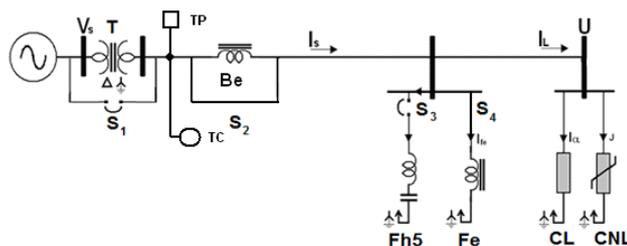
harmônica. Apesar de o dispositivo atenuar sensivelmente as distorções da 5ª harmônica, houve uma elevação da distorção harmônica média total da corrente, em relação ao caso anterior, passando de 35,66% para 43,81%. Esta elevação pode ser atribuída à amplificação notada na 3ª harmônica, provocada pela inserção do filtro ressonante de 5ª ordem. Estas alterações são atribuídas aos capacitores do filtro ressonante que, afetam de maneira geral o desempenho global do sistema. Para facilitar as análises comparativas, a tabela 5.11 apresenta os resultados para os casos 1 e 2.

Tabela 5.11 – Comparativo entre os casos 1 e 2.

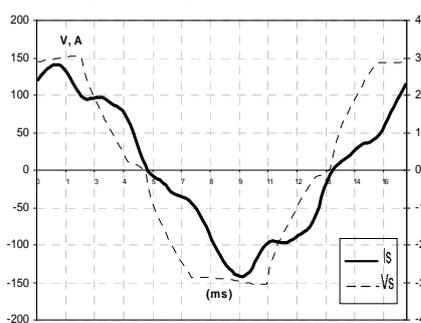
	Caso 1 - base	Caso 2: Fh <sub>5</sub>
<b>DTI (%)</b>	35,66	43,81
<b>DTV (%)</b>	10,2	9,4

### CASO 3

- **Objetivo:** analisar a atuação isolada do filtro eletromagnético, em uma rede elétrica com baixo nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador ligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h desligado e filtro eletromagnético ligado.



(a) Diagrama experimental do caso 3.



(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).

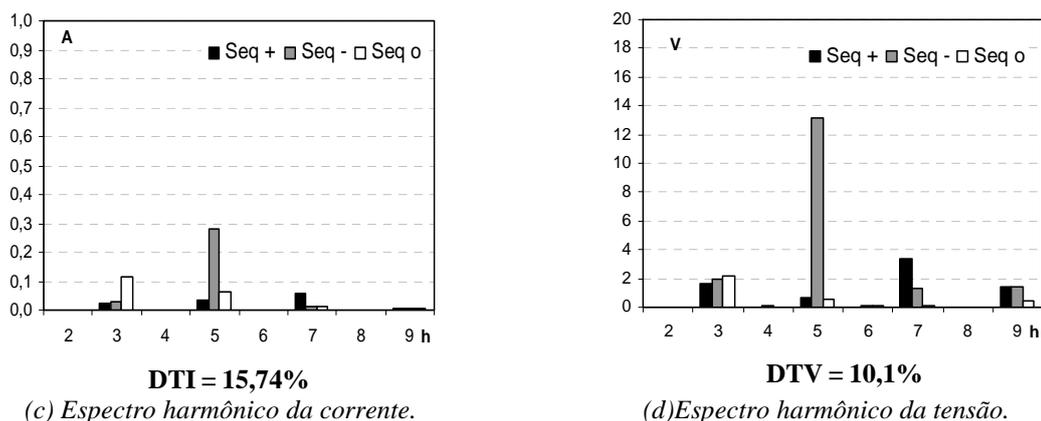


Figura 5.27 – Caso 3 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

▪ **Comentário:** os resultados ilustrados na figura 5.27 foram obtidos considerando-se as mesmas condições operacionais descritas no caso anterior, substituindo-se apenas o filtro ressonante por um filtro eletromagnético, descrito no item 5.4.5. A atenuação harmônica do filtro eletromagnético está diretamente ligada à redução das componentes triplas através de um caminho de baixa impedância. É constatada uma redução substancial para a 3ª harmônica, sendo esta a responsável pela redução distorção harmônica total da corrente. A 5ª harmônica foi sensivelmente amplificada se comparada ao caso anterior, pois a mesma não é afetada pela atuação do filtro eletromagnético. Neste caso, a relação favorável entre a impedância de sequência zero do sistema e do filtro eletromagnético faz com que a filtragem do dispositivo seja eficaz. A tabela 5.12 apresenta os resultados para os casos 1, 2 e 3.

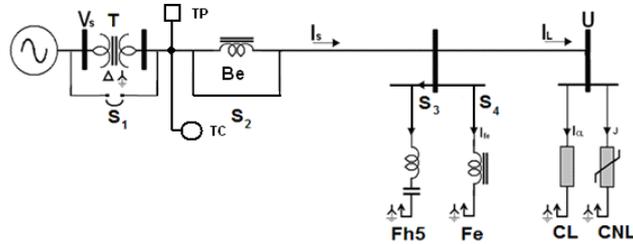
Tabela 5.12 – Comparativo entre os casos 1, 2 e 3.

	Caso 1 - base	Caso 2: Fh <sub>5</sub>	Caso 3: Fe
<b>DTI (%)</b>	35,66	43,81	15,74
<b>DTV (%)</b>	10,2	9,4	10,1

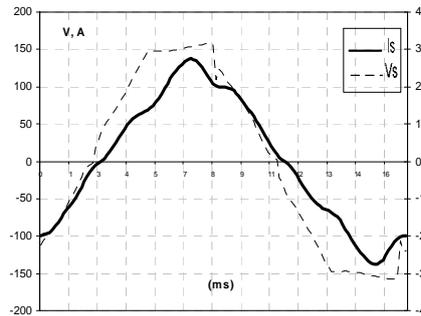
## CASO 4

▪ **Objetivo:** analisar o desempenho do sistema de filtragem composto pelo filtro eletromagnético e um filtro ressonante de 5ª ordem, em um sistema com baixo nível de curto-circuito.

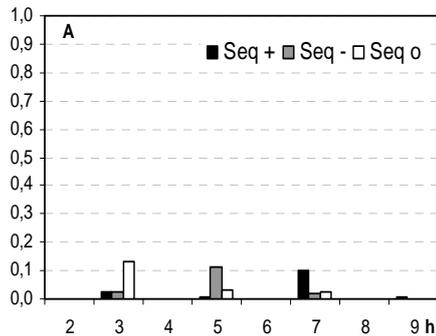
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador ligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético ligado.



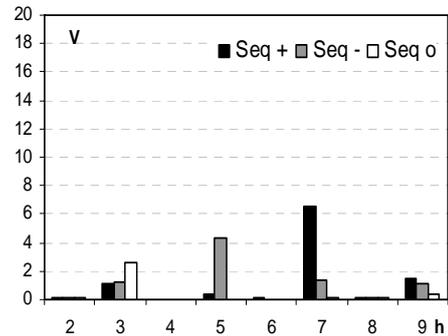
(a) Diagrama experimental do caso 4.



(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



(c) Espectro harmônico da corrente.



(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.28 – Caso 4 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

- **Comentário:** o caso 4 retrata uma condição operativa onde se procura destacar a atuação do filtro eletromagnético e do filtro ressonante em conjunto. Neste caso, percebe-se uma redução geral na distorção harmônica total de corrente e tensão se comparada aos casos anteriores. Observando-se o espectro da corrente, verifica-se que, para a 3ª harmônica houve uma redução discreta se comparada ao caso anterior e, para 5ª e 7ª harmônica a redução foi mais relevante. No entanto, ao observar o espectro de tensão, verifica-se que apesar da diminuição da distorção harmônica total, houve uma amplificação da harmônica de 7ª ordem, sendo esta a maior responsável pelas distorções residuais. De um modo geral, nestas condições

operacionais, é possível constatar a ação do sistema de filtragem, reduzindo as distorções totais de corrente e tensão. A tabela 5.13 apresenta os resultados para os casos 1, 2, 3 e 4.

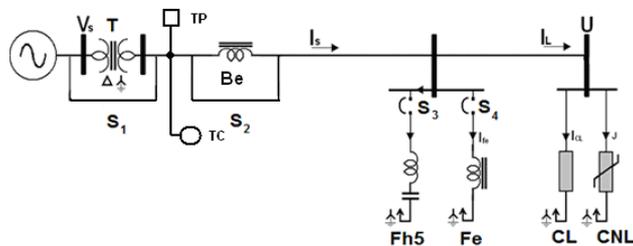
Tabela 5.13 – Comparativo entre os casos 1, 2, 3 e 4.

	Caso 1 - base	Caso 2: Fh <sub>5</sub>	Caso 3: Fe	Caso 4: Fh <sub>5</sub> e Fe
<b>DTI (%)</b>	35,66	43,81	15,74	10,27
<b>DTV(%)</b>	10,2	9,4	10,1	7,6

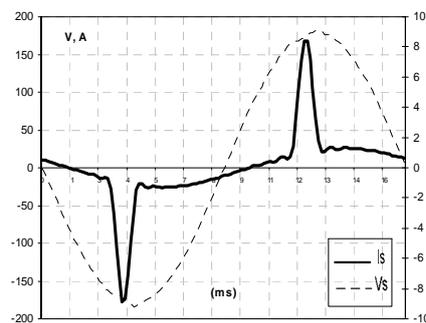
## CASO 5

▪ **Objetivo:** Observar o comportamento das harmônicas injetadas pelo conjunto de cargas em um sistema com alto nível de curto-circuito. Este é o caso base utilizado para análises comparativas entre os casos 6, 7, 8 e 9.

▪ **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h desligado e filtro eletromagnético desligado.



(a) Diagrama experimental do caso 5.



(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).

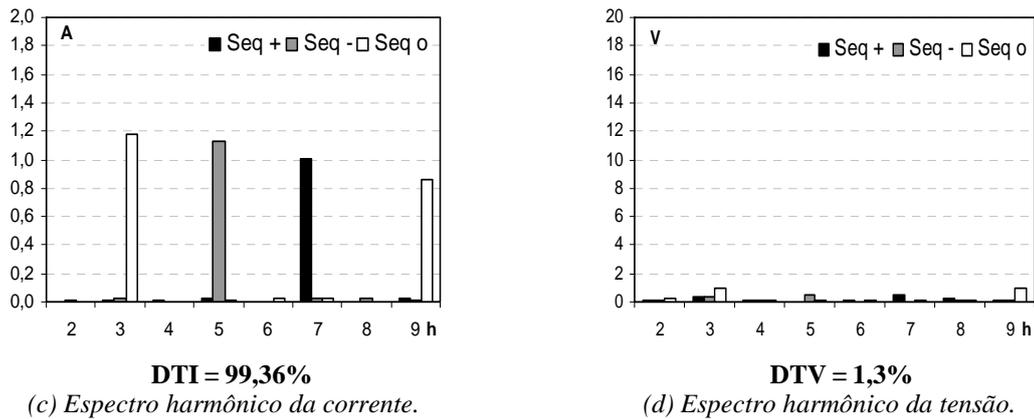
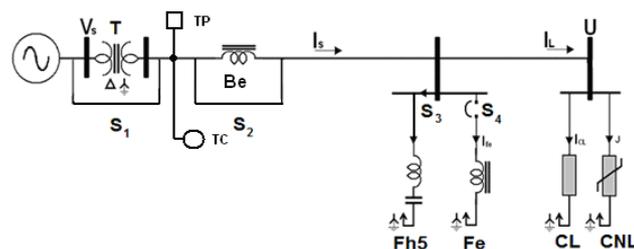


Figura 5.29 – Caso 5 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

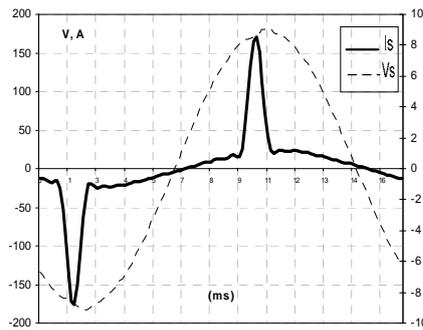
▪ **Comentário:** A topologia do caso 5 remete à operação do sistema sem nenhum dispositivo de filtragem, similar ao caso 1, mas, agora, em um sistema com alto nível de curto-circuito, sem a presença do transformador de acoplamento. Os resultados experimentais obtidos para a corrente de alimentação e tensão da carga total são ilustrados na figura 5.29. Verifica-se que, com a saída de operação do transformador de acoplamento, houve um aumento sistemático da distorção harmônica total de corrente, figura 5.29(c). Em contra partida, a redução na distorção total de tensão foi drástica, figura 5.29(d). Estes resultados são tomados como referência para efeito comparativo da atuação do sistema de filtragem dos casos seguintes, destacando-se as formas de onda e o espectro da corrente e tensão na fase A.

## CASO 6

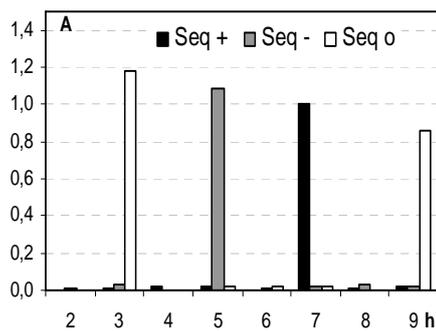
- **Objetivo:** Analisar o desempenho do filtro ressonante de 5ª ordem em um sistema com alto nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético desligado.



(a) Diagrama experimental do caso 6.

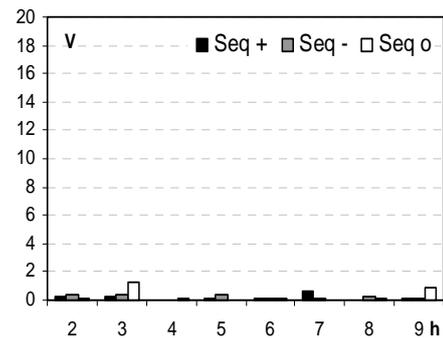


(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



DTI = 100,52%

(c) Espectro harmônico da corrente.



DTV = 1,1%

(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.30 – Caso 6 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

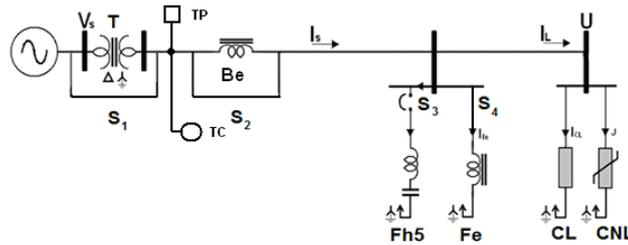
▪ **Comentário:** o caso 6 refere-se a condições operacionais similares às descritas no caso 2, no entanto, desconsiderando-se o uso do transformador de acoplamento. Nestas condições, alimentando-se o sistema composto pela carga total e pelo filtro ressonante diretamente através da fonte de alimentação, os resultados obtidos mostram que a distorção harmônica total de corrente aumenta sistematicamente, ficando evidente a ineficácia do filtro ressonante sintonizado na drenagem das correntes harmônicas de 5ª ordem. Esta causa pode ser atribuída à retirada do transformado de acoplamento e que ocasiona a relação desfavorável entre as impedâncias do sistema e do filtro. Para viabilizar as análises comparativas, a tabela 5.14 apresenta os resultados dos casos 5 e 6

Tabela 5.14 – Comparativo entre os casos 5 e 6.

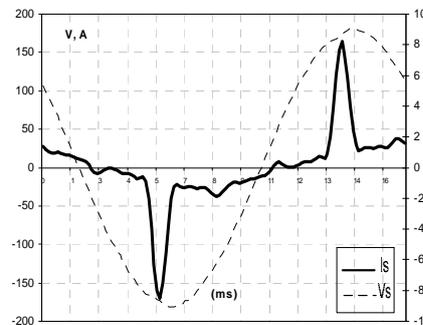
	Caso 5 - base	Caso 6: Fh <sub>5</sub>
DTI (%)	99,33	100,52
DTV(%)	1,3	1,1

### CASO 7

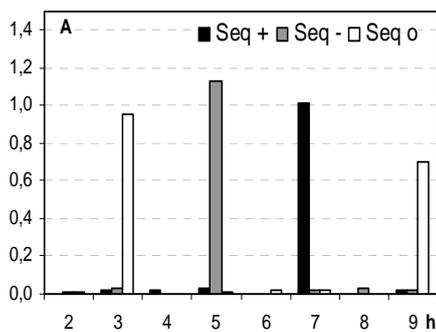
- **Objetivo:** Verificar o comportamento isolado do filtro eletromagnético, em uma rede com alto nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h desligado e filtro eletromagnético ligado.



(a) Diagrama experimental do caso 7.

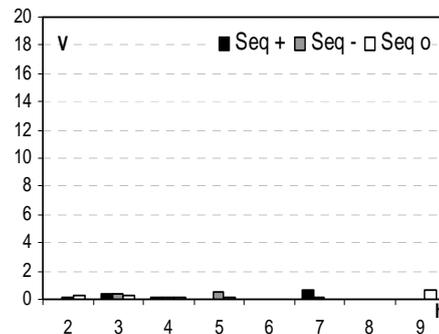


(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



**DTI = 91,37%**

(c) Espectro harmônico da corrente.



**DTV = 0,8%**

(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.31 – Caso 7 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

- **Comentário:** os resultados ilustrados na figura 5.31 foram obtidos considerando-se as mesmas condições operacionais do sistema de filtragem paralelo descritas no caso anterior (caso 6), substituindo-se apenas o filtro ressonante de 300Hz (5ª ordem) por um filtro eletromagnético. Neste caso, a retirada do transformador de acoplamento ocasiona uma relação desfavorável entre a impedância de sequência zero do sistema e do filtro

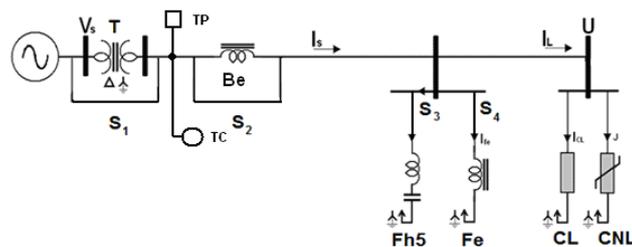
eletromagnético. Em decorrência deste fato, nota-se que a drenagem das componentes triplas é afetada, apresentando uma redução muito inferior à esperada. Pode-se verificar ainda, uma contribuição expressiva da componente harmônica de 5ª e 7ª ordem na distorção harmônica total. Vale lembrar que, as componentes de sequência positiva e negativa não são afetadas pela atuação do dispositivo eletromagnético. A tabela 5.15 apresenta os resultados dos casos 5 e 6.

Tabela 5.15 – Comparativo entre os casos 5, 6 e 7.

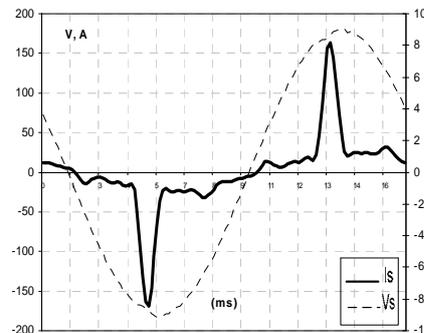
	Caso 5 - base	Caso 6: Fh <sub>5</sub>	Caso 7: Fh <sub>5</sub> e Fe
<b>DTI (%)</b>	99,33	100,52	91,37
<b>DTV(%)</b>	1,3	1,1	0,8

## CASO 8

- **Objetivo:** Verificar o comportamento do sistema de filtragem composto pelo filtro eletromagnético e um filtro ressonante de 5ª ordem, em uma rede com alto nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético ligado.



(a) Diagrama experimental do caso 8.



(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).

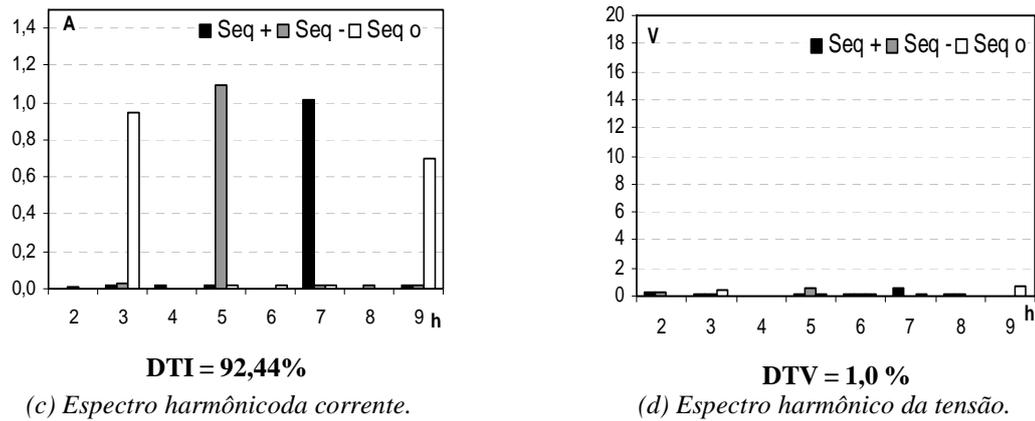


Figura 5.32 – Caso 8 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

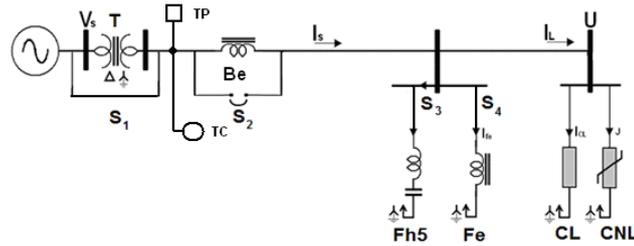
▪ **Comentário:** Neste caso, apesar da inclusão do filtro ressonante de 5<sup>a</sup> harmônica, percebe-se um pequeno aumento na distorção harmônica total de corrente. Assim como para os casos 6 e 7, com a retirada do transformador de acoplamento a atuação dos dispositivos de filtragem fica comprometida. Como se sabe, com o uso do filtro eletromagnético e do filtro ressonante, é desejável que suas respectivas impedâncias sequenciais sejam muito menores, se comparadas às impedâncias de mesma sequência apresentada pelo sistema alimentador. A tabela 5.16 apresenta os resultados dos casos 5, 6, 7 e 8.

Tabela 5.16 – Comparativo entre os casos 5, 6, 7 e 8.

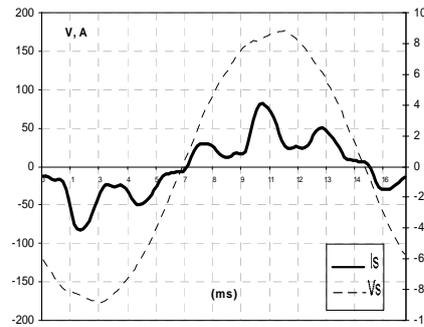
	Caso 5 - base	Caso 6: Fh <sub>5</sub>	Caso 7: Fe	Caso 8: Fh <sub>5</sub> e Fe
<b>DTI (%)</b>	99,33	100,52	91,37	92,44
<b>DTV(%)</b>	1,3	1,1	0,8	1,0

## CASO 9

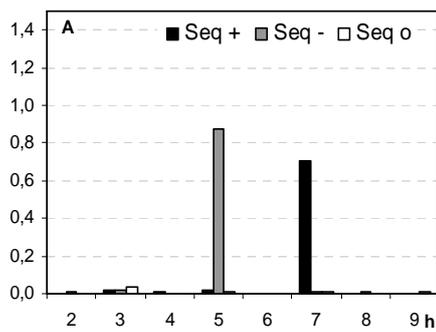
- **Objetivo:** Verificar o comportamento do sistema de filtragem, composto pelo supressor eletromagnético (filtro e bloqueador) e um filtro ressonante de 5<sup>a</sup> ordem, em uma rede com alto nível de curto-circuito.
- **Características do sistema:** Alimentação senoidal equilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético ligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético ligado.



(a) Diagrama experimental do caso 9.

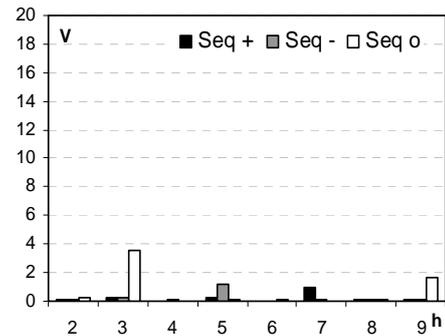


(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



DTI = 49,35%

(c) Espectro harmônico da corrente.



DTV = 2,3%

(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.33 – Caso 9 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

▪ **Comentário:** É inequívoca a atuação do supressor eletromagnético frente às componentes harmônicas de sequência zero. Isto se deve à inclusão do bloqueador eletromagnético, descrito no item 5.4.6, que compatibiliza a impedância de sequência zero do filtro eletromagnético com o nível de curto-circuito no PAC. Neste caso, a impedância de sequência zero no PAC aumenta, favorecendo o fluxo da corrente de sequência zero pelo o filtro eletromagnético. É notado ainda, uma forte concentração das contribuições harmônicas de sequência negativa e positiva, 5ª e 7ª ordem, respectivamente. Estas correntes não são afetadas pela inserção do bloqueador, uma vez que o mesmo não melhora a impedância de sequência negativa e positiva do sistema. A tabela 5.17 apresenta os resultados dos casos 5, 6, 7, 8 e 9.

Tabela 5.17 – Comparativo entre os casos 5, 6, 7, 8 e 9.

	Caso 5 - base	Caso 6: Fh <sub>5</sub>	Caso 7: Fe	Caso 8: Fh <sub>5</sub> e Fe	Caso 9: Fh <sub>5</sub> , Fe e Be
<b>DTI (%)</b>	99,33	100,52	91,37	92,44	49,35
<b>DTV(%)</b>	1,3	1,1	0,8	1,0	2,3

### CASO 10

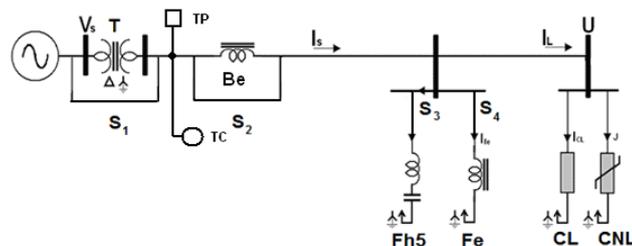
▪ **Objetivo:** Analisar o desempenho do filtro eletromagnético e do filtro ressonante de 5ª ordem, em uma rede com alto nível de curto-circuito, com desequilíbrios e distorções harmônicas na tensão de alimentação.

A tabela 5.18 apresenta os níveis de desequilíbrios e distorção impostos para os ensaios dos casos 10 e 11.

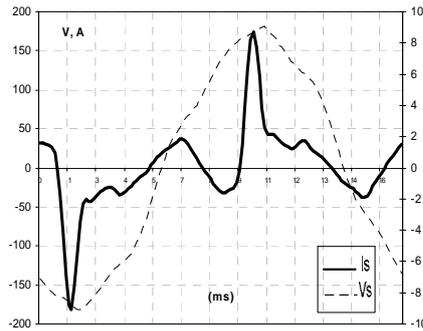
Tabela 5.18 – Tensões desequilibradas e com distorções para os casos 10 e 11.

h	V <sub>+</sub>	φ <sub>+</sub> <sup>o</sup>	V <sub>-</sub>	φ <sub>-</sub> <sup>o</sup>	V <sub>0</sub>	φ <sub>0</sub> <sup>o</sup>
1	181,1	-124,3	5,7	92,8	5,1	-1,9
3	0,2	-37,3	0,3	-119,9	0,3	150,9
5	0,3	-54,0	0,1	2,9	4,8	71,8
7	0,3	-66,1	8,4	147,6	0,1	-11,5
9	5,5	-82,4	1,0	12,9	0,8	13,4

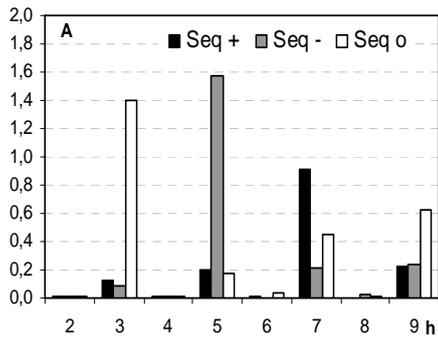
▪ **Características do sistema:** Alimentação não-senoidal desequilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético desligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético ligado.



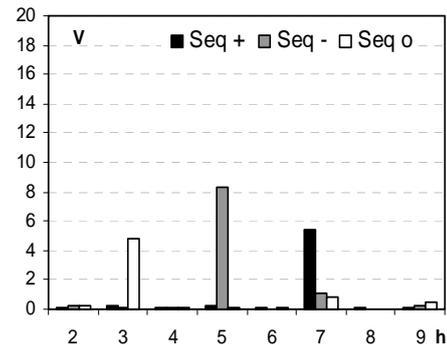
(a) Diagrama experimental do caso 10.



(b) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).

**DTI = 145,8%**

(c) Espectro harmônico da corrente.

**DTV = 6,3%**

(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.34 – Caso 10 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

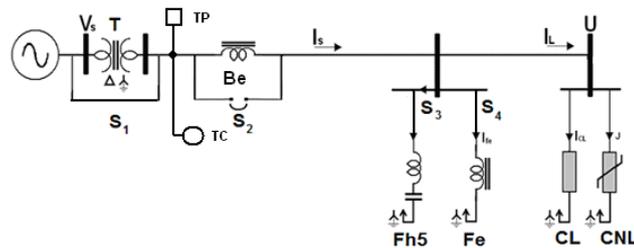
▪ **Comentário:** para o caso 10, ilustrado na figura 5.34, considera-se a mesma topologia do sistema de filtragem descrito no caso 8. Porém, retrata uma condição de operação onde há desequilíbrios e distorções harmônicas acentuadas na tensão de alimentação. O propósito dessa condição operacional é realizar uma avaliação dos impactos sobre o desempenho da filtragem. Os resultados demonstram a ineficácia do sistema de filtragem, aumentando a distorção de corrente de 49,35% (caso 9) para 145,8%, representando, portanto, um aumento de aproximadamente 95%. Como a tensão de alimentação possui distorções harmônicas individuais de 3ª e 5ª ordens, estas também são atraídas pelos respectivos filtros, aumentando assim, a distorção total da corrente de alimentação. E também um aumento na distorção total de tensão de 2,3% para 6,3%. Este fato demonstra que desequilíbrios e distorções na tensão de alimentação influenciam na atuação do sistema de filtragem harmônica. Para efeito comparativo entre os sistemas de mesma topologia e diferentes condições operacionais, a tabela 5.19 apresenta os resultados dos casos 8 e 10.

Tabela 5.19 – Comparativo entre os casos 8 e 10.

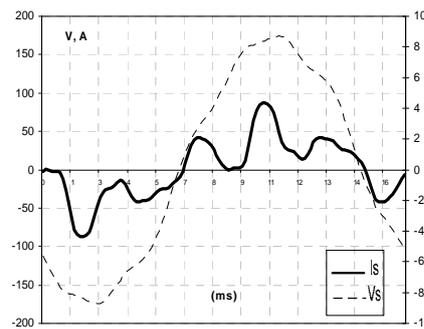
	Caso 8 - base	Caso 10: Fh <sub>5</sub>
<b>DTI (%)</b>	92,44	145,8
<b>DTV (%)</b>	1,0	6,3

## CASO 11

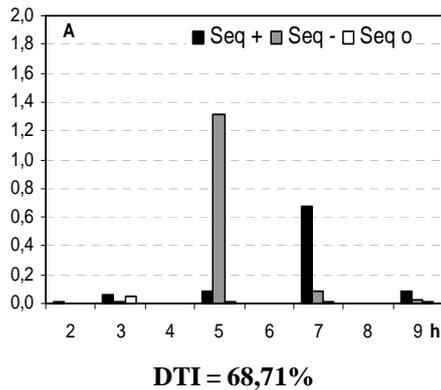
- **Objetivo:** Analisar o desempenho do sistema de filtragem, composto pelo supressor eletromagnético e um filtro ressonante de 5ª ordem, em um sistema elétrico com alto nível de curto-circuito, com desequilíbrios e distorções harmônicas na tensão de alimentação, objetivando avaliar as possíveis causas da degradação do sistema de filtragem.
- **Características do sistema:** Alimentação não-senoidal desequilibrada, transformador desligado, bloqueador eletromagnético ligado, filtro ressonante 5h ligado e filtro eletromagnético ligado.



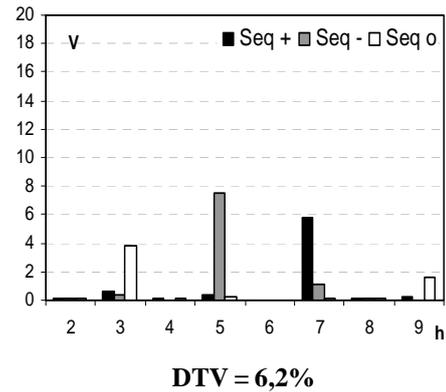
(a) Diagrama experimental do caso 11.



(a) Resultados experimentais de corrente e tensão (fase A).



(c) Espectro harmônico da corrente.



(d) Espectro harmônico da tensão.

Figura 5.35 – Caso 11 – Resultados para as componentes sequenciais das correntes e tensões no PAC.

▪ **Comentário:** Assim como no caso 10, para o caso 11, ilustrado na figura 5.35, foram considerados desequilíbrios e distorções harmônicas acentuadas na tensão de alimentação. Pela análise dos espectros, com a entrada do bloqueador eletromagnético, constata-se uma redução na distorção harmônica total de aproximadamente 77%. Observa-se que o filtro eletromagnético desviou quase toda corrente harmônica de 3ª ordem presente na carga e 100% da 9ª ordem harmônica. Este fato se deve particularmente ao efeito de adequação da impedância de sequência zero e ainda ao bloqueio da excitação de sequência zero proporcionadas pela presença do bloqueador eletromagnético. O filtro ressonante absorve uma pequena parte da distorção de 5ª harmônica. A 7ª harmônica permanece ainda com um alto nível de distorção. Embora tenham sido impostas distorções na tensão de alimentação, seu efeito foi substancialmente reduzido pela operação do bloqueador eletromagnético. É importante ressaltar que a presença do bloqueador afeta de forma contundente o desempenho do filtro eletromagnético, pois apenas a impedância de sequência zero foi aumentada. Como o filtro ressonante absorve corrente predominantemente em sequência negativa, seu desempenho não foi significativamente afetado. Para viabilizar a comparações entre os sistemas de diferentes topologias e mesma condição operacional, a tabela 5.20 apresenta os resultados dos casos 10 e 11.

Tabela 5.20 – Comparativo entre os casos 10 e 11.

	Caso 10: Fh5, Fe	Caso 11: Fh5, Fe e Be
<b>DTI (%)</b>	145,8	68,71
<b>DTV(%)</b>	6,3	6,2

## 5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações e constatações apresentadas no decorrer deste capítulo foram direcionadas para a validação dos modelos matemáticos propostos nos capítulos anteriores, tomando como referência o teste de aderência entre resultados experimentais e simulações digitais no domínio da frequência.

A combinação de um bloqueador eletromagnético e de um filtro eletromagnético é proposta neste trabalho com a finalidade de minimizar o fluxo de harmônicas de sequência zero em um sistema de distribuição a quatro fios.

Sob o ponto de vista do teste de aderência, foram investigadas situações operacionais, incluindo variações na topologia do sistema de filtragem, entre as quais foram selecionados dois casos. Para a seleção dos casos, consideraram-se como premissas reunir aqueles que oferecem subsídios claros na ilustração das principais características operacionais da filtragem harmônica abordadas neste trabalho. A validação do modelo proposto foi realizada a partir da comparação entre as formas de onda das correntes de alimentação e das diferentes componentes harmônicas individuais, considerando-se suas amplitudes e respectivas distribuições sequenciais.

As análises apresentadas comprovam a boa correlação entre resultados medidos e calculados através do modelo matemático, destacando-se particularmente os aspectos relacionados à sua funcionalidade como bloqueador de componentes harmônicas de sequência zero. A coerência entre os resultados teóricos e experimentais demonstram a validade das simplificações adotadas durante o desenvolvimento do modelo as quais apontaram diretrizes para o projeto e dimensionamento de bloqueadores eletromagnéticos.

Sob o ponto de vista experimental, foram investigadas diversas situações, incluindo diferentes topologias e condições de alimentação. Como critérios de seleção foram escolhidos os casos que ilustram mais claramente as principais características operacionais da filtragem harmônica abordada nesta dissertação.

Pretendendo compatibilizar o nível de curto-circuito do sistema de alimentação com os protótipos construídos, a fonte de suprimento foi conectada ao restante do sistema através de um transformador de acoplamento. Nestas condições, os ensaios mostraram o bom desempenho do filtro eletromagnético e do filtro ressonante.

A retirada do transformador de acoplamento aumentou significativamente as distorções harmônicas totais de corrente, porém, com a inclusão do bloqueador eletromagnético no sistema de filtragem este dano foi reduzido. Para os casos onde desequilíbrios e distorções

harmônicas foram impostas, foi constatada a máxima atuação do bloqueador eletromagnético, que além de compatibilizar a impedância de sequência zero do filtro eletromagnético com o nível de curto circuito no PAC, bloqueou as excitações de sequência zero provenientes do desequilíbrio e das distorções harmônicas advindas da fonte. O mesmo não acontece para o filtro ressonante, pois a operação bloqueador eletromagnético não afeta a impedância de sequência negativa e positiva do sistema.

O uso do arranjo composto pelo supressor eletromagnético e pelo filtro ressonante gerou bons resultados que, motivaram estudos mais detalhados abrangendo a influência das assimetrias do sistema alimentador sobre diferentes topologias de filtragem. De um modo geral, foi possível concluir que para o sistema investigado nestes estudos experimentais, a sensibilidade dos dispositivos de filtragem frente às distorções harmônicas presentes na rede de alimentação é muito elevada.

## CAPÍTULO VI

---

### OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM HARMÔNICA

#### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os pontos fortes dos modelos matemáticos apresentados nos capítulos anteriores, incorporados a um aplicativo computacional, utilizado como uma ferramenta de análise de desempenho e otimização de sistemas de filtragem passivos.

Buscando uma forma de garantir a consistência de resultados, são apresentados comparativamente alguns valores obtidos a partir de um aplicativo de simulações de grande aceitação no meio científico, tomando-se como fundamento um sistema-teste.

Para finalizar, os resultados simulados a partir do aplicativo computacional são analisados, considerando-se diferentes topologias e condições operacionais.

#### 6.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

Com o objetivo de acompanhar a consistência dos resultados e estabelecer uma base comparativa para destacar os pontos fortes do modelo proposto e do aplicativo computacional, utilizou-se simultaneamente um aplicativo comercial com confiabilidade comprovada e de grande aceitação no meio científico e tecnológico, o *Matlab/Simulink*®. Apresentam-se nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3 o arranjo implementado em ambiente *Simulink*, o qual foi utilizado nas simulações no domínio do tempo. Alguns resultados obtidos a partir dos dois métodos analíticos, domínio do tempo e domínio da frequência, são apresentados na figura 6.4.

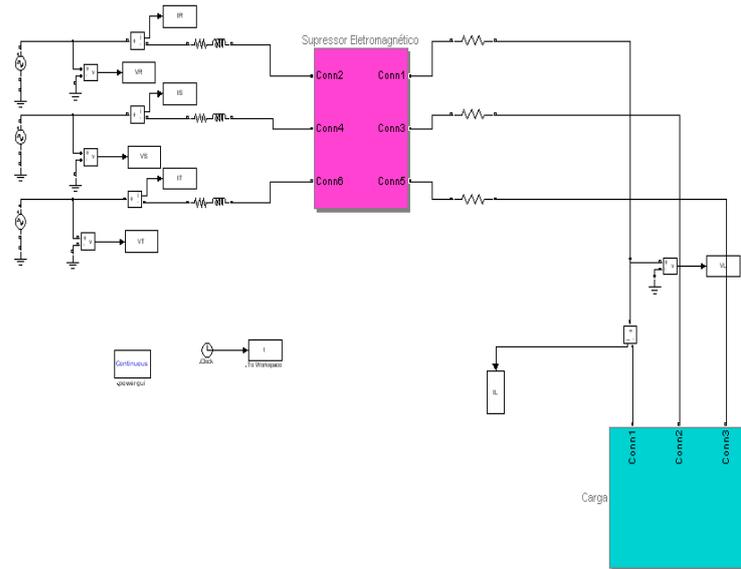


Figura 6.1 – Diagrama de simulação simplificado em ambiente Matlab/Simulink®.

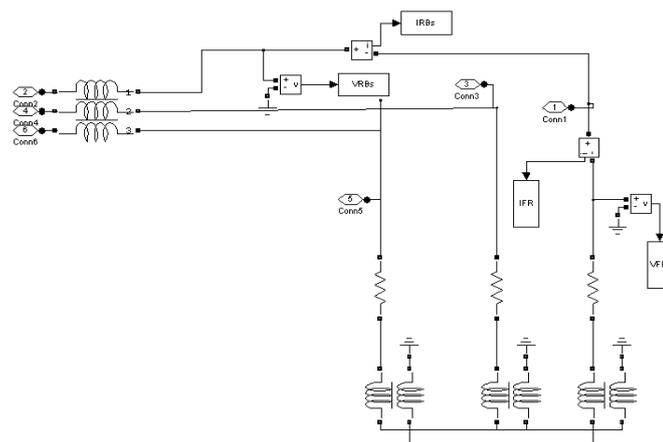


Figura 6.2 – Supressor Eletromagnético de Sequência Zero em ambiente Matlab/Simulink®.

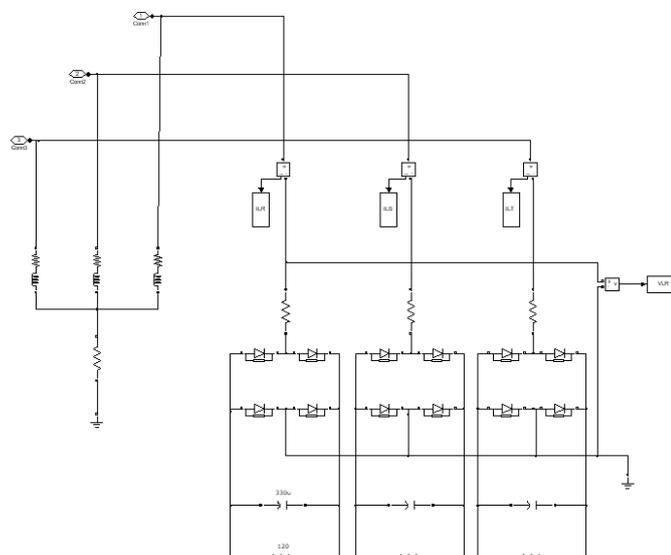
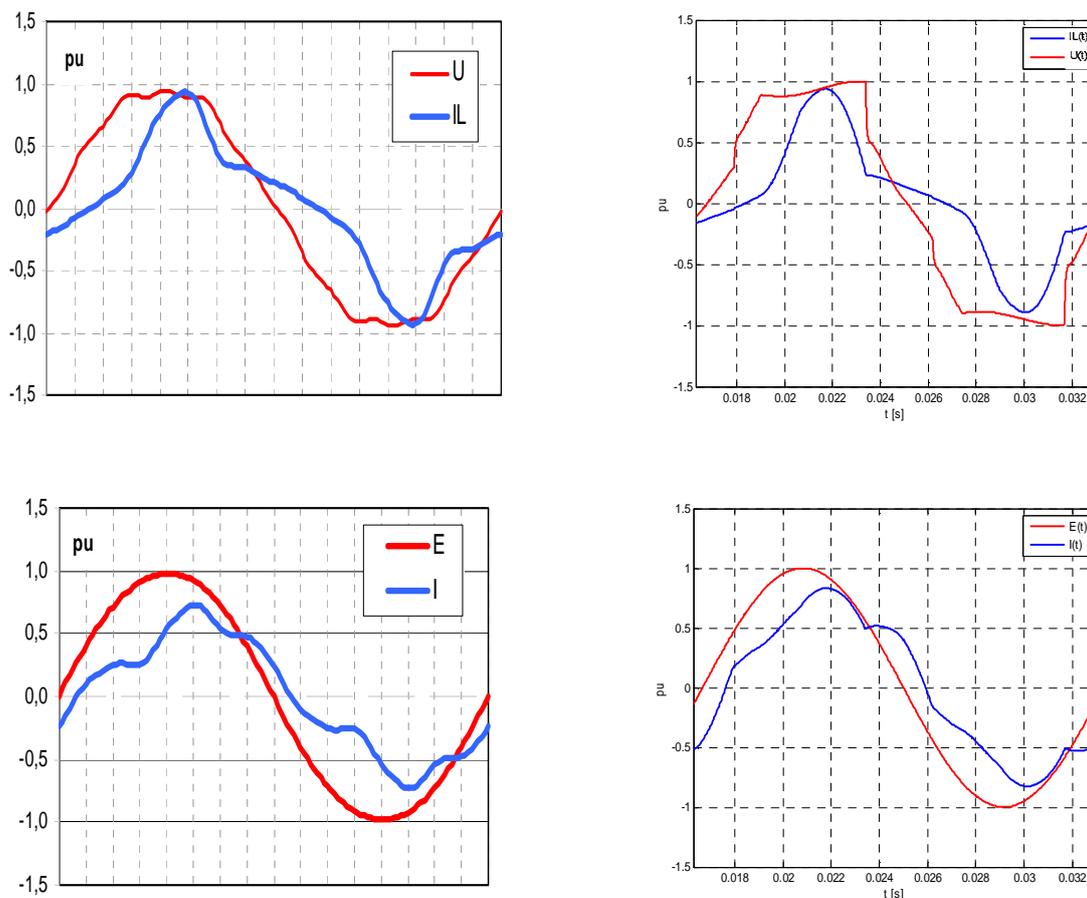


Figura 6.3 – Carga linear e carga não-linear.



(a) Modelo no Domínio da Frequência.

(b) MatLab/Simulink®.

Figura 6.4 – Correntes e tensões da carga e do sistema de alimentação.

Foi constatada uma boa correlação entre os resultados colhidos através do *Simulink* e pelo método proposto neste trabalho. Desta forma, para as análises subsequentes, serão apresentados apenas os resultados obtidos pelo método das transmitâncias, que, por se tratar de uma análise no domínio da frequência, favorece uma investigação rápida, sistemática e elucidativa da ação da filtragem. Conforme citado anteriormente, o grande diferencial do modelo analítico no domínio da frequência proposto neste trabalho com relação aos simuladores no domínio do tempo reside na riqueza de informações disponibilizadas. O aplicativo implementado está fundamentado na análise do comportamento das transmitâncias sequenciais para as diferentes ordens harmônicas e permite não somente visualizar as formas de onda sob diferentes condições operacionais, mas, sobretudo, o faz de forma interativa, favorecendo a investigação rápida e sistemática da influência dos diferentes parâmetros elétricos no desempenho da filtragem (RAVAGNANI, 2008).

### 6.3 OTIMIZAÇÃO DA FILTRAGEM

Uma vez comprovada uma aderência satisfatória entre os resultados obtidos no item anterior deste trabalho, propõe-se agora a realização de simulações digitais que tem como premissa destacar o desempenho do supressor eletromagnético de sequência zero.

Considerou-se a configuração do sistema ilustrado na figura 6.5. Os dados do sistema são apresentados na tabelas 6.1, 6.2 e 6.3. De acordo com o modelo estabelecido no Capítulo IV as fontes de distorções harmônicas são representadas por fontes de correntes. As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam as correntes harmônicas da carga não-linear e a tensão de alimentação, respectivamente. A figura 6.6 mostra as respectivas formas de onda da tensão de alimentação no PAC (barra C) e da corrente total composta pelas cargas linear e não-linear na barra D.

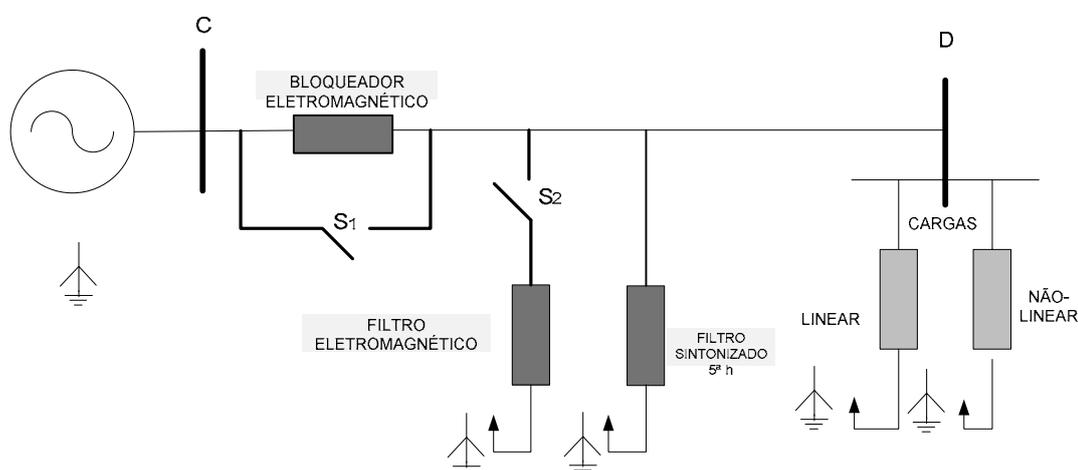


Figura 6.5 – Arranjo Unifilar.

Tabela 6.1 – Dados do sistema e da carga não-linear.

Tensão de alimentação (V)	220
Frequência (Hz)	60
Relação X/R a 60 Hz	1,72
$S_{cc} / P_{carga}$	75
Potência da carga linear (kVA)	0,4
Fator de potência da carga linear	0,83
Nível de compensação do fator de deslocamento (%)	70

Tabela 6.2 – Dados do filtro eletromagnético.

Indutância própria das bobinas (mH)	270
Relação X/R das bobinas	445
Fator de acoplamento entre bobinas de uma mesma coluna	0,99
Fator de acoplamento entre bobinas de colunas distintas	0,7

Tabela 6.3 – Dados do bloqueador eletromagnético.

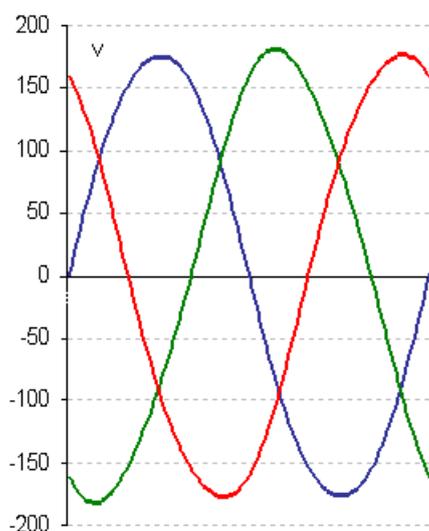
Indutância Própria (mH)	7
Fator de Acoplamento entre as bobinas	0,9999

Tabela 6.4 – Correntes da carga não-linear.

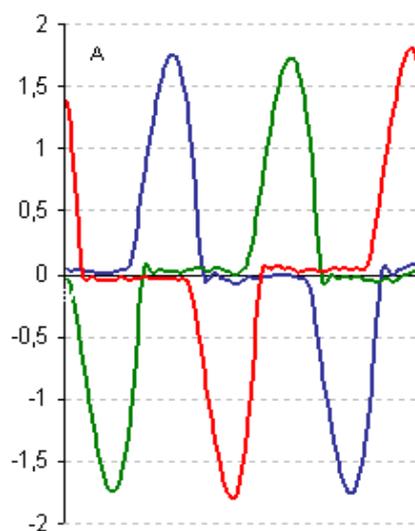
h	Ja (A)	Ja	Jb(A)	Jb(A)	Jc(A)	Jc
1	0,230	-10,41	0,230	-130,1	0,227	110,35
3	0,170	140,85	0,167	141,2	0,168	141,55
5	0,077	-71,93	0,079	51,5	0,086	167,68
7	0,019	40,56	0,019	-92,9	0,024	165,75
9	0,019	102,71	0,020	102,3	0,018	110,82
11	0,014	-135,24	0,010	-27,4	0,012	117,77
13	0,007	-94,47	0,008	167,6	0,005	72,44
15	0,008	17,58	0,009	18,0	0,008	30,91
17	0,004	146,81	0,004	-118,2	0,003	20,71
19	0,004	-174,90	0,005	77,5	0,003	-16,31
21	0,003	-61,62	0,004	-64,2	0,003	-42,96
23	0,000	-45,00	0,002	155,9	0,003	-81,82
25	0,000	-57,45	0,003	-25,5	0,003	-99,59
<b>DTI</b>	83%		82%		84%	

Tabela 6.5 – Tensão de alimentação.

h	Ea%	Ea	Eb%	Eb	Ec%	Ec
1	179,6	0,0	179,6	-120,0	179,6	120,0
3	0,02	21,79	0,03	-105,2	0,03	50,04
5	0,02	55,63	0,03	-146,9	0,01	-22,12
<b>DTT</b>	3%		4%		3%	



(a) Tensão de alimentação.



(b) Corrente da carga não-linear.

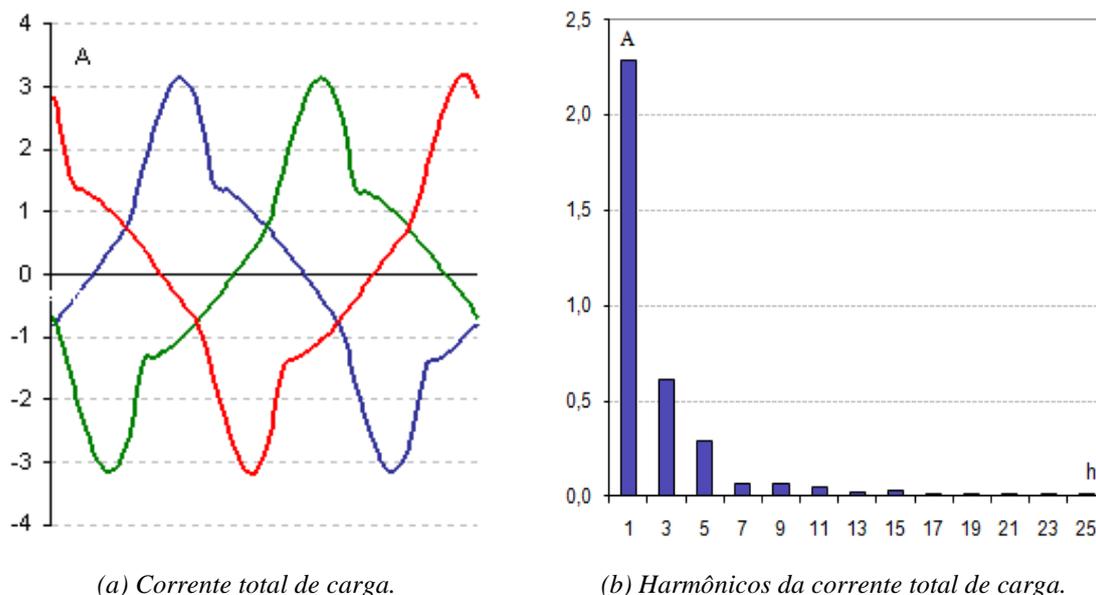


Figura 6.6 – Tensões de alimentação e correntes de carga.

Os valores eficazes totais das correntes de carga, bem como as respectivas distorções harmônicas totais e fatores de potência, são apresentados na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Correntes totais de carga.

	$I_a$	$I_b$	$I_c$
RMS (A)	1,630	1,627	1,624
DTI (%)	32%	31%	32%
FP	0,87	0,87	0,87

O foco deste trabalho é a busca de um desempenho otimizado para um sistema de filtragem harmônica baseada apenas em dispositivos eletromagnéticos. Esta busca está relacionada com a operação conjunta do bloqueador e do filtro eletromagnético de sequência zero (OLIVEIRA, 2010a). Objetivando ilustrar as potencialidades da metodologia adotada para avaliação do sistema de filtragem, considerou-se três situações operacionais.

#### **Caso 1: Chave S1 fechada e S2 aberta.**

Esta topologia remete à operação do sistema sem o filtro e sem o bloqueador eletromagnético, figura 6.7.

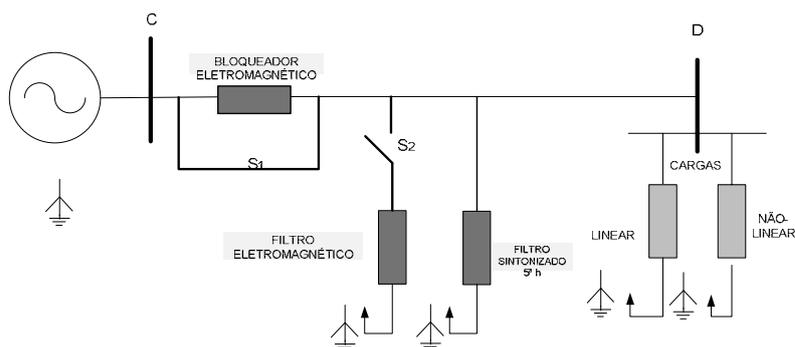
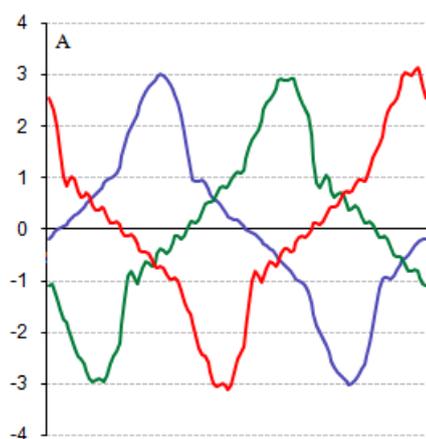
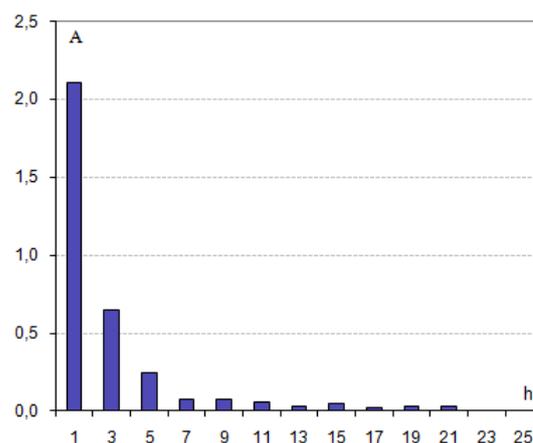


Figura 6.7 – Topologia do sistema para o caso 1.

A figura 6.8(a), ilustra as formas de onda das correntes de alimentação. Particularmente, para efeito comparativo da atuação do sistema de filtragem, destaca-se apenas o espectro harmônico da corrente na fase A que é ilustrado na figura 6.8(b).



(a) correntes de alimentação.



(b) espectro harmônico da corrente de alimentação.

Figura 6.8 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 1.

Na figura 6.9 apresenta-se o comportamento da transmitância  $A_h$  que reflete as contribuições das correntes harmônicas da carga sobre as correntes harmônicas de alimentação. Neste caso, a presença do banco de capacitores faz com que as componentes harmônicas geradas pela carga não-linear sejam sistematicamente amplificadas. Os fatores de amplificação são cada vez mais acentuados para ordens harmônicas mais altas, tendendo a uma ressonância paralela em torno da 25ª ordem harmônica.

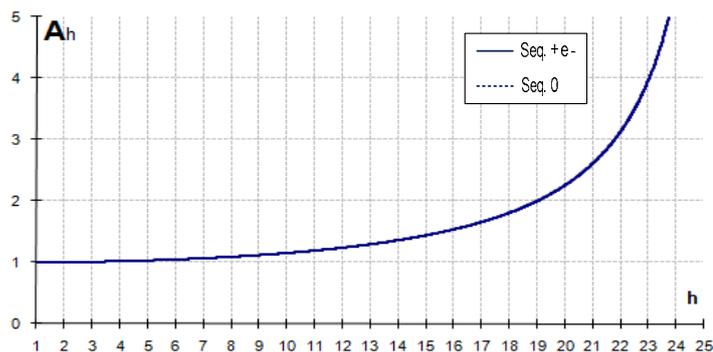


Figura 6.9 – Comportamento da transmitância  $A_h$  para o caso 1.

A diminuição da componente fundamental, motivada pelo aumento do fator de potência, associada às ampliações das demais componentes harmônicas, fazem com que as distorções harmônicas totais das correntes na fonte sejam ligeiramente superiores à da carga (tabela 6.7).

Tabela 6.7 – Correntes na fonte para o caso 1.

	$I_a$	$I_b$	$I_c$
RMS (A)	1,57	1,56	1,58
DTI (%)	34%	32%	36%
FP	0,92	0,93	0,92

### Caso 2: Chave S1 fechada e S2 fechada.

A topologia resultante desta configuração de chaves refere-se ao funcionamento do sistema na presença do filtro eletromagnético de sequência zero, figura 6.10.

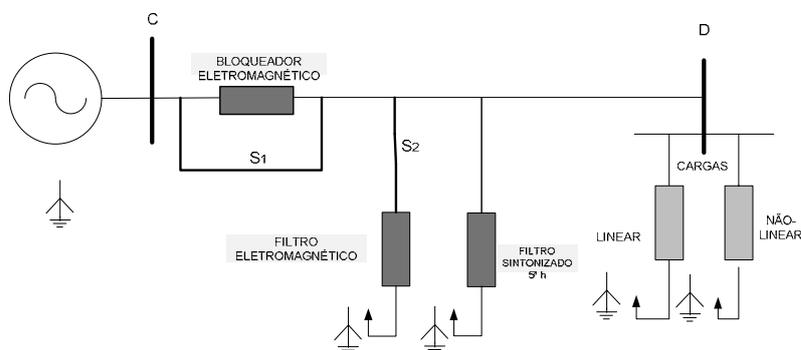


Figura 6.10 – Topologia do sistema para o caso 2.

A figura 6.11(a) ilustra as formas de onda das correntes de alimentação e a figura 6.11(b), ilustra o espectro harmônico da corrente na fase A.

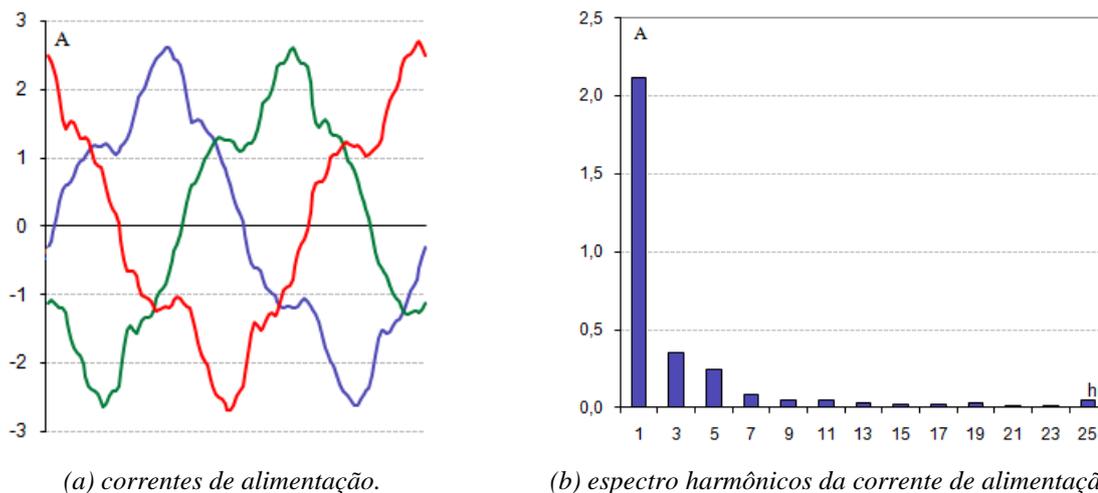


Figura 6.11 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 2.

O espectro harmônico visualizado na figura 6.11(b) mostra, de forma inequívoca, a atuação do filtro eletromagnético. Houve uma sensível redução nos níveis das harmônicas de sequência zero na corrente da fonte devido ao caminho de circulação alternativo destas correntes criado pelo filtro eletromagnético. Observa-se na figura 6.12 que com a inserção do filtro, a resposta em frequência da transmitância  $A_h$  para as componentes de sequência zero fica sensivelmente alterada com relação ao caso anterior. Nestas condições, as parcelas das componentes harmônicas em sequência zero são atenuadas proporcionalmente ao crescimento das ordens harmônicas, contribuindo para a diminuição da distorção harmônica total das correntes de alimentação.

Entretanto há de se reconhecer o desempenho pouco satisfatório deste filtro. Para a terceira harmônica, que apresenta a amplitude mais relevante, houve, em média, um desvio de cerca de 45% da corrente da carga pelo filtro. Tal fato decorre da relação pouco favorável entre as impedâncias de sequência zero do filtro e do sistema no PAC.

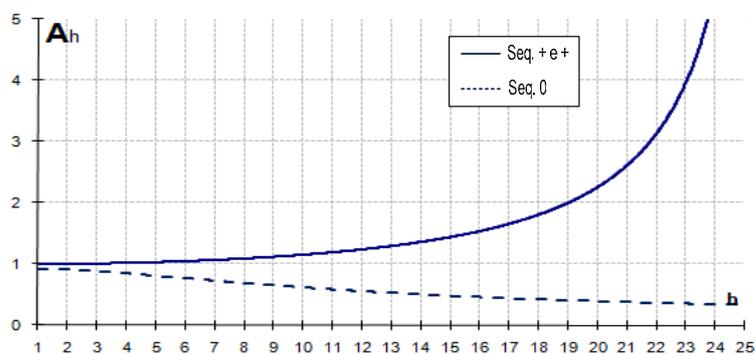


Figura 6.12 – Comportamento da transmitância  $A_h$  para o caso 2.

Mesmo nestas condições constata-se uma redução da distorção total da corrente de aproximadamente 30%, considerando-se a média entre as três fases o que também contribuiu para o aumento do fator de potência médio para 0,95 (tabela 6.8).

Tabela 6.8 – Correntes na fonte para o caso 2.

	$I_a$	$I_b$	$I_c$
RMS (A)	1,53	1,53	1,53
DTI (%)	21%	22%	23%
FP	0,96	0,95	0,95

### Caso 3: Chave S1 aberta e S2 fechada.

Para esta configuração das chaves a topologia resultante incorpora os dois dispositivos eletromagnéticos abordados neste trabalho, figura 6.13.

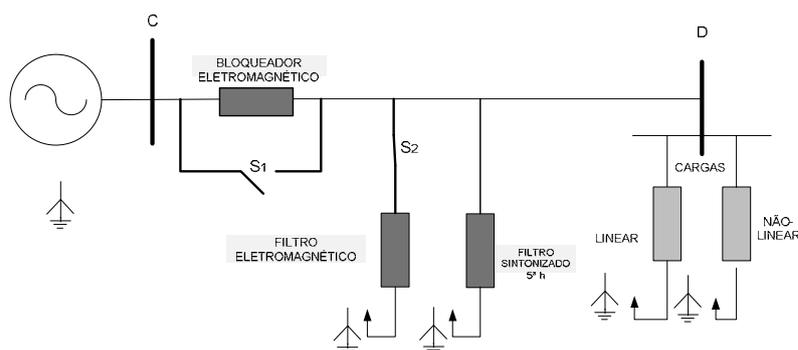
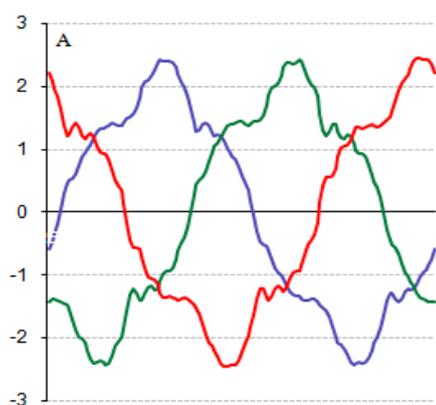
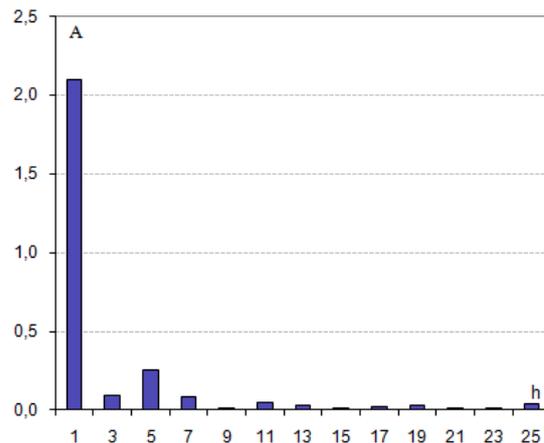


Figura 6.13 – Topologia do sistema para o caso 3.

Esta operação simultânea é denominada simplificada como supressor eletromagnético. A figura 6.14(a) ilustra as formas de onda das correntes de alimentação e a figura 6.14(b) ilustra o espectro harmônico da corrente na fase A.



(a) correntes de alimentação.



(b) espectro harmônicos da corrente de alimentação.

Figura 6.14 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente de alimentação para o caso 3.

A presença do bloqueador eletromagnético praticamente isola a carga dos efeitos das componentes harmônicas de sequência zero da tensão de alimentação. Para o caso analisado, esta contribuição é praticamente inexpressiva. A atuação mais relevante deste dispositivo é no sentido de aumentar a impedância de sequência zero do sistema no PAC, favorecendo, assim, a melhor atuação do filtro eletromagnético.

Os resultados apresentados na figura 6.14 mostram claramente uma drástica redução das componentes de sequência zero, notadamente a terceira harmônica. Tal fato decorre da melhoria da relação entre as impedâncias de sequência zero do sistema no PAC e do filtro eletromagnético, favorecendo o aumento da parcela de corrente de sequência zero desviada pelo mesmo.

Observa-se na figura 6.15, no comportamento das transmitâncias  $A_h$ , que as componentes harmônicas de sequência zero praticamente não se propagam para as correntes de alimentação.

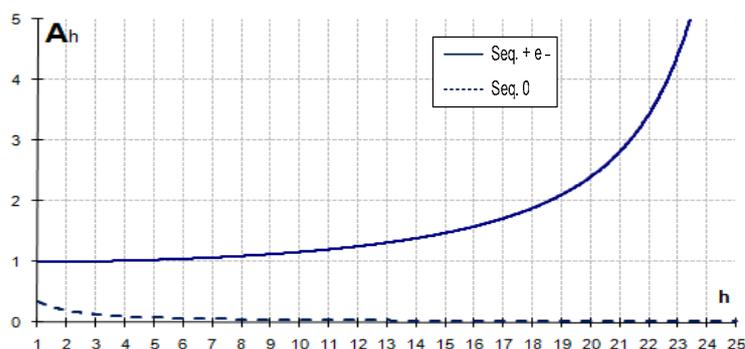


Figura 6.15 – Comportamento da transmitância  $A_h$  para o caso 3.

Com a atuação do supressor eletromagnético de sequência zero é possível comprovar o melhor desempenho do sistema de filtragem, como pode ser verificado através da tabela 6.9. A distorção total da corrente de alimentação situa-se em torno de 15,3% em média e o fator de potência final se mantém em patamares ainda superiores ao caso anterior.

*Tabela 6.9 – Correntes na fonte para caso 3.*

	$I_a$	$I_b$	$I_c$
RMS (A)	1,50	1,50	1,50
DTI (%)	14%	15%	16%
FP	0,97	0,96	0,96

Pode ser verificada, ainda, uma forte contribuição das componentes harmônicas de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens na distorção harmônica total. Naturalmente, tais correntes possuem uma distribuição sequencial com maior concentração nas sequências positivas e negativas e, portanto, não são afetadas pelos dispositivos eletromagnéticos. Este fato evidencia a necessidade de uma atenção especial para com estas componentes, sendo essencial a inclusão de filtros ressonantes sintonizados para maximização do desempenho global do sistema de filtragem passivo.

O presente trabalho teve como objetivo a abordagem apenas dos dispositivos eletromagnéticos, destacando suas potencialidades bem como os modelos analíticos para análise no domínio da frequência. Cabe destacar que a metodologia utilizada neste trabalho, envolvendo as transmitâncias harmônicas sequenciais, pode ser utilizada sem nenhuma limitação para otimização do processo de maximização da filtragem incluindo também os filtros sintonizados.

#### **6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo apresentou as potencialidades do aplicativo computacional que foi fundamentado nos modelos teóricos dos capítulos anteriores. A descrição proporcionada por este aplicativo possibilitou a investigação individualizada e sistemática do desempenho do sistema para as diferentes componentes sequenciais.

Neste sentido, foi possível reconhecer ações para a escolha apropriada das topologias e demais ajustes do sistema a partir de uma investigação minuciosa das contribuições individuais de cada fonte de distorção harmônica.

Os resultados relacionados à resposta em frequência das transmitâncias sequenciais facilitaram as análises individuais das influências mútuas entre distintas fontes de excitação harmônica. No caso explorado, por exemplo, concluiu-se que a opção pelo arranjo do supressor eletromagnético, sob determinados casos, melhorou significativamente o desempenho do sistema de filtragem.

No que diz respeito à avaliação da funcionalidade do supressor eletromagnético, os resultados obtidos mostram que na presença das harmônicas triplas, frequentemente concentradas em sequência zero, os bloqueadores e filtros eletromagnéticos afirmam-se mais uma vez como uma potente alternativa.

## CAPÍTULO VII

---

### CONCLUSÕES FINAIS

Diante do acelerado desenvolvimento da eletrônica de potência, o crescimento expressivo de cargas não-lineares nos sistemas de energia elétrica cresce também em proporções expressivas, sendo, portanto este um dos fatores relacionados a problemas ligados a distorções harmônicas nas tensões e correntes. Embora os prejuízos econômicos decorrentes desse acelerado desenvolvimento sejam intensos, ainda persiste o crescimento do uso de equipamentos com alta concentração de cargas não-lineares. Esta causa se justifica pelo fato de que os benefícios técnicos e econômicos ligados ao uso desta tecnologia são muito mais claros do que os efeitos nocivos causados pelas harmônicas geradas durante sua operação.

Com vistas à atenuação das distorções harmônicas, é oportuna a adoção de medidas operacionais relacionadas à adequação das cargas geradoras de harmônicas afim de torná-las menos poluentes. Por vezes, tais medidas são incapazes de garantir o funcionamento dos sistemas elétricos dentro dos limites operacionais estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Neste contexto, torna-se imprescindível o uso de equipamentos auxiliares para atenuação das distorções harmônicas ou para a preservação das condições de operação do circuito de alimentação, tais como: aliviar sobrecarga em condutores neutros, reduzir o carregamento dos transformadores, diminuir perdas por efeito joule, evitar atuação intempestiva do sistema de proteção, entre outros.

O emprego de bloqueadores, filtros e dispositivos de compensação harmônica são as técnicas habitualmente aplicadas na mitigação das distorções harmônicas. Normalmente, essas técnicas podem ser agrupadas em dois grandes grupos em função das suas principais características operacionais: filtros ativos e filtros passivos.

O princípio operacional dos filtros ativos é baseado no cancelamento de componentes através da geração de frequências iguais e opostas àquelas geradas pela carga e são intrinsecamente adaptativos. Geralmente apresentam diversas vantagens operacionais quando comparados aos equivalentes passivos. Entretanto, seu uso em larga escala ainda enfrenta alguns obstáculos técnicos em decorrência da complexidade operacional para atender altas potências. Em contra partida, seu uso é restrito a casos específicos em aplicações direcionadas para redes de distribuição de energia elétrica, principalmente por razões de natureza econômicas. Certamente, com o progresso tecnológico iminente, as limitações apontadas desaparecerão em curto prazo.

Na categoria de filtros passivos, é possível identificar duas principais vertentes, os filtros ressonantes e os filtros eletromagnéticos.

Os filtros ressonantes são constituídos por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, adequadamente arranjados e especificados para oferecer baixas ou altas impedâncias à circulação de uma ou mais frequências harmônicas. As principais vantagens da sua aplicação são: a robustez, a alta confiabilidade operacional, a insensibilidade a surtos, a operação silenciosa e o baixo custo. Por outro lado, como desvantagens, apresentam alto peso e volume, interferências no desempenho global do sistema através de ressonâncias com outros componentes presentes no sistema.

Os filtros eletromagnéticos baseiam-se exclusivamente no uso de arranjos eletromagnéticos e, dispensam o uso de capacitores. Seu uso, como filtro paralelo, está relacionado com o desvio das componentes harmônicas de sequência zero. Para esta aplicação, a base de funcionamento fundamenta-se na minimização da sua impedância equivalente de sequência zero através de um arranjo conveniente dos enrolamentos conectados às diferentes fases do sistema elétrico. As principais vantagens são: imunidade à criação de novas ressonâncias com o sistema alimentador, robustez, baixo custo relativo e o amplo espectro de filtragem compreendendo todas as ordens harmônicas de sequência zero.

O uso do bloqueador eletromagnético de sequência zero propõe mais uma alternativa no que se refere à atenuação de componentes harmônicas nas redes elétricas de suprimento. Este dispositivo eletromagnético é conectado em série entre a fonte e um conjunto de cargas, oferecendo alta impedância para componentes harmônicas de sequência zero. O bloqueador em questão realiza duas funções: a primeira é evitar que as correntes harmônicas de sequência zero geradas pela carga não-linear fluam para a fonte e a segunda é impedir o fluxo das correntes harmônicas advindas da fonte, quando a mesma gera tensões de sequência zero. Este dispositivo pode operar sozinho ou em conjunto com outros arranjos auxiliares, visando adaptar a impedância do sistema para potencializar a atuação do filtro eletromagnético instalado.

Acredita-se que num futuro próximo, dispositivos de compensação harmônica ativos e passivos deverão coexistir nas redes elétricas, e que muitos sistemas de filtragem deverão progredir para arranjos híbridos que deverão reunir as vantagens técnicas e econômicas das duas tecnologias.

Neste contexto se insere a presente dissertação, com uma contribuição inédita relacionada com equacionamentos matemáticos no domínio da frequência para bloqueadores eletromagnéticos. Apresentam-se ainda metodologias para análise de desempenho e definição

de diretrizes para projeto do supressor eletromagnético de componentes harmônicas de sequência zero.

Foram apresentadas no capítulo II as diretrizes metodológicas para a definição de um modelo analítico no domínio da frequência para filtros eletromagnéticos de sequência zero. Apresentou-se um modelo com núcleo de três colunas e foram introduzidas algumas hipóteses simplificadoras no sentido de promover o isolamento sequencial e com isso facilitar a interpretação qualitativa dos resultados sem, todavia, arriscar a precisão numérica almejada. Baseado neste modelo teórico revelou-se que o principal parâmetro associado à atuação do dispositivo como filtro é o fator de acoplamento entre as bobinas de uma mesma coluna magnética e que o desempenho operacional desejado está diretamente relacionado à maximização do mesmo.

No capítulo III, foram apresentados os caminhos para a determinação de um modelo analítico no domínio da frequência para bloqueadores eletromagnéticos de sequência zero. Foi proposto um modelo baseado nas componentes sequenciais de tensões e correntes de alimentação desse dispositivo sendo também apresentadas algumas considerações aceitáveis no processo de simplificação. Constatou-se que, à medida que o fator de acoplamento ' $\lambda$ ', entre as bobinas do bloqueador eletromagnético se aproxima de um valor unitário, a eficácia no bloqueio das componentes de sequência zero cresce e, em contra partida, para as demais sequências, positiva e negativa, obtem-se o equivalente a um curto-circuito. Neste contexto, esta dissertação apresenta uma importante contribuição disponibilizando um modelo consistente para estudos no domínio da frequência deste dispositivo que incorpora, de forma inédita, as assimetrias elétricas e magnéticas. Desta forma, além de propiciar uma sólida interpretação da funcionalidade do bloqueador com relação aos diferentes parâmetros físicos, pode inclusive ser utilizado, com boa margem de segurança, para subsidiar diretrizes de projeto.

A metodologia utilizada nesta dissertação para avaliação do desempenho do sistema de filtragem composto por bloqueadores eletromagnéticos, filtros eletromagnéticos e filtros ressonantes foi apresentada no capítulo IV. Foram percorridas inicialmente as principais características relacionadas à representação das cargas elétricas não-lineares, tomando-se por base os princípios operacionais que norteiam o funcionamento das mesmas. Em seguida, foram identificadas duas possibilidades para representá-las no domínio da frequência, seja pela associação paralela de diferentes fontes de correntes harmônicas ou pela associação série de diferentes fontes de tensões harmônicas. Entretanto, considerando-se as várias possibilidades relacionadas ao desenvolvimento destes modelos e, principalmente para não

desviar o foco deste trabalho, optou-se pelo uso de modelos simplificados baseados apenas em fontes de corrente.

Por conseguinte, foram definidas quatro transmitâncias harmônicas associadas às principais grandezas elétricas envolvidas no processo, tomando-se por base o princípio da superposição de efeitos relacionado à técnica de representação da rede pelos seus circuitos equivalentes sequenciais. A metodologia desenvolvida mostrou-se altamente interessante, pois, permite identificar de forma inequívoca as contribuições individuais de cada uma das fontes de excitação harmônica, sejam elas advindas do sistema alimentador ou das cargas não-lineares.

No capítulo V, foram discutidas as diretrizes para dimensionamento dos dispositivos em questão nesta dissertação, bem como a análise de desempenho e avaliação de funcionalidade dos mesmos. Foi utilizado um protótipo de baixa potência de um filtro eletromagnético, construídos anteriormente no LQEE da FEIS – UNESP. Neste mesmo laboratório foi construído originalmente um protótipo de baixa potência de um bloqueador eletromagnético. Ambos os dispositivos eletromagnéticos aqui abordados foram utilizados para análise de funcionalidade e, como referência para testes de aderência dos modelos teóricos propostos. Os testes de funcionalidade mostraram que os protótipos atendem perfeitamente as premissas estabelecidas. Os resultados demonstraram a eficiência na filtragem de harmônicas de sequência zero, bem como a interferência desprezível para as demais componentes sequenciais. Entre os casos analisados foram expostos apenas os mais esclarecedores no que diz respeito à compreensão dos principais fenômenos envolvidos no processo de filtragem, principalmente com relação ao uso de arranjos contendo bloqueadores eletromagnéticos, filtros eletromagnéticos e filtros ressonantes. Com vistas à verificação de aderências dos modelos teóricos alguns resultados experimentais e simulados foram avaliados sob uma ótica comparativa. O desempenho dos modelos pode ser considerado altamente satisfatório, uma vez que, tendo em vista a confiabilidade dos resultados tangíveis dentro da classe de precisão dos equipamentos de excitação, medição, aquisição de dados e demais técnicas de processamento de sinais.

Como desfecho, no capítulo VI, foram ressaltados os pontos fortes do aplicativo computacional utilizado neste trabalho, associado a técnicas de análise do domínio da frequência e envolvendo as transmitâncias harmônicas sequenciais da rede elétrica, que possibilitaram a investigação individualizada e sistemática do comportamento do sistema. Foram ilustrados a partir de cenários comparativos arranjos para o sistema de filtragem, contendo filtros ressonantes, filtros eletromagnéticos e o bloqueador eletromagnético. Os

benefícios proporcionados pela presença do bloqueador eletromagnético estão diretamente relacionados com a melhoria da relação entre a impedância de sequência zero do sistema e da impedância do filtro eletromagnético, propiciando o aumento da corrente de sequência zero que flui através do filtro. Para reafirmar uma vez mais a validade do modelo simulado, realizaram-se também simulações no domínio do tempo que, em comparação as feitas anteriormente, mostraram resultados muito satisfatórios, evidenciando ainda mais a potencialidade deste trabalho no que diz respeito a sistemas de filtragem harmônica.

Em suma, no contexto deste trabalho várias contribuições podem ser identificadas. Entre elas, destacam-se como principais:

- A incorporação de novos conhecimentos relacionados com aplicação de dispositivos de atenuação harmônica no âmbito da equipe de trabalho do Laboratório de Qualidade de Energia da FEIS – UNESP;
- A análise, implementação e aperfeiçoamento de modelos que permitiram a compreensão dos fenômenos associados ao funcionamento de sistemas de filtragem harmônica;
- A proposição, desenvolvimento matemático e implementação computacional de modelos no domínio da frequência para bloqueadores eletromagnéticos de sequência zero, a qual entende-se que seja a principal contribuição original do trabalho.

Como sugestões para continuidade do trabalho citam-se:

- Melhorias no método de otimização, incorporando a busca automática da melhor topologia de filtragem, a aplicação de condições restritivas e penalidades para o ajuste dos níveis de potência reativa capacitiva, a distribuição ótima da potência reativa capacitiva entre os ramos ressonantes e a dessintonia;
- A incorporação de filtros ativos, objetivando um arranjo híbrido com maior flexibilidade operacional e mais atrativo do ponto de vista técnico e econômico.

## REFERÊNCIAS

---

APOLÔNIO, R.; OLIVEIRA, J. C.; VASCONCELLOS, A. B.; OLIVEIRA, A.; SOUTO, O. C. N. Filtro eletromagnético para harmônicos de sequência zero. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracajú, **Anais...** Aracajú: [s.n.], 2003. p.1-6.

APOLÔNIO, R.; OLIVEIRA, J. C.; VASCONCELLOS, A. B. Three-phase electromagnetic filter for zero sequence harmonics. In: INTERNATIONAL In: CONFERENCE ON HARMONIC AND QUALITY OF POWER, 11., 2004, New York. **Proceeding...** New York: IEEE Xplore digital library, 2005. p.613-618.

BELCHIOR, F. N.; FERREIRA, J. F. V.; OLIVEIRA, J. C.; BERNARDES, V. A.; OLIVEIRA, L. C. O. Zero sequence electromagnetic filter performance with non ideal conditions. In: IEEE-PES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 12., 2006, Cascais. **Proceedings...** Cascais: IEEE Xplore digital library, 2006. p.1-6.

CALIFORNIA INSTRUMENTS RP SERIES. **AC power sources:** manual do fabricante. San Diego: [s.n.], 2001. p.153 -158.

CZARNECKI, L. S. Harmonic blocking compensator: an alternative for improving power quality, In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS POWER SYSTEM, 6., 1994, Bologna. **Proceedings...** Bologna: IEEE Xplore digital library, 1994. p.283-288.

CZARNECKI, L. S. Effects of minor harmonics on the performance of resonant harmonic filters in distribution systems. **Proc. IEEE, Electric Power Appl.**, Stevenage, v.144, n.5, p.349-356, 1997.

CZARNECKI, L. S.; GINN, H. Effectiveness of resonant harmonic filters and its Improvement, In: IEEE PES Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Seattle. **Proceedings...** Seattle: IEEE Xplore digital library, 2000. p.742-747.

DAHONO, P. A.; WIDJAYA, R. E.; MARSI, S.; QAMARUZZAMAN. A Practical Approach to Minimize the Zero Sequence Current Harmonics in Power Distribution Systems. In: POWER CONVERSION CONFERENCE, 1997, Nagaoka. **Proceeding...** Nagaoka: IEEE Xplore digital library, 2002. p.683-686.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H.W. **Electrical power systems quality**. 2.ed . New York: McGraw-Hill, 2003. 158 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 50160 – voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems**. Poland: Wroclaw University of Technology, 1994. 16p.

FIGUEREDO, D. G. **Análise de Fourier e equações diferenciais parciais**. Rio de Janeiro: IMPA/CNPq, 1986. 274 p.

FREITAS, S. C. L.; OLIVEIRA, L. C. O.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, R. N. Experimental analysis and adherence test of the electromagnetic zero-sequence blocking model. In: IEEE-PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION, 2010, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: [s.n.], 2010.

GRUZS, T. M. A Survey of neutral currents in three-phase computer power systems, In: **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.26, n.4, p.719-725, 1990.

IEEE SA 519-1992 recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. [S. l.: s.n.], 1992. 100p. (Industrial Power Converters Committee).

IEEE TASK FORCE. Effect of harmonics on equipments. **IEEE Trans. on Power Delivery**, USA, v.8, n.2, p.672-680, 1993.

OLIVEIRA, L. C.; RAVAGNANI, L. L. Alocação de reativos em sistemas de filtragem passiva. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 6., Belém, 2005. **Anais...** Belém: Labplan/ UFSC, 2005. p.613-618.

OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N.; OLIVEIRA, L. C. O.; MEDEIROS, C. A. G.;

BELCHIOR, F. N. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicas através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F.; OLIVEIRA, R. A. N. Análise experimental das impedâncias características dos filtros eletromagnéticos de sequência zero. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 2007a. p. 1-6.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; MILANES, D. L. Modeling for passive hybrid filter performance analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE - ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9., 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: [s.n.], 2007b. p.1-6.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N. Método das transmitâncias sequenciais na avaliação de sistemas de filtragem harmônica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau: Labplan/UFSC, 2009. p. 1-8.

OLIVEIRA, L. C. O.; FREITAS, S. C. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C. Modeling for performance analysis of electromagnetic zero-sequence suppressor. In: IEEE-PES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 14., 2010, Bergamo, **Proceedings...** Bergamo: IEEE Xplore digital library, 2010a. p. 1-8

OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M.; FREITAS, S. C. L.; OLIVEIRA, L. C. O. The use of tuned filters as an attenuator device of harmonics generated by multipulse converters. In: IEEE/ PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION, 2010, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo:[s. n.], 2010b. p.1-6.

PENG, F. Z.; ADAMS, D. J. Harmonics sources and filtering approaches – series/parallel, active/passive, and their combined power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**,

Maryland, v.7, n.4, p.18-25, 2001.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL- PRODIST. **Módulo 8 - qualidade de energia elétrica**. Brasil: ANEEL, 2008. 53p.

RAVAGNANI, L. L. **Dimensionamento otimizado de filtros passivos**. 2004. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2004.

RAVAGNANI, L. L. **Dimensionamento de filtro eletromagnético de sequência zero e ensaios experimentais**. Ilha Solteira: FE/Universidade Estadual Paulista- UNESP, 2007. 46p. Estudos especiais realizados junto ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

RAVAGNANI, L. L. **Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais**. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2008.

VENDRAMINI, J. F. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de sequência zero através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.