

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÉLIO GERALDO FERREIRA

**ANÁLISE DE UM FILTRO ATIVO EM PARALELO COM  
CICLONVERSORES E FILTRO PASSIVO**

VITÓRIA

2008

CÉLIO GERALDO FERREIRA

**ANÁLISE DE UM FILTRO ATIVO EM PARALELO COM  
CICLONVERSORES E FILTRO PASSIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientadores:

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa

VITÓRIA  
2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

F383a Ferreira, Célio Geraldo, 1976-  
Análise de um filtro ativo em paralelo com cicloconversores e  
filtro passivo/Célio Geraldo Ferreira  
179 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

Co-Orientador: Gilberto Costa Drumond Sousa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito  
Santo, Centro Tecnológico.

1. Filtros elétricos ativos. 2. Filtros elétricos passivos. 3.  
Sistema de energia elétrica. 4. Energia – Controle de qualidade. 5.  
Análise harmônica I. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II Sousa,  
Gilberto Costa Drumond. III. Universidade Federal do Espírito  
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

**CÉLIO GERALDO FERREIRA**

**ANÁLISE DE UM FILTRO ATIVO EM PARALELO COM  
CICLOCONVERSORES E FILTRO PASSIVO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 25 de março de 2008.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Wilson Aragão Filho**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

“[...] através da investigação científica o homem não só reconstitui progressivamente o mundo dos objetos, em seu pensamento, como também dá a ele significantes novos e mais próximos à verdade que os objetos contêm.”  
(Lehfeld Barros, 1986, p.60)

## *Agradecimentos*

Agradeço a Deus, pela vida e pelos ensinamentos que sempre me conduziram.

Aos Professores Domingos Sávio Lyrio Simonetti e Gilberto Costa Drumond Sousa pela dedicação, paciência, sabedoria, amizade e conhecimentos compartilhados.

À ArcelorMittal Tubarão, pela oportunidade, incentivo e apoio.

A todos os colegas da ArcelorMittal Tubarão, principalmente aqueles que compartilharam comigo informações e conhecimentos imprescindíveis para que este trabalho se tornasse possível.

Aos meus irmãos e amigos, pelo amor, companhia, apoio e amizade.

Aos meus pais, Antônio Lino Ferreira e Iracema Marques de Jesus Ferreira, pelo amor, criação, educação, ensinamentos eternos e também por entenderem os momentos de ausência que se fizeram necessários.

À minha amada esposa Renata Schimidt Gasparini, pelo amor, carinho, incentivo, paciência, compreensão e palavras de incentivo sempre presentes.

Aos sonhos, combustível que nos provoca e fortalece, tornando nos capazes de evoluir na sua busca...

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS ..</b>   | <b>20</b> |
| 2.1 DEFINIÇÕES .....   | 20        |
| 2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....  | 22        |
| 2.2.1 Distorção Harmônica de Tensão X Distorção Harmônica de Corrente.....   | 25        |
| 2.2.2 Índice de Distorção Harmônica Total e Valor <i>rms</i> .....   | 26        |
| 2.3 CICLOCONVERSORES - FONTE DE CORRENTES HARMÔNICAS .....   | 27        |
| 2.3.1 Cicloconversores .....   | 27        |
| 2.4 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....  | 30        |
| 2.5 PRINCÍPIOS PARA CONTROLE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....   | 31        |
| 2.5.1 Filtro Passivo .....   | 32        |
| 2.5.2 Filtro Ativo .....   | 34        |
| 2.5.2.1 Filtro Ativo – Topologia e Princípios Básicos .....  | 35        |
| 2.5.2.1.1 Filtro Ativo Paralelo .....  | 35        |
| 2.5.2.1.2 Filtro Ativo Série .....   | 36        |
| 2.5.3 Filtro Híbrido.....  | 37        |
| 2.6 CONCLUSÕES .....   | 39        |
| <b>3. AVALIAÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS .....</b>  | <b>40</b> |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO HARMÔNICA DE UM SISTEMA INDUSTRIAL.....   | 40        |
| 3.2 MEDIÇÕES NO SISTEMA EM ESTUDO .....  | 42        |
| 3.2.1 Oscilografias em Sistemas Elétricos Industriais.....   | 42        |
| 3.3 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....  | 44        |
| 3.4 CONCLUSÕES .....   | 49        |
| <b>4. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM LAMINADOR SIDERÚRGICO .....</b>                                   | <b>50</b> |
| 4.1 SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR.....   | 50        |
| 4.2 CONTRATO DE CONEXÃO.....   | 57        |
| 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA DE ENERGIA DO LAMINADOR .....                                    | 58        |
| 4.3.1 Medições no Sistema.....   | 58        |
| 4.3.1.1 Variáveis Medidas .....  | 58        |
| 4.3.1.2 Ajustes no dispositivo Registrador .....   | 60        |
| 4.3.1.3 Variáveis Calculadas.....  | 60        |
| 4.4 AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES .....   | 61        |
| 4.4.1 Tensões.....   | 62        |
| 4.4.1.1 Seqüência de Fase .....  | 63        |
| 4.4.1.2 Medição de Tensão 01 (MT01): Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação rodando sem laminar. ....                       | 64        |
| 4.4.1.3 Medição de Tensão 02 (MT02): Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação com motores rodando sem laminar. .... | 66        |
| 4.4.1.4 Medição de Tensão 03 (MT03): Laminadores desbastadores rodando, sem laminar / cadeiras de laminação laminando. ....            | 68        |
| 4.4.1.5 Medição de Tensão 04 (MT04): Laminação seqüencial - Laminadores desbastadores laminando e cadeiras de laminação laminando..... | 70        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.4.1.6   | <i>Avaliação das Tensões</i> .....   | 71         |
| 4.4.2     | Correntes .....  | 73         |
| 4.4.2.1   | <i>Medição de Corrente 01 (MC01): Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação rodando sem laminar.</i> .....                       | 73         |
| 4.4.2.2   | <i>Medição de Corrente 02 (MC02): Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação com motores rodando sem laminar.</i> ..... | 75         |
| 4.4.2.3   | <i>Medição de Corrente 03 (MC03): Laminadores desbastadores rodando, sem laminar / cadeiras de laminação laminando.</i> .....            | 77         |
| 4.4.2.4   | <i>Medição de Corrente 04 (MC04): Laminação seqüencial – Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação laminando.</i> .....          | 79         |
| 4.4.2.5   | <i>Avaliação das Correntes</i> .....   | 81         |
| 4.5       | DESEMPENHO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO EXISTENTE .....   | 82         |
| 4.6       | CONCLUSÕES .....   | 87         |
| <b>5.</b> | <b>MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO .....</b>   | <b>88</b>  |
| 5.1       | MODELAMENTO DE SISTEMAS.....   | 88         |
| 5.1.1     | Plataforma de Simulação – <i>Matlab / Simulink / SimPowerSystem</i> .....  | 89         |
| 5.2       | IMPLEMENTAÇÃO, AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DO LTQ .....   | 90         |
| 5.2.1     | Bloco 1 - Fonte do sistema de potência.....  | 92         |
| 5.2.2     | Bloco 2 - Cicloconverters .....  | 94         |
| 5.2.3     | Bloco 3 - Sistema de filtragem passiva existente .....   | 97         |
| 5.2.4     | Ajustes gerais e entrada de dados .....  | 98         |
| 5.3       | VALIDAÇÃO DO MODELO – SIMULAÇÃO .....  | 99         |
| 5.3.1     | Validação das tensões.....   | 100        |
| 5.3.2     | Validação das correntes.....   | 104        |
| 5.4       | SIMULAÇÃO DE AMPLIAÇÃO DO LAMINADOR.....   | 107        |
| 5.4.1     | Panorama 1: Situação atual de arranjo da planta em laminação seqüencial.....   | 109        |
| 5.4.2     | Panorama 2: Expansão da planta em 30% de sua carga para a situação de laminação seqüencial medida. ....                                  | 111        |
| 5.5       | CONCLUSÕES .....   | 115        |
| <b>6.</b> | <b>APLICAÇÃO DE FILTRO HÍBRIDO NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR.....</b>   | <b>117</b> |
| 6.1       | COMPENSAÇÃO HARMÔNICA HÍBRIDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS .....  | 117        |
| 6.2       | CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO.....  | 119        |
| 6.3       | OPERAÇÃO COORDENADA ENTRE FILTROS ATIVOS E PASSIVOS .....  | 120        |
| 6.4       | O CONTROLE DO FILTRO ATIVO .....   | 120        |
| 6.5       | ESTUDO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO .....  | 125        |
| 6.5.1     | Operação Paralela dos Filtros Ativo e Passivo.....   | 127        |
| 6.5.1.1   | <i>Fator de Compensação do Filtro Ativo - <math>k_A = 1,0</math></i> .....   | 130        |
| 6.5.1.2   | <i>Fator de Compensação do Filtro Ativo - <math>k_A = 0,8</math></i> .....   | 133        |
| 6.5.1.3   | <i>Fator de Compensação do Filtro Ativo - <math>k_A = 0,6</math></i> .....   | 136        |
| 6.5.2     | Avaliação do efeito da implantação da topologia híbrida nas correntes dos ramos do filtro passivo. ....                                  | 139        |
| 6.6       | CONCLUSÕES .....   | 142        |
| <b>7.</b> | <b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....</b>   | <b>143</b> |
| 7.1       | CONCLUSÕES .....   | 144        |
| 7.2       | PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO ESTUDO.....   | 146        |
| 7.3       | COMENTÁRIOS FINAIS.....  | 147        |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>149</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>APÊNDICE A - DETALHES DE SIMULAÇÃO DO FILTRO ATIVO .....</b>                             | <b>153</b> |
| A.1    Regulador de Corrente.....   | 156        |
| <b>APÊNDICE B – LISTA DE ROTINAS AUXILIARES.....</b>  | <b>158</b> |
| B.1    ExcelTransfer.m .....  | 158        |
| B.2    Calcu_TensaoFonte_Impedancia.m .....   | 159        |
| B.3    Defasagem_RMS.mdl .....  | 160        |
| <b>ANEXO 1 – DADOS DO REGISTRADOR.....</b>  | <b>161</b> |
| <b>ANEXO 2 – CURTO CIRCUITO SIMULADO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DO LTQ .....</b> | <b>162</b> |
| <b>ANEXO 3 – MEDIÇÕES UTILIZADAS .....</b>  | <b>163</b> |
| <b>ANEXO 4 – ARTIGO APRESENTADO .....</b>   | <b>164</b> |

# LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Definição Matemática – Harmônicas, Interharmônicas, Nível CC e Sub-harmônicas.....                                | 21  |
| Tabela 3.1 – Valores de referência das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....                | 46  |
| Tabela 3.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)..... | 47  |
| Tabela 3.3 - Terminologia.....   | 47  |
| Tabela 3.4 – Limites das distorções harmônicas de corrente ( $I_h$ ) em % de $I_L$ , para tensões inferiores a 69kV.....       | 48  |
| Tabela 4.1 – Variáveis registradas na Subestação do Laminador.....   | 59  |
| Tabela 4.2 - Variáveis calculadas através das variáveis medidas.....   | 61  |
| Tabela 4.3 – Valores <i>RMS</i> – MT01.....  | 64  |
| Tabela 4.4 – Valores <i>RMS</i> – MT02.....  | 66  |
| Tabela 4.5 – Valores <i>RMS</i> – MT03.....  | 68  |
| Tabela 4.6 – Valores <i>RMS</i> – MT04.....  | 70  |
| Tabela 4.7 – Valores <i>RMS</i> – MC01.....  | 73  |
| Tabela 4.8 – Valores <i>RMS</i> – MC02.....  | 75  |
| Tabela 4.9 – Valores <i>RMS</i> – MC03.....  | 77  |
| Tabela 4.10 – Valores <i>RMS</i> – MC04.....   | 79  |
| Tabela 4.11 – Valores <i>RMS</i> .....   | 85  |
| Tabela 5.1 – Correntes registradas na subestação do laminador.....   | 95  |
| Tabela 5.2 – Correntes calculadas através das correntes medidas.....   | 96  |
| Tabela 5.3 - Correntes por fase do conjunto de cicloconversores.....   | 96  |
| Tabela 5.4 – Comparação entre valores <i>rms</i> das tensões medidas e simuladas.....  | 102 |
| Tabela 5.5 – Comparação entre valores <i>rms</i> das correntes medidas e simuladas.....  | 105 |
| Tabela 5.6 – Características nominais dos ramos do sistema de filtragem passiva existente.....                                 | 109 |
| Tabela 5.7 – Resultado de simulação – Panorama 1.....  | 110 |
| Tabela 5.8 – Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 1.....  | 111 |
| Tabela 5.9 – Resultado de simulação – Panorama 2A.....   | 112 |
| Tabela 5.10 – Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 2A.....  | 112 |
| Tabela 5.11 – Resultado de simulação – Panorama 2B.....  | 114 |
| Tabela 5.12 – Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 2B.....  | 115 |
| Tabela 6.1 - Resumo dos resultados de simulação para diferentes valores do fator de compensação - $k_A$ .....                  | 139 |
| Tabela 6.2 – Resultado de simulação – Panorama 1.....  | 138 |
| Tabela 6.3 – Resultado de simulação – Panorama 3.....  | 140 |
| Tabela 6.4 – Resultado de simulação Panorama 1.....  | 139 |
| Tabela 6.5 – Resultado de simulação – Panorama 3.....  | 141 |
| Tabela 6.6 – Características gerais do filtro ativo.....   | 141 |

# LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Forma de onda de uma grandeza elétrica.....  | 21 |
| Figura 2.2 – Tensão e corrente para um sistema com cargas lineares.....   | 22 |
| Figura 2.3 – Tensão e corrente para o caso de uma carga não linear -<br>Acionamento a cicloconversores.....   | 23 |
| Figura 2.4 – Distorção de tensão em sistema elétrico constituído de carga não linear e linear.<br>.....   | 24 |
| Figura 2.5 – Esquema dos cicloconversores trifásicos utilizados em laminadores . (a)<br>Aplicação com operação por bloqueio de grupo. (b) Aplicação com modo de circulação de<br>corrente.....                              | 29 |
| Figura 2.6 – Forma de onda da tensão no cicloconversor. ....  | 30 |
| Figura 2.7 – Abordagem corretiva para redução ou eliminação de distorções harmônicas..  | 31 |
| Figura 2.8 – (a) Carga não linear com filtro passivo alimentada por fonte contendo<br>harmônicas de tensão. (b) Circuito equivalente para harmônicas da fonte. (c) Circuito<br>equivalente para as harmônicas da carga..... | 33 |
| Figura 2.9 – Filtro ativo paralelo. ....  | 35 |
| Figura 2.10 – Filtro ativo série. ....  | 36 |
| Figura 2.11 – Filtro híbrido: Ativo paralelo / passivo paralelo.....  | 37 |
| Figura 2.12 – Filtro híbrido: Passivo paralelo com ativo série.....   | 38 |
| Figura 2.13 – Filtro híbrido: Ativo série / passivo paralelo.....   | 38 |
| <br>  |    |
| Figura 4.1 – Fluxograma do processo siderúrgico. ....   | 51 |
| Figura 4.2 – Unifilar Global do Sistema Elétrico em estudo. ....  | 54 |
| Figura 4.3 – Representação esquemática do processo de laminação.....  | 55 |
| Figura 4.4 – Unifilar da subestação do laminador. ....  | 56 |
| Figura 4.5 – Variáveis medidas na Subestação do Laminador. ....   | 59 |
| Figura 4.6 – Diagrama de Fase: Seqüência Positiva $RST$ da tensão. ....   | 63 |
| Figura 4.7 – Tensões medidas no barramento de entrada.....  | 64 |
| Figura 4.8 – Espectros das harmônicas de tensão – MT01: (a) $v_{rs}$ , (b) $v_{st}$ , (c) $v_{tr}^*$ . ....   | 65 |
| Figura 4.9 – Tensões medida no barramento de entrada. ....  | 66 |
| Figura 4.10 – Espectros das harmônicas de tensão – MT02: (a) $v_{rs}$ , (b) $v_{st}$ , (c) $v_{tr}^*$ . ....  | 67 |
| Figura 4.11 – Tensões medidas no barramento de entrada.....   | 68 |
| Figura 4.12 – Espectros das harmônicas de tensão – MT03: (a) $v_{rs}$ , (b) $v_{st}$ , (c) $v_{tr}^*$ . ....  | 69 |
| Figura 4.13 – Tensão medida no barramento de entrada. ....  | 70 |
| Figura 4.14 – Espectros das harmônicas de tensão – MT04: (a) $v_{rs}$ , (b) $v_{st}$ , (c) $v_{tr}^*$ . ....  | 71 |
| Figura 4.15 – Correntes medidas no barramento de entrada.....   | 73 |
| Figura 4.16 – Espectros das harmônicas de corrente – MC01: (a) $i_r$ , (b) $i_s$ , (c) $i_t^*$ . ....   | 74 |
| Figura 4.17 – Correntes medidas no barramento de entrada.....   | 75 |
| Figura 4.18 – Espectros das harmônicas de corrente – MC02: (a) $i_r$ , (b) $i_s$ , (c) $i_t^*$ . ....   | 76 |
| Figura 4.19 – Correntes medidas no barramento de entrada.....   | 77 |
| Figura 4.20 – Espectros das harmônicas de corrente – MC03: (a) $i_r$ , (b) $i_s$ , (c) $i_t^*$ . ....   | 78 |
| Figura 4.21 – Correntes medidas no barramento de entrada.....   | 79 |
| Figura 4.22 – Espectros das harmônicas de corrente – MC04: (a) $i_r$ , (b) $i_s$ , (c) $i_t^*$ . ....   | 80 |
| Figura 4.23 – Esquema representativo do filtro harmônico existente - Modelo simulado. ....  | 83 |
| Figura 4.24 - Resposta em freqüência do filtro harmônico existente. ....  | 84 |
| Figura 4.25 – Correntes medidas do Filtro passivo.....  | 85 |
| Figura 4.26 – Espectros das harmônicas de corrente filtradas pelo filtro passivo: (a) $i_{rF}$ , (b)<br>$i_{sF}$ , (c) $i_{tF}^*$ .....   | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.1 – Unifilar do sistema elétrico estudado.....  | 91  |
| Figura 5.2 – Sistema elétrico simulado em ambiente <i>Matlab/Simulink/PSB</i> .....  | 91  |
| Figura 5.3 – Ajuste de Parâmetros da Fonte – Block Parameters do <i>Simulink/PowerSystem Blockset</i> .....  | 92  |
| Figura 5.4 – Identificação das variáveis medidas e estimadas na subestação do laminador.....   | 95  |
| Figura 5.5 - Forma de onda da corrente para o do conjunto de cicloconversores.....   | 97  |
| Figura 5.6 – Esquema representativo do filtro harmônico instalado - Modelo simulado.....   | 98  |
| Figura 5.7 – Janela de entrada de dados <i>Model Properties</i> do <i>Simulink</i> .....   | 99  |
| Figura 5.8 – Validação das Tensões.  |     |
| (a) Tensões de linha medidas - $V_{rst}$ . (b) Tensões de linha simuladas - $V_{abc}$ .  |     |
| (c) $V_{rs} \times V_{ab}$ . (d) $V_{st} \times V_{bc}$ . (e) $V_{tr} \times V_{ca}$ e erro associado.....   | 101 |
| Figura 5.9 – Espectro das harmônicas por fase.   |     |
| (a) (b) (c) Espectro das tensões medidas.  |     |
| (d) (e) (f) Espectro das tensões simuladas.....  | 103 |
| Figura 5.10 – Validação das Correntes.   |     |
| (a) Correntes de linha medidas - $I_r, I_s, I_t$ . (b) Correntes de linha simuladas - $I_a, I_b, I_c$ .  |     |
| (c) $I_r \times I_a$ . (d) $I_s \times I_b$ . (e) $I_t \times I_c$ e erro associado.....   | 105 |
| Figura 5.11 – Espectro das harmônicas de corrente por fase.  |     |
| (a) (b) (c) Espectro das correntes medidas.  |     |
| (d) (e) (f) Espectro das correntes simuladas.....  | 106 |
| Figura 5.12 – Processo de laminação – Representação da expansão da planta com inserção de novos laminadores desbastadores.....   | 108 |
| Figura 5.13 – Resultados de simulação – Panorama de simulação 1.....   | 110 |
| Figura 5.14 – Valores nominais de corrente e resultados de simulação para os ramos do sistema de filtragem passiva - Panorama de simulação 1.....  | 111 |
| Figura 5.15 - Resultados de simulação – Panorama de simulação 2B.....  | 114 |
| Figura 5.16 - Valores nominais de corrente e resultados de simulação para o sistema de filtragem passiva - Panorama de simulação 2B.....   | 115 |
| Figura 6.1 – Esquema da instalação paralela dos filtros ativo e passivo.....   | 119 |
| Figura 6.2 – Sistema de Filtragem Híbrida, representação por fontes de corrente. (h=ordem harmônica).....  | 120 |
| Figura 6.3 – Filtro ativo → Diagrama esquemático.....  | 122 |
| Figura 6.4 – Controle principal do filtro ativo – “ <i>Synchronous Reference Frame</i> ” – <i>SRF</i> .....  | 123 |
| Figura 6.5 – Sistema de eixos de referência para as transformações.....  | 124 |
| Figura 6.6 – Modelo implementado no ambiente <i>Matlab/Simulink/PowerSystem Blockset</i> .....   | 126 |
| Figura 6.7 – Circuito equivalente do método de compensação harmônica híbrida para a carga dos cicloconversores.....  | 127 |
| Figura 6.8 – Corrente do conjunto de cicloconversor simulada com 30% de aumento de carga.  |     |
| (a) Forma de onda. (b) Espectro das harmônicas.....  | 129 |
| Figura 6.9 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.....     | 130 |
| Figura 6.10 - Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da Corrente; Espectros das harmônicas→ (b) Antes da atuação do Filtro Ativo, (c) após atuação do Filtro Ativo..... | 130 |
| Figura 6.11 – Corrente do filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do Filtro Ativo.....                  | 131 |
| Figura 6.12 – Corrente filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.....                       | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.13 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) Após atuação do filtro ativo. ....     | 133 |
| Figura 6.14 – Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo. .... | 134 |
| Figura 6.15 - Corrente filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) Após atuação do filtro ativo. ....                      | 134 |
| Figura 6.16 - Corrente do filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo. ....                     | 135 |
| Figura 6.17 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo. (c) após atuação do filtro ativo. ....     | 136 |
| Figura 6.18 - Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo. .... | 137 |
| Figura 6.19 - Corrente do filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo. ....                   | 137 |
| Figura 6.20 – Corrente do filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente. Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo. ....                     | 138 |
| <br>   |     |
| Figura A.1 – Controle principal do Filtro Ativo – “ <i>Synchronous Reference Frame</i> ” – SRF.....  | 153 |
| Figura A.2 – Modelo do PLL trifásico do <i>PSB</i> .....   | 154 |
| Figura A.3 – Controle SRF simulado.....  | 155 |
| <br>   |     |
| Figura B.1 – Rotina gerada no <i>PSB</i> - Defasagem_RMS.mdl.....  | 160 |

# LISTA DE ABREVIações OU SIGLAS

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| 6F11 a 6F19                    | Disjuntores dos alimentadores dos cicloconversores                       |
| 6S11                           | Disjuntor de entrada do barramento da SE LTQ 1                           |
| ANEEL                          | Agência Nacional de Energia Elétrica                                     |
| BFG                            | “Blast Furnace Gas” (Gás de Alto-Forno)                                  |
| BW                             | “Bandwidth” (Largura de faixa)   |
| CA                             | Componente alternada   |
| CC                             | Componente contínua  |
| COG                            | “Coke Oven Gas” (Gás de Coqueria)  |
| $\Delta v$                     | Queda de tensão  |
| ER-1                           | Estação Recebedora 1   |
| ER-2                           | Estação Recebedora 2   |
| $e_{c1}, e_{c2}, e_{c3}$       | Erro entre as correntes medidas e simuladas                              |
| $e_{t1}, e_{t2}, e_{t3}$       | Erro entre as tensões medidas e simuladas                                |
| $f_1$                          | Frequência fundamental do sistema de potência                            |
| F1 a F6                        | Cadeiras de laminação  |
| FFT                            | “Fast Fourier Transformer” (Transformada Rápida de Fourier)              |
| FL                             | Filtro passa-faixa   |
| HP                             | Filtro passa-alta  |
| Hz                             | Unidade de frequência  |
| $i_r$ e $i_s$                  | Corrente medida na fase R e S do secundário do transformador de 75MVA    |
| $i_{rF}$ e $i_{sF}$            | Corrente medida da fase R e S na entrada do Conjunto de Filtros Passivos |
| $i_t^*$                        | Corrente calculada da fase T no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ     |
| $i_{tF}^*$                     | Corrente calculada da fase T na entrada do conjunto de filtros passivos  |
| $i_L$                          | Corrente de carga  |
| $I_{CC}$                       | Corrente de curto-circuito   |
| $i_s$                          | Corrente da fonte  |
| $I_{af}$                       | Corrente do filtro ativo   |
| $I_{pf}$                       | Corrente do filtro passivo   |
| $i_\alpha$ e $i_\beta$         | Correntes no referencial estacionário                                    |
| $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$       | Correntes de carga abc   |
| $i_q$ e $i_d$                  | Correntes no referencial síncrono  |
| $i_{rC}^*, i_{sC}^*, i_{tC}^*$ | Corrente da fase R, S e T do conjunto cicloconversores                   |
| LDG                            | “LD Gás”   |
| LPF                            | “Low pass filter” (Filtro passa baixa)                                   |
| $L_s$                          | Indutância de linha  |
| LTQ                            | Laminador de Tiras a Quente  |
| MC01                           | Medição de corrente - Caso 01  |
| MC02                           | Medição de corrente - Caso 02  |

|            |   |
|------------|---|
| MC03       | Medição de corrente - Caso 03                               |
| MC04       | Medição de corrente - Caso 04                               |
| MI         | Motor de indução  |
| MS         | Motor síncrono  |
| MS         | Motor síncrono  |
| MT01       | Medição de tensão - Caso 01                                 |
| MT02       | Medição de tensão - Caso 02                                 |
| MT03       | Medição de tensão - Caso 03                                 |
| MT04       | Medição de tensão - Caso 04                                 |
| PCC        | Ponto de acoplamento comum                                  |
| PLL        | "Phase locked loop"   |
| PSB        | "SimPowerSystems Blockset"                                  |
| $\theta$   | Ângulo instantâneo da rede                                  |
| $R_s$      | Resistência de linha  |
| SE         | Subestação  |
| SEP        | Sistema elétrico de potência                                |
| SRF        | "Synchronous reference frame" (Eixo de Referência Síncrona) |
| TC         | Transformador de corrente                                   |
| TP         | Transformador de potencial                                  |
| Trafo      | Transformador de potência                                   |
| $V_{rs}$   | Tensão medida entre as fases R e S - Tensão de linha R-S    |
| $V_{st}$   | Tensão medida entre as fases S e T - Tensão de linha S-T    |
| $V_{tr}^*$ | Tensão calculada entre fases T e R - Tensão de linha T-R    |
| $V_{ds}^e$ | Tensão no eixo d do referencial síncrono                    |
| $V_{qs}^e$ | Tensão no eixo q do referencial síncrono                    |
| $V_N$      | Tensão nominal  |
| $v_s$      | Fonte de tensão senoidal                                    |
| $V_L$      | Tensão de carga ou tensão terminal                          |
| $V_1$      | Tensão na frequência fundamental                            |
| $V_h$      | Tensão harmônica  |
| $Z_{pf}$   | Impedância do Filtro Passivo                                |
| $Z_s$      | Impedância da linha   |

# RESUMO

Cargas não lineares, tais como cicloconversores aplicados em laminadores, são freqüentemente utilizadas em indústrias siderúrgicas. A utilização de cargas desta natureza pode resultar em problemas de qualidade para o sistema elétrico, uma vez que geram correntes harmônicas que fluem pelo sistema de distribuição de energia da planta, caso não sejam adequadamente tratadas, causando distorção da tensão. Para melhorar a qualidade de energia da rede, filtros passivos são normalmente utilizados. No entanto, o sistema de filtragem passiva pode apresentar problemas no seu desempenho, principalmente quando considerada a expansão da planta ou alterações na sua forma de operação.

Estes problemas no sistema de filtragem passiva podem ser aliviados pela combinação de filtros passivos e ativos, através de uma operação coordenada entre eles. Assim, para as freqüências harmônicas geradas pelos cicloconversores, parte destas componentes pode ser absorvida pelo filtro ativo e outra parte pelo filtro passivo. Esta combinação provê uma melhor compensação para a larga faixa de freqüências harmônicas geradas pelos cicloconversores.

Este trabalho analisa um sistema real de distribuição de energia de um laminador siderúrgico, nas atuais condições de operação e em um panorama de expansão. Foi implementado um modelo de simulação digital envolvendo um filtro ativo em paralelo com filtros passivos, inseridos no sistema de alimentação de energia dos cicloconversores. Seguiu-se um estudo sobre o uso combinado de filtros passivos e ativos, para verificar a operação coordenada destes para a efetiva compensação harmônica do sistema e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade da energia elétrica do sistema elétrico da planta.

# ABSTRACT

In the steel industry non linear loads are frequently used such as cycloconverters for rolling mills. This kind of load influences the power quality of the supply network, resulting in distortion in the system voltage. In order to improve the power quality of the grid, passive filters are commonly used. However, a passive filter can present some drawbacks, mainly when the plant is under expansion or the operating conditions change.

These drawbacks of the passive filter can be alleviated by the combined use of active and passive filters, and by appropriately coordinating their operations. That is, of the harmonic currents generated by the cycloconverter, part is absorbed by the active filter, and another by the passive filter. This provides a good harmonic compensation over the entire operating range for the varying spectrum harmonic current frequencies generated by the cycloconverter.

This work analyzes a real electrical power supply of a steelmaking rolling mill, in the present conditions, as well as in a scenario of plant expansion. A digital simulation model, consisting of a passive filter, active filter, cycloconverter load and power supply system was developed, followed by a study to investigate the combined use of passive and active filters, mainly to assess their effectiveness to compensate the harmonic components and, consequently, to improve the plant power quality level.

# 1. INTRODUÇÃO

*Neste capítulo é apresentada uma descrição sucinta da abordagem deste trabalho, no sentido de avaliar e caracterizar estratégias de compensação harmônica em uma indústria siderúrgica. Serão mostradas algumas justificativas e motivações para sua realização.*

A qualidade é cada vez mais uma prioridade no tratamento do insumo Energia Elétrica no segmento industrial, uma vez que pode representar operações da planta sem interrupções, com altos níveis de estabilidade operacional e produtividade. Indústrias siderúrgicas caracterizam-se pela intensiva transformação de energia, com a utilização de cargas não lineares de alta potência em seu processo. Estas cargas podem afetar diretamente a qualidade da energia da planta, caso os problemas não sejam bem caracterizados e medidas de mitigação de seus efeitos adotadas.

Entre os problemas de qualidade de energia comumente encontrados nas operações de indústrias siderúrgicas estão incluídos: transitórios (impulsivos, oscilatórios), variações de tensão de curta duração (interrupções, afundamentos / sag, elevação / swell), variações de tensão de longa duração (interrupção permanente, subtensão, sobretensão), desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação, eventuais níveis cc, interharmônicas), flutuações de tensão e variação de frequência da rede.

Neste trabalho, serão de interesse maior os aspectos relacionados à compensação de distorções harmônicas de corrente e tensão, provocadas principalmente pela aplicação de acionamentos a velocidade ajustável. O trabalho apresentará um estudo de caso, onde o acionamento da carga baseia-se na aplicação de Cicloconvertidores em um Laminador de Tiras a Quente (LTQ).

Medições de campo e análise do espectro das harmônicas do sistema de distribuição de energia elétrica do laminador serão consideradas, justificadas principalmente pelas seguintes razões:

- ✓ Plano de expansão do Laminador de Tiras a Quente, com possibilidade de inserção de novas cargas, demandando uma avaliação do sistema de compensação existente;
- ✓ Estudo e verificação de desempenho do sistema de compensação harmônica (Filtro Passivo) existente no sistema nas atuais condições e frente a possibilidade de futuras expansões.

As medições de tensão e corrente foram realizadas na barra de alimentação do conjunto de cicloconversores, estando o laminador em diferentes fases de operação. Com base nestas medições, um modelo de simulação pôde ser desenvolvido e validado, com o intuito de realizar avaliações diversas, principalmente com relação ao impacto de alterações da planta com reflexo nos índices de qualidade relacionados às distorções harmônicas do sistema.

O estudo resulta desta forma em uma avaliação da condição atual de operação do sistema, baseada em índices de qualidade propostos por normas brasileiras e normas internacionais, além dos índices estabelecidos em contrato entre a empresa e a concessionária local de distribuição de energia. São propostas alternativas técnicas, avaliadas em simulação, de forma a manter os índices de qualidade de energia elétrica dentro dos limites das normas.

Assim, esta dissertação divide-se em capítulos que tratam os assuntos distribuídos como a seguir.

No Capítulo 2, será feita uma caracterização do conceito de harmônicas em sistemas elétricos industriais, mostrando as principais fontes do distúrbio e os prejuízos causados pelas mesmas. Além disto, serão abordadas, de forma sucinta, as soluções mais utilizadas atualmente para a proteção de cargas sensíveis a elas. Em especial, é estudada a geração de harmônicas devida à utilização de cargas do tipo cicloconversores.

No Capítulo 3, é abordada uma metodologia para avaliação das condições de operação de sistemas de distribuição de energia industriais, frente às distorções harmônicas. Índices de referência, baseados em normalização nacional e internacional são abordados e definidos para o trabalho em questão.

No capítulo 4, é realizada uma radiografia da situação atual de operação do laminador. Através de medições oscilográficas de tensão e corrente, realizadas em diferentes situações de operação deste laminador, serão apresentadas avaliações sobre algumas das condições nas quais atualmente opera o sistema de distribuição de energia local, em que esta planta encontra-se inserida. É também realizada uma avaliação de desempenho do sistema de compensação harmônica passiva existente.

O Capítulo 5 abordará a implementação de um modelo computacional capaz de simular o sistema de potência em estudo e que se propõe a aprofundar os estudos neste sistema elétrico, de forma a caracterizar possíveis alterações das suas atuais condições de operação.

No Capítulo 6 realiza-se a investigação da utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido acoplado ao sistema elétrico de potência, verificando as possíveis melhorias de desempenho do sistema de compensação sob análise, se considerada a expansão da planta.

O Capítulo 7, além de apresentar as conclusões do trabalho realizado, aponta uma série de questões levantadas no seu decorrer, visando à identificação de pontos merecedores de estudos e avaliações mais centralizadas e aprofundadas, reconhecendo, ainda, os limites do desenvolvimento realizado.

Os Apêndices e Anexos apresentados fornecem detalhes sobre vários pontos considerados, como a modelagem implementada para o controle do filtro ativo, outros aplicativos computacionais desenvolvidos, dados gerais do sistema elétrico em estudo e instrumentação utilizada na realização das medições.

## **2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

*A indústria moderna caracteriza-se cada vez mais pela intensiva transformação de energia elétrica, com a utilização de cargas não lineares de alta potência em seu processo. Estas cargas não lineares geram correntes harmônicas que podem fluir pelo sistema de distribuição de energia da planta, caso não sejam adequadamente tratadas. Em consequência disso, distorções da tensão ocorrem, gerando penalidades ao sistema de distribuição de energia elétrica, com conseqüentes perdas técnicas e econômicas devido ao mau funcionamento de equipamentos. Este capítulo abordará os aspectos relacionados à geração de harmônicas, suas principais conseqüências para os sistemas elétricos, as formas de se avaliar e mitigar este problema. Em especial, será estudado um sistema acionado por Cicloconversores, potencial gerador de harmônicas em um sistema elétrico.*

### **2.1 DEFINIÇÕES**

Ondas distorcidas podem ser representadas como a soma de ondas senoidais de características específicas, conforme a série de Fourier. Harmônicas, interharmônicas e sub-harmônicas de uma forma de onda podem ser definidas em termos de suas componentes espectrais e sob uma escala de frequências [17]. A tabela 2.1 provê de forma simplificada e efetiva, a definição matemática utilizada para os termos mencionados.

Tabela 2.1 - Definição Matemática – Harmônicas, Interharmônicas, Nível CC e Sub-harmônicas.

| <b>Termo</b>   | <b>Definição Matemática</b>                         |
|----------------|---|
| Harmônica      | $f = h * f_1$ , onde $h$ é um número inteiro $> 0$  |
| CC             | $f = 0 \text{ Hz}$ ( $f = h * f_1$ onde $h = 0$ )   |
| Interharmônica | $f \neq h * f_1$ onde $h$ é um número inteiro $> 0$ |
| Sub-harmônica  | $f > 0 \text{ Hz}$ e $f < f_1$                      |

Considere-se  $f_1$  como sendo a frequência fundamental do sistema de potência.

A figura 2.1 ilustra a forma de onda produzida por uma fonte com componentes de frequência diferenciadas, entre harmônicas, interharmônicas e nível CC. Percebe-se claramente que a forma de onda apresentada é não-periódica e assimétrica, dependendo do intervalo de observação.

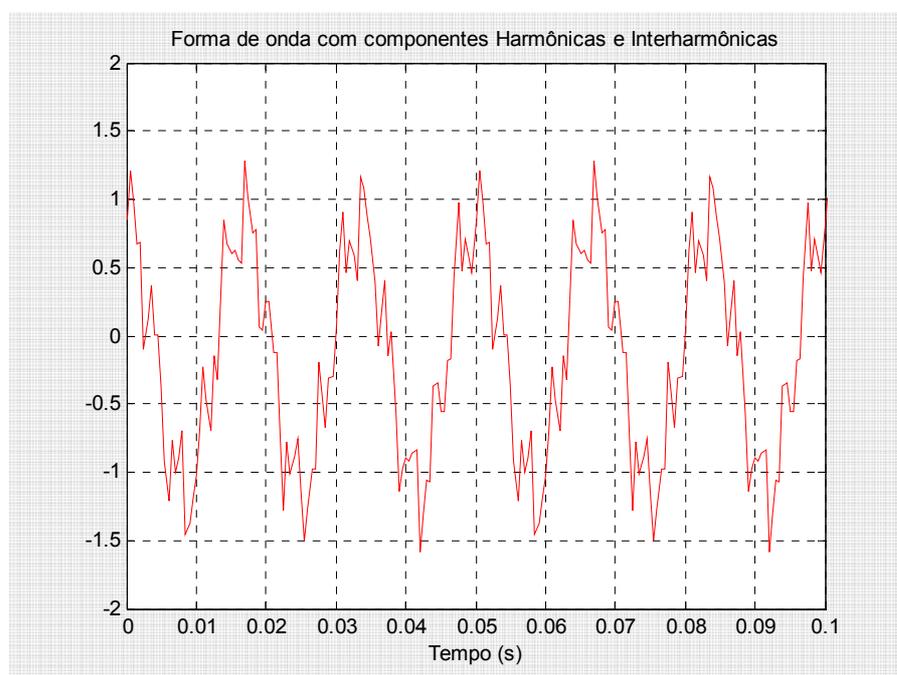


Figura 2.1 – Forma de onda de uma grandeza elétrica contendo componentes harmônicas, interharmônicas e nível CC.

## 2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A energia elétrica é produzida na forma senoidal, tal como ilustrado na figura 2.2, e uma grande parte das cargas conectadas a rede elétrica demandam correntes senoidais, as quais são chamadas de cargas lineares.

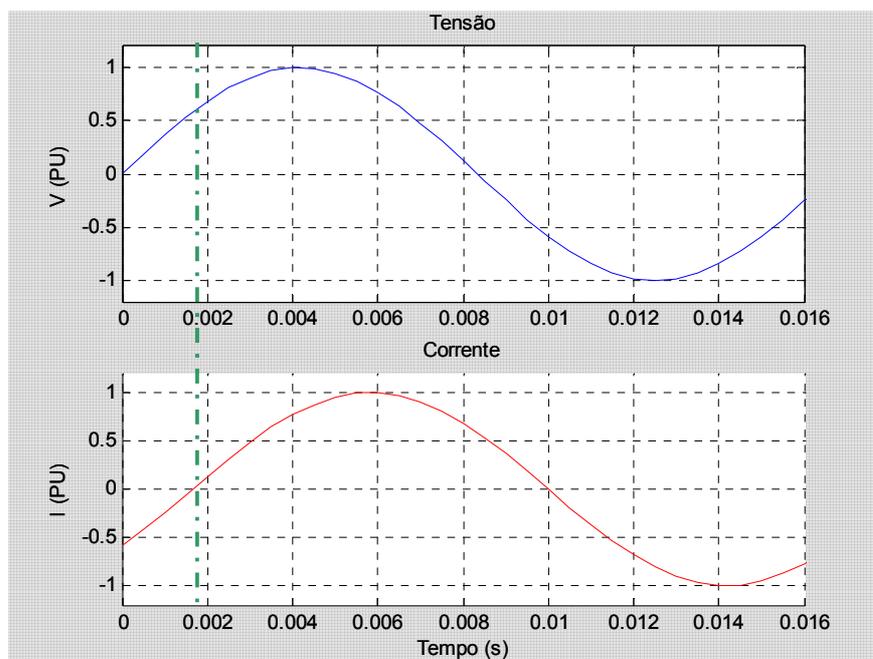


Figura 2.2 – Tensão e corrente para um sistema com cargas lineares.

Os dispositivos semicondutores, com os avanços tecnológicos das últimas décadas, tornaram-se abundantes e acessíveis, favorecendo o desenvolvimento da aplicação da eletrônica de potência aos diversos equipamentos ligados ao sistema elétrico, principalmente os industriais. Esta evolução permitiu melhorar as aplicações finais, melhorando o rendimento dos equipamentos, as estratégias de controle, o custo das implantações, possibilitando ainda, a execução de tarefas não possíveis anteriormente.

Contudo, alguns dos equipamentos eletro-eletrônicos, ao funcionarem, necessitam da conversão da energia elétrica que lhes é disponibilizada de uma forma a outra, apresentando na maioria das vezes características de não linearidade nessa conversão e consumindo assim correntes não senoidais. Desta forma, são caracterizados como fontes de distúrbios, e podem provocar perturbações para a

rede de distribuição de energia, produzindo harmônicas e distorcendo as formas de onda das tensões e correntes.

Devido à crescente proliferação dessas cargas não lineares, o sistema elétrico cada vez mais vem recebendo grandes injeções de correntes harmônicas que provocam, entre outros efeitos, distorções da tensão. Assim, as tensões e/ou correntes desses sistemas deixam de ter forma senoidal. A figura 2.3 mostra as formas de onda da tensão e da corrente para uma carga não linear [19].

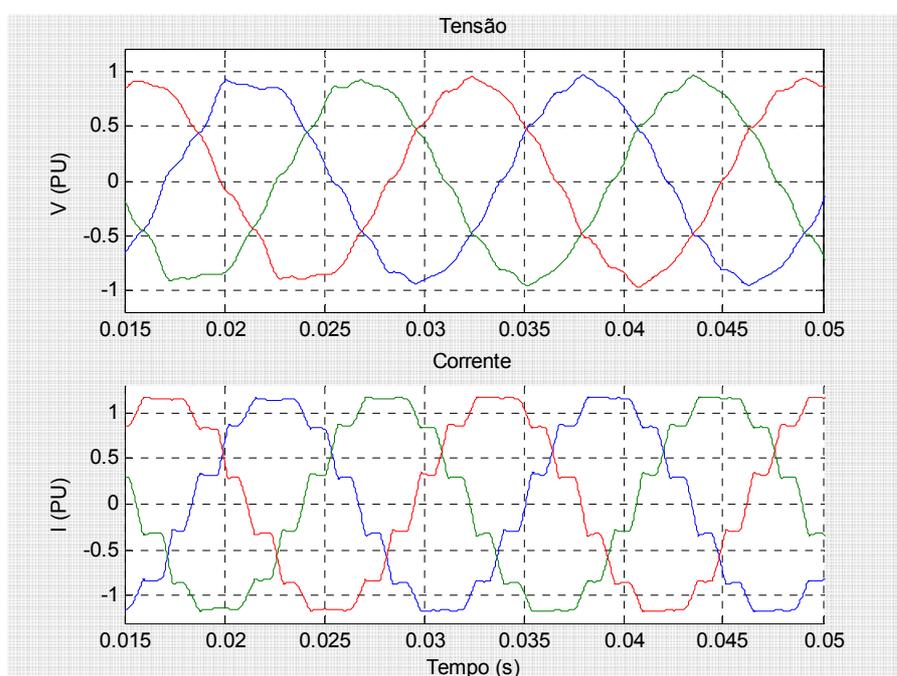


Figura 2.3 – Tensão e corrente para o caso de uma carga não linear -  
Acionamento a cicloconversores

A figura 2.4 retrata como se dá a distorção de tensão em um sistema de potência. O sistema possui fonte de tensão senoidal ( $v_s$ ) operando com uma carga linear e uma carga não linear. A carga não linear consome corrente não-senoidal ( $i_{L1}$ ) que contém harmônicas. A circulação de harmônicas na corrente de linha ( $i_s$ ) produz uma queda de tensão não linear ( $\Delta v$ ) sob a impedância de linha ( $Z_s$ ), que distorce a tensão de

carga ( $v_L$ ). Como consequência, a carga linear é também afetada, consumindo corrente distorcida.

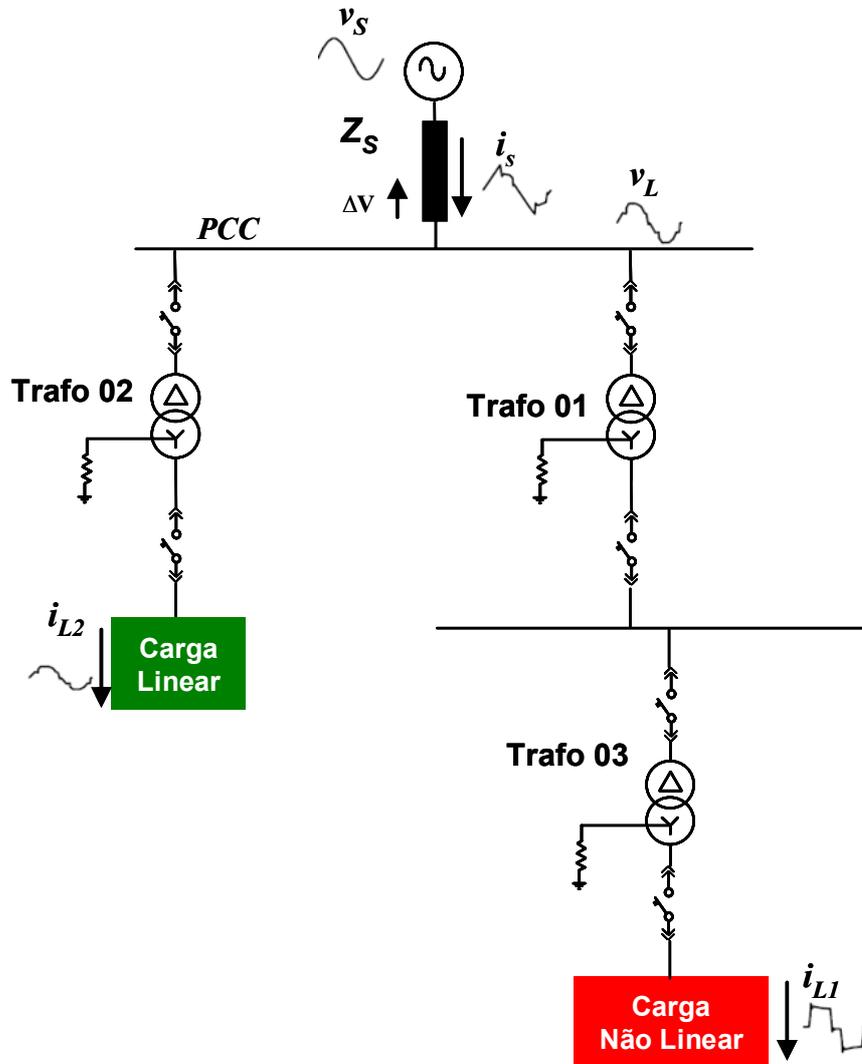


Figura 2.4 – Distorção de tensão em sistema elétrico constituído de carga não linear e linear.

A presença de correntes e tensões harmônicas nos sistemas de potência, ou seja, quando os circuitos elétricos operam de forma não linear, causam diversos problemas tanto para as concessionárias quanto para os consumidores de uma forma geral. Além dos prejuízos ao funcionamento dos sistemas, causados pela “poluição” harmônica, os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros

problemas dos sistemas elétricos são também muito elevados. Desta forma, a questão da qualidade de energia entregue a um sistema de distribuição de energia em sistemas industriais ou aos consumidores finais é objeto de grande preocupação e de investimentos em estudos de formas de mitigação. Estes aspectos serão melhor discutidos ainda neste capítulo.

### **2.2.1 Distorção Harmônica de Tensão X Distorção Harmônica de Corrente**

O termo “harmônica” é freqüentemente utilizado sem abrangência específica. Por exemplo, é comum ouvir que “*drives*” para acionamento de cargas a velocidade ajustável, fornos a arco ou indutivos, possuem restrições de operação, devido às harmônicas geradas durante o seu funcionamento. Mas o que isso na verdade significa? Isso pode significar uma das três razões a seguir listadas [2]:

- ✓ As tensões harmônicas são grandes (a tensão encontra-se com graus elevados de distorção) para o controle apropriado de ângulos de disparo de dispositivos de potência;
- ✓ As correntes harmônicas são grandes, acima da capacidade de alguns equipamentos do sistema elétrico de potência, tais como transformadores e máquinas que necessitarão operar abaixo de sua potência nominal;
- ✓ As tensões harmônicas são grandes devido a grande produção de correntes harmônicas pelos equipamentos, para uma dada condição do sistema.

Como sugerido pela lista acima, existem causas e efeitos separados para tensões e correntes, mas que podem relacionar-se entre si. Assim o termo “harmônica” é ambíguo para descrever, por si só, um problema.

A figura 2.4 mostrou a distorção de tensão como resultante do fluxo de correntes distorcidas através da impedância série do circuito de potência. A intensidade da distorção de tensão dependerá, é claro, da impedância do circuito e da corrente harmônica que por esta impedância circular. Enquanto a corrente harmônica da carga provoca a distorção de tensão, deve ser notado que a carga não possui controle sobre a distorção da tensão. A mesma carga em diferentes localizações do sistema de potência poderá resultar em valores diferenciados de distorção de

tensão. O reconhecimento destes fatos é a base para a divisão de responsabilidades no controle das harmônicas e pode ser encontrado em normas e recomendações, assim como a IEEE 519 [3] que preconiza, dentre outras coisas que:

- ✓ O estudo e controle sobre os índices de correntes harmônicas injetadas em um sistema devem ser focalizados na aplicação final e ou geradora do distúrbio;
- ✓ Assumindo-se que a injeção de corrente harmônica em determinado ponto do sistema de distribuição de energia, esteja controlado e abaixo de determinados índices, o controle sobre as distorções de tensão é exercida pelo detentor do controle acima da impedância, que é freqüentemente, o distribuidor/supridor do insumo energia.

O fenômeno “harmônica” deve ser cuidadosamente entendido, diferenciando-se as causas e os efeitos das harmônicas de tensão e de corrente. De forma convencional, em sistemas elétricos industriais o termo é utilizado referenciado à carga, ou seja, a referência trata das correntes harmônicas. Quando referenciado aos sistemas de transmissão e distribuição, a tensão é normalmente o foco da discussão.

### 2.2.2 Índice de Distorção Harmônica Total e Valor *rms*

Existe uma série de medidas normalmente utilizadas para indicar índices relacionados às harmônicas de uma forma de onda, sob um ciclo. Uma das formas mais utilizadas e difundidas é a distorção harmônica total, que pode ser calculada tanto para a tensão quanto para a corrente:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1  $M_h$  representa o “valor *rms*” da componente harmônica  $h$  da grandeza  $M$ .  $THD$  é a medida do “valor efetivo” da componente harmônica de uma forma de onda distorcida relativo à fundamental.

O “valor *rms*” de uma forma de onda não é a soma das suas componentes individuais, mas sim a raiz quadrada da soma dos quadrados. A *THD* é relacionada com o “valor *rms*” de uma forma de onda através da seguinte relação:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.2)$$

## 2.3 CICLOCONVERSORES - FONTE DE CORRENTES HARMÔNICAS

Em sistemas elétricos industriais, em especial aqueles relacionados às indústrias siderúrgicas, a difusão do uso de conversores de energia passou a constituir a classe de cargas não lineares mais importante quando se trata de correntes harmônicas. Cicloconversores, retificadores de fontes *CC*, retificadores de entrada de inversores, fornos a arco ou indutivos, etc., podem ser listados como alguns dos principais elementos de geração de correntes harmônicas nesses ambientes.

No âmbito deste trabalho, é de interesse avaliar os aspectos relacionados à geração de correntes harmônicas, caracterizada principalmente pela aplicação de acionamentos a velocidade ajustável, baseados na implementação de soluções com o uso de cicloconversores, como em laminadores, amplamente difundidos nesse segmento industrial.

### 2.3.1 Cicloconversores

Cicloconversores são conversores estáticos de frequência (*SFC*) projetados para realizar acionamento a velocidade variável de motores de indução (*MI*) ou motores síncronos (*MS*), que não utilizam um “*link*” *CC* intermediário em sua estrutura de construção. O desenvolvimento da tecnologia de semicondutores de potência e microprocessadores propiciou a disseminação do uso da tecnologia dos cicloconversores, sendo esses largamente utilizados na indústria em aplicações

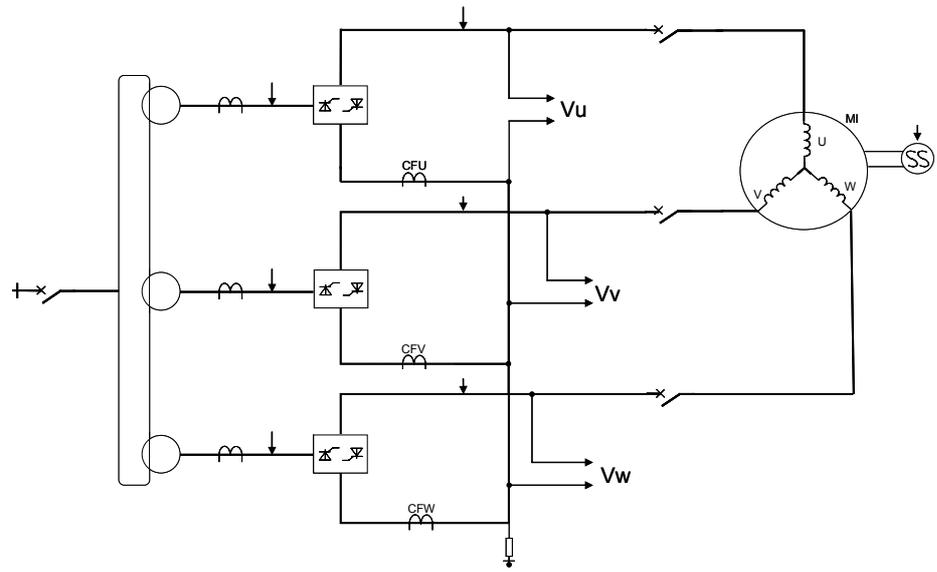
como laminadores, moinhos e em equipamentos de tração como trens elétricos, navios de grande porte, etc. [4].

Algumas das características na utilização de cicloconversores em acionamentos a velocidade variável são:

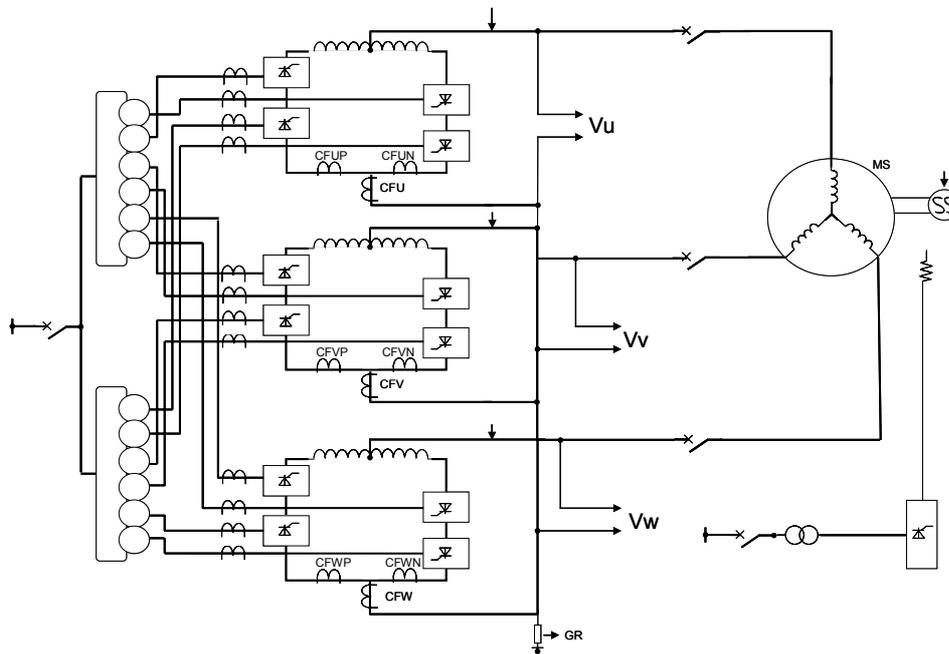
- ✓ Acionamento de sistemas de alta potência;
- ✓ Baixa manutenção e alta disponibilidade;
- ✓ Elevada faixa de variação de velocidade;
- ✓ Boa resposta e rigidez dinâmica às alterações de carga;
- ✓ Baixa corrente de partida;
- ✓ Não contribuem para corrente de curto circuito dos circuitos onde instalados;

Um cicloconversor consiste em um ou mais pares de retificadores controlados, conectados na topologia “*back to back*”. A figura 2.5 mostra as estruturas básicas dos cicloconversores instalados em um laminador. O ângulo de atraso destes retificadores é modulado, de forma a gerar uma tensão *CA* de saída sob frequência e amplitude desejadas. Aplicações de cicloconversores normalmente são dimensionadas para sistema de alta potência, como já mencionado.

Na indústria siderúrgica, cicloconversores são normalmente utilizados em laminadores, ou, como mais conhecidos, “*rolling mills*” [4 e 5]. A faixa de potência de cada uma das cadeiras de laminação e laminadores desbastadores que compõem o laminador que será analisado neste trabalho é acima de 7,5MVA, resultando em uma potência aparente acima de 50MVA, no caso de 08 (oito) conjuntos de laminadores.



(a)



(b)

Figura 2.5 – Esquema dos cicloconvertidores trifásicos utilizados em laminadores . (a) Aplicação com operação por bloqueio de grupo. (b) Aplicação com modo de circulação de corrente

Cargas como cicloconvertidores influenciam diretamente na qualidade da energia elétrica da rede onde conectadas, normalmente resultando em baixo fator de potência e distorções de tensão, como é visto na figura 2.6, que representa as formas de onda da tensão de um conjunto de cicloconversor. Para a melhoria do fator de potência e compensação harmônica, filtros passivos e estratégias de controle dos cicloconvertidores (utilização de cicloconvertidores com modo de corrente de circulação, por exemplo) podem ser adotados.

A corrente de carga dos cicloconvertidores possui um espectro de corrente bastante complexo e em adição às características harmônicas típicas dos conversores, correntes interharmônicas também são geradas e que dependerão da faixa de velocidade e da potência utilizadas neste tipo de acionamento [5].

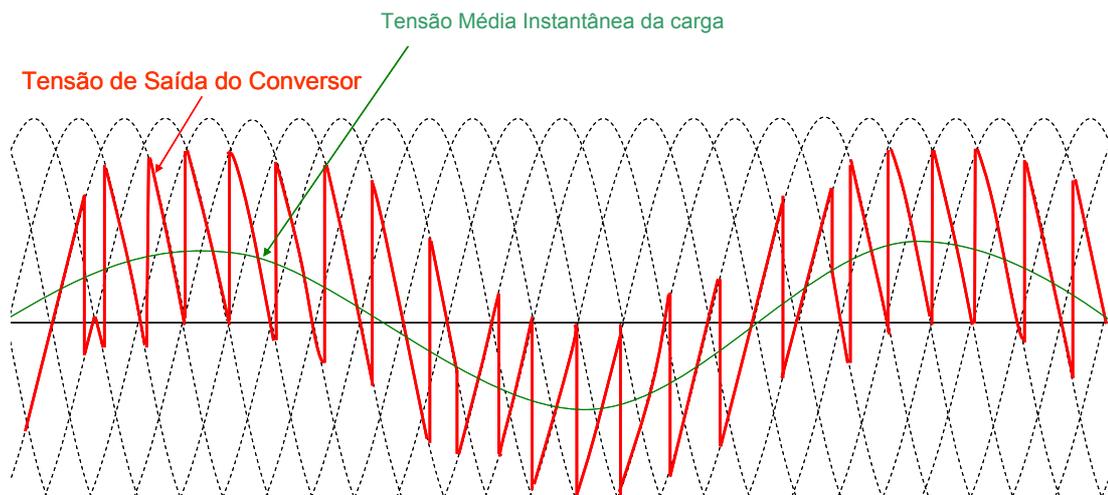


Figura 2.6 – Forma de onda da tensão no cicloconversor.

## 2.4 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Além da distorção das formas de onda propriamente dita, a presença de distúrbios relacionados a harmônicas nas linhas de distribuição de energia, originam problemas em equipamentos e componentes do sistema elétrico, tais como [6]:

- ✓ Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibração nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- ✓ Aquecimento, ruído audível e redução da vida útil de máquinas elétricas rotativas;
- ✓ Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- ✓ Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- ✓ Aumento nas perdas dos condutores elétricos;
- ✓ Redução da vida útil de lâmpadas e flutuações da intensidade luminosa (“flicker” – para o caso de ocorrência de sub-harmonicas);
- ✓ Erros em medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- ✓ Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação;
- ✓ Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica, tais como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), sistemas de controle comandados por microcontroladores, dentre outros, que são os responsáveis pelo controle de processos produtivos industriais.

## 2.5 PRINCÍPIOS PARA CONTROLE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A figura 2.7 ilustra algumas das possíveis formas utilizadas na redução ou eliminação de problemas relacionados a distúrbios em uma abordagem corretiva, ou seja, quando a técnica utilizada possibilita a redução ou eliminação dos distúrbios do sistema elétrico sem exigir a substituição dos equipamentos nele existentes e com a aplicação de condicionadores [7].

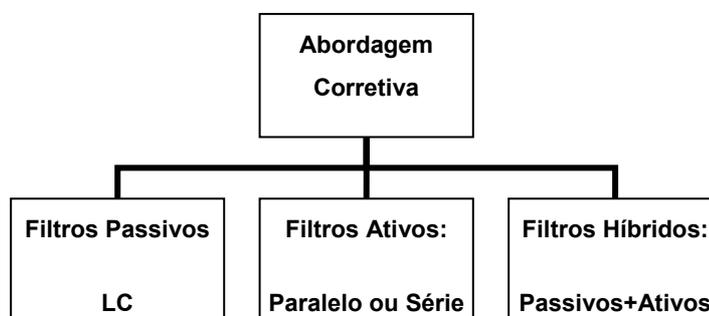


Figura 2.7 – Abordagem corretiva para redução ou eliminação de distorções harmônicas.

### 2.5.1 Filtro Passivo

Filtros passivos têm sido tradicionalmente utilizados para absorver correntes harmônicas geradas por grandes cargas industriais, primeiramente devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência na maioria dos casos. No entanto, eles possuem restrições quanto à sua aplicação. A impedância da fonte possui influência significativa nas características de compensação dos filtros. Além disso, os filtros passivos são altamente susceptíveis a ressonâncias série e paralelo entre a fonte e a carga, sendo também susceptíveis às tolerâncias dos componentes L e C (reator – capacitor) que o compõem.

Os filtros passivos sintonizados têm também a desvantagem de atrair correntes harmônicas da rede elétrica, sendo ainda susceptíveis aos transientes oriundos do chaveamento de cargas e de linhas. Assim, não raramente, devido à absorção de harmônicas não previstas em sua concepção, pode haver uma sobrecarga dos circuitos onde os filtros estão ligados, sendo os dispositivos de proteção elétrica (proteção de sobrecarga, por exemplo) acionados e realizando o disparo (“*trip*”) ou desligamento do elemento de filtragem, deixando-o fora de operação.

Em particular, para cargas não lineares conectadas a sistemas de potência, que exigem elevado grau de robustez, é uma tarefa complexa projetar filtros passivos que sejam concebidos com elevada precisão em sua frequência de corte e alto fator de qualidade (características que determinam o grau de qualidade do filtro).

Filtros passivos provêm filtragem harmônica na carga, isto é, na principal fonte das correntes harmônicas e assim reduzem as distorções de tensão nos terminais da carga. Eles podem ser instalados na subestação de distribuição como oposição às harmônicas, provendo tanto filtragem harmônica como correção de fator de potência para toda a carga da subestação [6].

A figura 2.8(a) mostra um circuito unifilar de uma fonte de tensão, supostamente poluída com harmônicas, alimentando uma carga não linear, representada por uma fonte de corrente  $i_L$ , também contendo harmônicas. Assume-se que um filtro passivo, representado de forma simplificada pelo circuito paralelo L-C, foi conectado com a função de eliminar as harmônicas da carga (como dito, em geral as harmônicas da

fonte não são consideradas no projeto de filtros passivos). A figura 2.8(b) mostra o circuito equivalente apenas para as componentes harmônicas  $v_{sh}$  da fonte (neste caso a carga foi considerada como um circuito aberto). O filtro passivo, em geral, é projetado para funcionar idealmente como um curto-circuito nas frequências das correntes harmônicas da carga. No entanto, é possível que, dependendo do valor de  $X_s$  (que varia de acordo com a configuração do circuito elétrico) ocorra situação tal que a combinação série de  $X_s$  com a impedância característica do filtro passivo produza uma ressonância para uma dada frequência de  $v_s$ , acarretando o aparecimento de um “curto-circuito” na fonte e conseqüentemente uma sobrecorrente. Este é o fenômeno da ressonância tipo série, que pode danificar o filtro ou impedi-lo de operar corretamente [1].

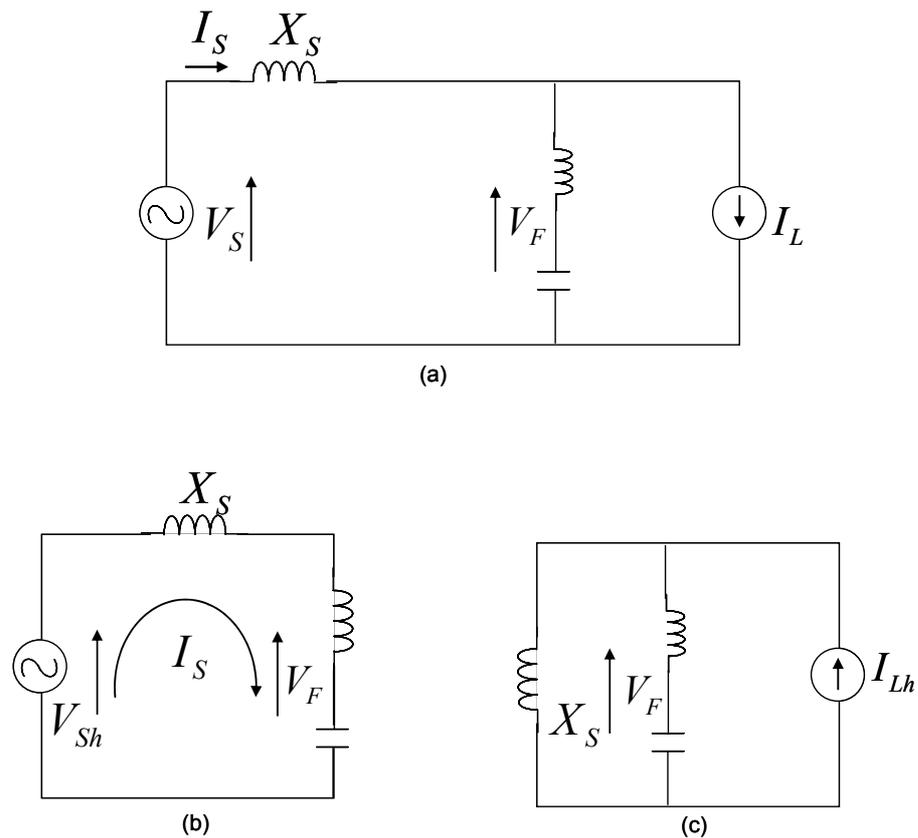


Figura 2.8 – (a) Carga não linear com filtro passivo alimentada por fonte contendo harmônicas de tensão. (b) Circuito equivalente para harmônicas da fonte. (c) Circuito equivalente para as harmônicas da carga.

O problema da anti-ressonância ocorre quando, para uma dada harmônica gerada pela carga não linear, a combinação de  $X_s$  em paralelo com o filtro da figura 2.8(c),

produz uma alta impedância para uma dada harmônica da carga. Em geral, isto ocorre para uma harmônica não característica da carga, ou seja, uma harmônica que não deveria existir ou que, a princípio, seria muito pequena para ser considerada no projeto do filtro. Esta condição de ressonância-paralela pode provocar sobretensão, quando circular pela combinação da impedância  $X_s$  com o filtro passivo [5].

### 2.5.2 Filtro Ativo

Soluções utilizando filtros ativos eliminam problemas típicos de aplicações que utilizam somente filtros passivos. Desde que os princípios básicos para sua operação foram firmados em 1970, filtros ativos têm atraído a atenção de pesquisadores e engenheiros da área de eletrônica de potência, que procuram soluções para problemas de “poluição” harmônica em sistemas de potência [8]. Interesse mais aprofundado por soluções implementadas a partir de filtros ativos pode ser explicado devido a:

- ✓ O contínuo desenvolvimento da tecnologia de dispositivos semicondutores de potência, que são caracterizados por sua capacidade de chaveamento rápido e “*gate*” isolado.
- ✓ A disponibilidade e a evolução de dispositivos como DSP (“*digital signal processors*”), FPGAs (“*field-programmable gate arrays*”), conversores Analógicos-Digitais (A/D), sensores de tensão e corrente e amplificadores operacionais e de isolamento a custos acessíveis.

Filtros ativos são superiores em desempenho de filtragem, menores fisicamente e mais flexíveis nas suas aplicações, se comparados aos filtros passivos tradicionais, que utilizam capacitores, indutores, e/ou resistores. Os filtros ativos, também conhecidos como condicionadores de potência, não são destinados apenas à filtragem harmônica, mas podem prover também amortecimento, isolamento harmônica, terminação harmônica, controle da potência reativa, correção do fator de potência e regulação de tensão, balanceamento de carga, redução do efeito “flicker”, e/ou suas combinações.

Filtros ativos podem ser classificados em filtros ativos puros em suas várias configurações e filtros híbridos que combinam filtros ativos com filtros passivos. A seguir alguns dos princípios básicos de funcionamento e algumas topologias serão detalhadas.

## 2.5.2.1 Filtro Ativo – Topologia e Princípios Básicos

### 2.5.2.1.1 Filtro Ativo Paralelo

A figura 2.9 apresenta o diagrama em blocos básico de um filtro ativo paralelo de potência. O filtro paralelo é representado pelo Conversor *CC/CA* e seu controle. Nesta topologia, o sistema funcionará com seu controle em corrente e terá a função básica de “curto-circuitar” as correntes indesejadas geradas pela carga. Assim, o grande desafio no projeto de um filtro ativo paralelo, baseado em conversores deste tipo, está na determinação da referência de corrente a ser sintetizada [7].

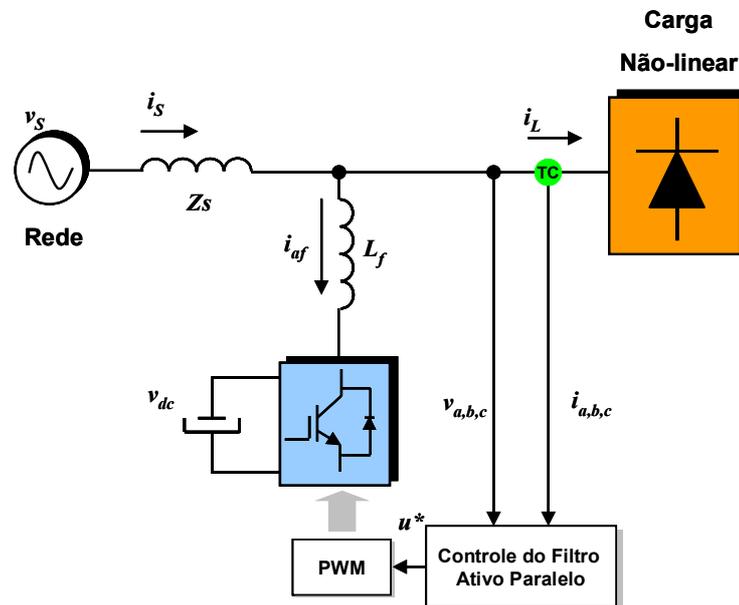


Figura 2.9 – Filtro ativo paralelo.

### 2.5.2.1.2 Filtro Ativo Série

A topologia básica do filtro ativo série pode ser vista na figura 2.10. Nesta figura a fonte de alimentação está representada por uma fonte de tensão distorcida e desequilibrada. A carga é representada por uma fonte ideal, contendo apenas componente de seqüência positiva. O filtro ativo série não é capaz de eliminar harmônicas de corrente geradas pela carga, uma vez que este filtro está inserido em série com esta carga. Isto é exatamente o conceito dual do que ocorre com o filtro paralelo [7].

A função principal desta topologia é a de não permitir que parcelas indesejáveis de tensão sejam aplicadas sobre a carga, ou seja, isola harmonicamente a carga. A tensão de compensação deve ser tal que todas as parcelas de harmônicas na fonte não sejam aplicadas sobre a carga.

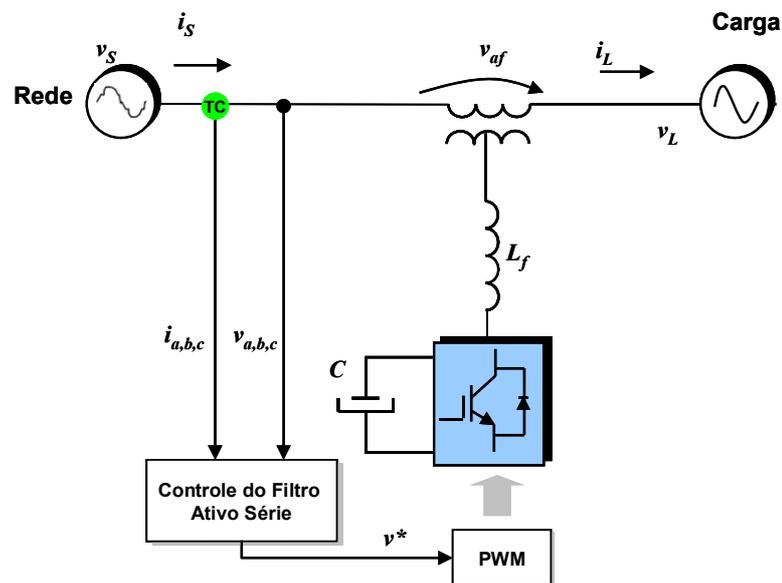


Figura 2.10 – Filtro ativo série.

### 2.5.3 Filtro Híbrido

Filtros híbridos combinam as vantagens dos filtros passivos com as vantagens de aplicação de filtros ativos e têm se tornado uma solução interessante para compensações em sistemas industriais de grande potência. Diferentes topologias como as que combinam filtro ativo série com filtro passivo paralelo [22], filtro ativo em série com o filtro passivo [23,24] ou operação paralela de ambos os sistemas [25] têm sido exploradas.

Aplicações de filtragem ativa em topologias híbridas usualmente são projetadas de forma que o filtro ativo elimine uma parcela das distorções harmônicas, enquanto que o filtro passivo se encarregará das maiores parcelas.

Alterações nas condições operacionais de um sistema elétrico industrial, como expansões de plantas ou alterações das suas condições operacionais, podem demandar alterações no sistema de filtragem existente. Como forma de preservar as características de instalação e operação desse sistema elétrico em alteração, sistemas de filtragem híbrida podem ser propostos, principalmente naqueles casos onde é necessária apenas uma readequação da instalação, ou sua adequação, expansão com atualizações tecnológicas. Casos como tais, são ideais para o estudo de aplicações de filtragem híbrida, onde algumas das estruturas mostradas nas figuras 2.11 a 2.13, poderão ser aplicadas, conforme as características e objetivos da forma de compensação almejada.

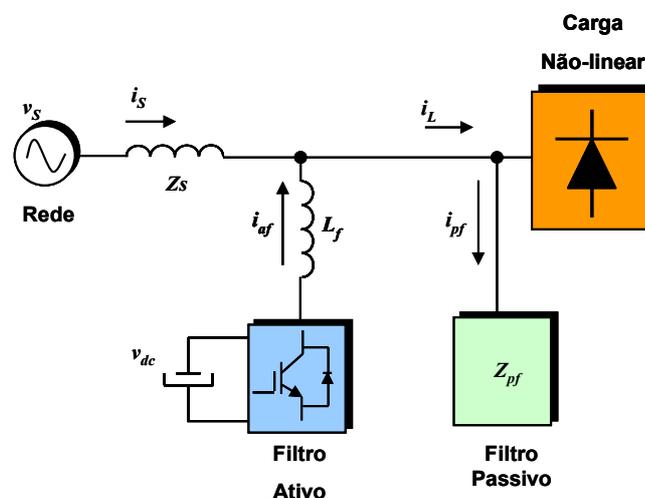


Figura 2.11 – Filtro híbrido: Ativo paralelo / passivo paralelo.

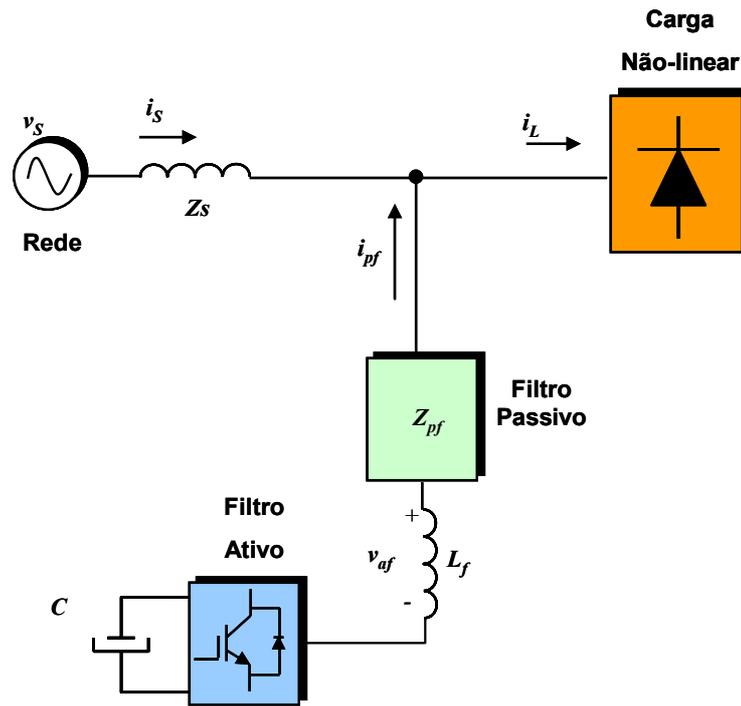


Figura 2.12 – Filtro híbrido: Passivo paralelo com ativo série.

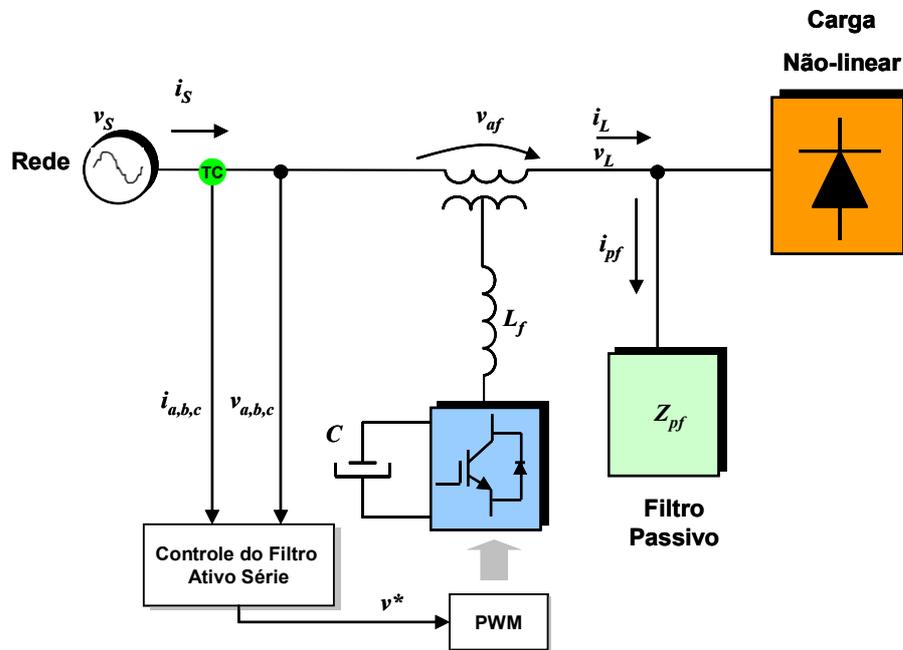


Figura 2.13 – Filtro híbrido: Ativo série / passivo paralelo.

## 2.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi abordado o fenômeno “harmônica”, um dos grandes problemas relacionados à qualidade de energia em ambientes industriais. Buscou-se neste capítulo conceituar o fenômeno, mostrar suas origens, focado principalmente na aplicação de cicloconversores em uma indústria siderúrgica, e mostrar a gravidade da questão em termos dos prejuízos causados e da tendência de crescimento dos efeitos, caso o problema não seja corretamente sanado.

Em seguida buscou-se descrever sucintamente algumas das alternativas mais amplamente utilizadas na mitigação ou compensação dos efeitos indesejados provocados pelas distorções harmônicas. Conforme mencionado, existem diferentes alternativas para a solução dos problemas. Entre elas, destacam-se as soluções baseadas em condicionadores de energia, uma vez que promovem uma proteção de caráter mais definitivo para as cargas sensíveis. Foram explorados os conceitos principais na aplicação de filtragem passiva e algumas das formas de implementação de filtragem ativa, sendo que a combinação de filtros ativos com filtros passivos mostrou-se interessante para sistemas elétricos de alta potência, principalmente quando houver necessidade de realização de atualização ou expansão de sistemas existentes, onde normalmente filtros passivos já encontram-se instalados.

# **3. AVALIAÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

*A caracterização das condições harmônicas à qual um sistema elétrico industrial está submetido é importante para se conhecer o "status" deste sistema frente a possíveis problemas, verificação de desempenho e/ou planejamento de expansões. Procedimentos gerais para a realização destes estudos, principalmente com a realização de medições reais do sistema e parâmetros de avaliação dos resultados encontrados, baseados em recomendação de organismos competentes, são explorados neste capítulo.*

## **3.1 CARACTERIZAÇÃO HARMÔNICA DE UM SISTEMA INDUSTRIAL**

O estudo das condições de distorções harmônicas a que um sistema elétrico industrial está submetido é indicado quando se faz necessária a identificação de problemas existentes em uma planta, que possam prejudicar seu desempenho operacional. Este estudo permite a identificação das causas básicas destes problemas e a realização de sugestões e planejamento de ações para a sua mitigação. Também é comum proceder-se à caracterização harmônica de um sistema quando existe a necessidade de identificação do seu "status" atual, relacionando variáveis elétricas medidas e inferidas a padrões de qualidade de energia referenciados a normas, padrões e recomendações nacionais e internacionais. Essa identificação possibilita, por exemplo, que através de simulações computacionais possam ser conhecidos os efeitos da instalação de novas plantas ou a expansão das existentes, verificando os efeitos para o sistema elétrico na qual estão inseridas ou o simples registro para avaliação de tendências e armazenamento de histórico.

É indicado que o estudo a ser realizado seja estruturado com base em alguns procedimentos que, de forma geral, são descritos a seguir [2]:

1. Determinação do objetivo principal do estudo, importante para manter o foco da investigação.
2. Realização de oscilografias de tensão e corrente do sistema, com o intuito de levantar dados para a caracterização de situações de operação deste sistema e as condições elétricas e de distorção sob as quais opera.

Estas medições oscilográficas possibilitam ainda a implementação de modelos para simulação do problema estudado, utilizando-as de uma forma mais realista, representando melhor a realidade do problema e suprime a necessidade de desenvolvimento de modelos puramente teóricos.

3. Implementação, calibração e a verificação da aderência de um modelo computacional, utilizando-se os dados das medições realizadas, que represente o sistema elétrico em estudo. O modelo implementado deve possibilitar a verificação de situações semelhantes de operação do sistema elétrico e deve possuir ferramentas que permitam a avaliação dos índices de qualidade de energia da localidade, como a realização de *FFT* (“*Fast Fourier Transformer*”), verificação de valores *rms*, valores de pico, defasamentos, etc.
4. Verificação, através de índices limites recomendados por organismos nacionais e internacionais, do desempenho de operação do sistema elétrico em avaliação, com base nos índices levantados nas medições realizadas e nos modelos computacionais elaborados.
5. Desenvolvimento e sugestão de soluções para possíveis problemas, investigação de possíveis interações adversas do sistema, verificação da sensibilidade do sistema a alterações diversas de variáveis ou condições relevantes ao processo.

## **3.2 MEDIÇÕES NO SISTEMA EM ESTUDO**

### **3.2.1 Oscilografias em Sistemas Elétricos Industriais**

Oscilografia de tensões e correntes de um sistema elétrico é uma importante ferramenta para o estudo das condições harmônicas a que o sistema em estudo encontra-se submetido. Oscilografias são caracterizadas pela medição de grandezas de tensão e corrente com alta resolução no domínio do tempo e cujo registro, que tem uma duração predefinida, ocorre em consequência da necessidade de se registrar situações de operação de um determinado sistema ou equipamento.

No passado, o registro oscilográfico era realizado de forma analógica, onde uma agulha acoplada a um galvanômetro desenhava em um papel as oscilações induzidas pelo fenômeno elétrico monitorado. Todavia, atualmente, eventos em sistemas elétricos já podem ser amplamente registrados por oscilógrafos digitais, os quais geram arquivos que permitem desenhar os oscilogramas. Estes arquivos podem ser gerados em formato proprietário, definido pelo fabricante dos equipamentos utilizados para as oscilografias, ou seguir um formato padronizado [10].

Além de superar as limitações da oscilografia analógica, em termos de armazenamento e manutenção da qualidade dos dados, a oscilografia digital permite o desenvolvimento de diversas ferramentas computacionais, as quais auxiliam em análises de perturbações, avaliações de itens relacionados à qualidade de energia, etc.

Podem-se classificar as oscilografias de duas formas:

1. Oscilografias de curta duração ou transitórias: utilizada para o monitoramento de fenômenos transitórios de origem eletromagnética, em geral, para o estudo e manutenção de sistemas de proteção, para detectar um mau funcionamento de equipamentos e para realizar a localização de faltas. Além disso, podem ser utilizadas também para a análise harmônica e outros procedimentos envolvendo processamento de sinais para a análise do sistema e avaliação da qualidade de energia de um determinado sistema, frente a alterações operacionais.

2. Oscilografias de longa duração: responsável pelo monitoramento de oscilações de baixa frequência, de transitórios lentos de origem eletromecânica em geral; e utilizado com o propósito de avaliar o comportamento dinâmico de sistemas elétricos interconectados, principalmente os de grande porte.

A partir dos dados oscilográficos de curta duração, que serão de interesse maior para este trabalho, podem ser realizados alguns estudos importantes na análise de fenômenos, relacionados ao comportamento das harmônicas de um sistema estudado, dentre outras avaliações de itens relacionados à qualidade de energia do mesmo.

Os procedimentos mais comuns de análise de sinais de oscilografias realizados por um especialista, em termos de avaliações de qualidade de energia, devem consistir em verificar:

1. Os valores de tensões e correntes oscilografadas (*rms*, pico-a-pico, médio, etc.);
2. O equilíbrio de tensões e correntes entre as fases no período do evento registrado;
3. A intensidade das distorções harmônicas presentes no sinal;
4. Outros tipos de distúrbio relacionados à qualidade de energia;
5. A existência de oscilações de baixas e altas frequências na potência, nas tensões e nas correntes.

Contudo, algumas dessas informações não são obtidas de forma direta através da simples visualização dos sinais dos oscilogramas, por exemplo as componentes harmônicas. Nestes casos, o especialista deve utilizar ferramentas específicas, ou seja, aplicativos que possibilitem implementar essas funções. Desta forma, portanto, um programa de auxílio à análise de arquivos de oscilografia é necessário e deve possuir:

1. Ambiente gráfico que permita visualizar os sinais contidos na oscilografia;

2. Interface com programas de simulação;
3. Ferramentas que permitam realizar:
  - a. Análise fasorial;
  - b. Análise harmônica;
  - c. Análise do comportamento das harmônicas no tempo;
  - d. Análise do comportamento da impedância no tempo.

### **3.3 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Com a proliferação do uso da eletrônica de potência, principalmente em equipamentos industriais conectados aos sistemas de distribuição de energia, organismos de normalização e agências de regulamentação do setor elétrico, tanto no âmbito nacional quanto no internacional, aumentaram sua preocupação com a proliferação das distorções harmônicas causadas pelos dispositivos de potência. Como consequência, estes organismos reguladores passaram então a recomendar limites de referência para as distorções harmônicas de tensão e corrente, de forma a manter uma boa qualidade da energia nos sistemas de distribuição. Assim, padrões e recomendações têm sido estabelecidos, especificando limites totais e individuais para as distorções harmônicas de tensão e corrente em suas várias frequências, referenciadas à fundamental.

Algumas das recomendações existentes são a seguir citadas:

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, *“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”*, Standard 519 - 1992 [3];
2. PRODIST – ANEEL – Módulo 8. “Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” [11].

Não tendo ainda força de lei, mas em fase de implantação, e aplicados à Rede de Distribuição, temos os Procedimentos de Distribuição – PRODIST. São documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações em elaboração pela ANEEL. Têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos. Em seu Módulo 8 estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - *QEE*, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, e que devem ser observados por:

- a) Unidades consumidoras com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) Produtores de energia;
- c) Distribuidoras;
- d) Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica.
- e) Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI, exceto o que estiver disposto em Resolução específica.

Neste trabalho, será adotado o PRODIST-Módulo 8, como referência na avaliação de índices relacionados à tensão. Ao que interessa neste trabalho, definido o *PCC* e em consequência o nível de tensão de avaliação, o PRODIST sugere limites para harmônicas (globais e individuais) nas classes de tensão avaliada. Por exemplo, para tensões inferiores a 69KV, que será o objeto de estudo deste trabalho, a recomendação estabelece um limite máximo para a distorção harmônica total de tensão de 6%, sendo que esse valor não deve ser excedido em nenhum ponto do sistema elétrico.

Algumas considerações são relacionadas pelo PRODIST na realização de medições de tensão para avaliação de harmônicas, e são relevantes suas considerações:

- ✓ Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.
- ✓ O espectro das harmônicas a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ( $h_{min} = 25$ ).
- ✓ Os valores de referência para as distorções harmônicas totais são indicados na tabela 3.1 a seguir. Estes valores são utilizados como referência do planejamento do sistema elétrico em termos da *QEE*.

Tabela 3.1 – Valores de referência das distorções harmônicas totais  
(em porcentagem da tensão fundamental).

| <b>Tensão nominal do Barramento</b>           | <b>Distorção Harmônica Total de Tensão (THD) [%]</b> |
|---|--|
| $V_N \leq 1kV$                                | 10   |
| $1kV < V_N \leq 13,8kV$                       | 8  |
| <b><math>13,8kV &lt; V_N \leq 69kV</math></b> | <b>6</b>   |
| $69kV < V_N \leq 138kV$                       | 3  |

Também devem ser obedecidos os valores das distorções harmônicas individuais, indicados na tabela 3.2 a seguir:

Tabela 3.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

| Ordem Harmônica            | Distorção Harmônica Individual de Tensão [%] |                         |   |                         |     |
|----------------------------|--|-------------------------|---|-------------------------|-----|
|                            | $V_N \leq$                                   | $1kV < V_N \leq 13,8kV$ | <b><math>13,8kV &lt; V_N \leq 69kV</math></b> | $69kV < V_N \leq 138kV$ |     |
| Ímpares não múltiplas de 3 | 5  | 7.5                     | 6   | <b>4.5</b>              | 2.5 |
|                            | 7  | 6.5                     | 5   | <b>4</b>                | 2   |
|                            | 11   | 4.5                     | 3.5   | <b>3</b>                | 1.5 |
|                            | 13   | 4                       | 3   | <b>2.5</b>              | 1.5 |
|                            | 17   | 2.5                     | 2   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | 19   | 2                       | 1.5   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | 23   | 2                       | 1.5   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | 25   | 2                       | 1.5   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | >25  | 1.5                     | 1   | <b>1</b>                | 0.5 |
| Ímpares múltiplas de 3     | 3  | 6.5                     | 5   | <b>4</b>                | 2   |
|                            | 9  | 2                       | 1.5   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | 15   | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
|                            | 21   | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
|                            | >21  | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
| Pares                      | 2  | 2.5                     | 2   | <b>1.5</b>              | 1   |
|                            | 4  | 1.5                     | 1   | <b>1</b>                | 0.5 |
|                            | 8  | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
|                            | 10   | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
|                            | 12   | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |
|                            | >12  | 1                       | 0.5   | <b>0.5</b>              | 0.5 |

Onde a terminologia adotada é vista na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Terminologia

| Identificação da Grandeza                           | Símbolo            |
|---|--------------------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | $DITH\%$           |
| Distorção Harmônica total de tensão                 | $DTT\%$ ou $THD\%$ |
| Tensão harmônica de ordem h                         | $V_h$              |
| Ordem harmônica                                     | $H$                |
| Ordem harmônica máxima                              | $H_{m\acute{a}x}$  |
| Ordem harmônica mínima                              | $H_{m\acute{i}n}$  |
| Tensão fundamental medida                           | $V_1$              |

Consideram-se as seguintes equações:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (3.1)$$

$$DTT = THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3.2)$$

A recomendação *ANEEL*, no entanto, não estabelece valores de referência para harmônicas de corrente, que será de interesse avaliar no âmbito deste trabalho. Para tal, faz-se referência à recomendação IEEE 519 – “*IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters*”. Nesta recomendação, os limites para as harmônicas de corrente são baseadas na relação entre a fundamental da corrente de carga ( $i_L$ ) e a corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum (*PCC*). Os limites de distorção irão diferir de acordo com o nível de corrente de curto-circuito ( $I_{CC}$ ). Obviamente, quanto maior  $I_{CC}$  com relação a  $I_L$ , maiores serão os limites admissíveis, pois afetarão menos a tensão no *PCC*.

A Tabela a seguir mostra os níveis recomendados pela IEEE 519 para tensão inferior a 69kV, de interesse específico neste trabalho.

Tabela 3.4 – Limites das distorções harmônicas de corrente ( $I_h$ ) em % de  $I_L$ , para tensões inferiores a 69kV.

| $V_N \leq 69kV$ |          |                  |                  |                  |             |            |
|-----------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| $I_{CC}/I_L$    | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | <i>THD</i> |
| <20             | 4.0      | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3         | 5.0        |
| 20-50           | 7.0      | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5         | 8.0        |
| 50-100          | 10.0     | 4.5              | 4.0              | 1.5              | 0.7         | 12.0       |
| 100-1000        | 12.0     | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0         | 15.0       |
| > 1000          | 15.0     | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4         | 20.0       |

As tabelas apresentadas ressaltam os valores recomendados por cada norma estudada para os casos de interesse deste trabalho.

### **3.4 CONCLUSÕES**

Neste capítulo foram abordados alguns procedimentos gerais para a realização de estudos para avaliação das condições harmônicas a que um sistema elétrico está submetido. Foram abordados também alguns índices para avaliação de valores de distorção em um sistema, baseando-se no PRODIST – ANEEL - Módulo 8 e recomendação IEEE 519. A interpretação destas normas foi realizada ressaltando-se valores que serão utilizados para avaliação de um sistema com nível de tensão inferior a 69kV e que será abordado no próximo capítulo.

# **4. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM LAMINADOR SIDERÚRGICO**

*Neste capítulo será apresentado e avaliado o sistema elétrico no qual está inserido um processo de laminação dentro de uma indústria siderúrgica, processo esse potencial gerador de distorções harmônicas em um sistema de distribuição de energia. Através de medições oscilográficas de tensão e corrente, realizadas em diferentes situações de operação deste laminador, serão apresentadas avaliações sobre algumas das condições nas quais atualmente opera o sistema elétrico em que esta planta encontra-se inserida. Tais avaliações serão referenciadas em relação aos limites de distorções harmônicas discutidos no capítulo anterior, recomendados por organismos nacionais e internacionais. Será realizada também uma avaliação de desempenho do sistema de compensação harmônica, filtragem passiva, utilizado pelo sistema em estudo.*

## **4.1 SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR**

A ArcelorMittal Tubarão é uma indústria siderúrgica ligada ao grupo ArcelorMittal e líder mundial na produção de placas e bobinas de aço. Em uma indústria siderúrgica, equipamentos conhecidos como Altos Fornos são carregados de coque e sinter (carga metálica) através de correias. Através de um processo em que o ar quente é insuflado nas suas partes inferiores, indo ao encontro da carga de sinter e do coque, ocorre uma série de reações químicas de redução e fusão, produzindo o ferro gusa que é a principal matéria prima do aço.

Através de carros torpedo o gusa é levado à Aciaria para dessulfuração no próprio carro torpedo e para transformação em aço líquido através do refino (descarburização e fusão) do gusa através de sopro de oxigênio. Ainda na Aciaria ocorre o refino secundário do aço líquido, que é o ajuste de sua composição química e temperatura antes do molde e solidificação em forma de placa.

No Lingotamento Contínuo o aço líquido já refinado passa por um processo de resfriamento controlado, vazado em molde, solidificando em formas de placa previamente definidas através de um sistema totalmente automatizado, gerando o primeiro produto de venda da ArcelorMittal Tubarão.

Parte da produção de placas é enviada para o Laminador de Tira a Quente (*LTQ*), onde são reaquecidas e através de um processo de desbaste e deformações sucessivas ao longo da linha de laminação atingem a sua espessura pré-definida e são bobinadas, gerando o outro produto final de venda da ArcelorMittal Tubarão. A figura 4.1 ilustra o fluxograma do processo produtivo atual da empresa.

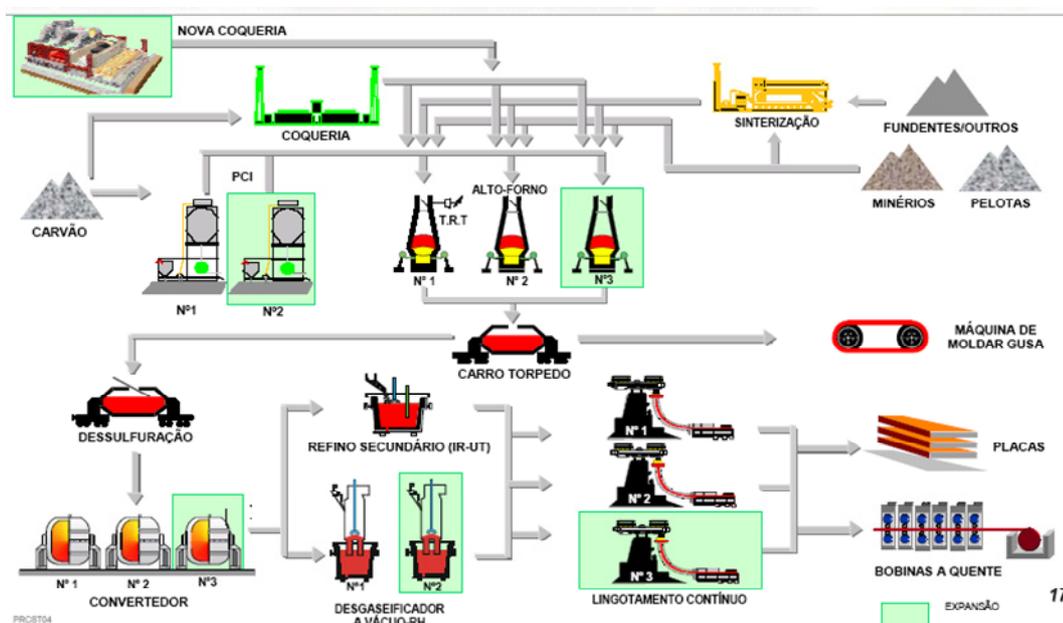


Figura 4.1 – Fluxograma do processo siderúrgico.

Objetivando atender ao consumo e a geração interna, a ArcelorMittal Tubarão possui um sistema de distribuição de energia em 138 kV e 13,8 kV que atende a todas as

áreas produtivas. A habilidade de produzir é dependente da adequação e continuidade do fornecimento de energia e as interrupções deste fornecimento podem ser avaliadas diretamente em termos da perda de produção [34].

Todo este sistema elétrico está interligado ao sistema brasileiro através da distribuidora ESCELSA, em 138kV, por duas linhas de transmissão que estão conectadas à subestação de Pitanga. No lado Tubarão, cada uma destas linhas está conectada a duas das três Estações de Recebimento de energia, *ER1* e *ER2*, estações de chaveamento com barramento duplo, onde todas as cargas e gerações internas são conectadas.

O sistema de distribuição é composto de 3 subestações em 138 kV com barra dupla, 6 subestações geradoras e 14 subestações abaixadoras conectadas em 138kV, que alimentam todas as cargas que constituem o processo produtivo. Treze subestações distribuem energia em 13,8kV e uma em 34,5kV. Cada uma destas subestações atende a uma determinada área produtiva da empresa, sendo elas:

- ✓ Subestação Utilidades (UTIL) alimenta o sistema de distribuição de combustíveis, Coqueria e os auxiliares das centrais termoelétricas 1 e 2.
- ✓ Subestações 1 e 2 da Sinterização (SINTER) atendem aos sistemas de distribuição de minérios e carvões e ao processo de Sinterização.
- ✓ Subestações 1, 2 e 3 do Fracionamento de Ar (FOX) atendem a toda a produção de oxigênio, nitrogênio e argônio interno necessário ao consumo. Na subestação 2 está o segundo maior motor de toda a empresa, chamado de CP101. Este é o responsável pela compressão do ar necessário à planta 3 de Fracionamento do Ar.
- ✓ Subestações 1 e 2 do LTQ atendem a todo o processo de Laminação de Tiras a Quente (LTQ). A subestação 1 em 34,5 kV é responsável pela alimentação dos 8 grandes motores síncronos acionados por cicloconvertidores, mais um banco de capacitor de 45 MVar.
- ✓ Subestações 1 e 2 da Aciaria (ACIA) atendem aos Convertedores e aos Lingotamentos Contínuos.

- ✓ Subestações 1 e 2 dos Altos Fornos (AF) fornecem energia para todos os Altos Fornos. Na subestação 1 está o maior motor síncrono de toda a empresa, chamado de Moto Soprador. Este é responsável pelo sopro de ar na entrada do Alto Forno 2. A turbina de controle de pressão, também chamada de TRT, está ligada no nível de 13,8kV na subestação 2.
- ✓ Subestação Rede de Uso Geral (RUG) é responsável pela alimentação da iluminação de ruas e avenidas, bem como é responsável pelo fornecimento de energia para escritórios.
- ✓ Subestação do Condicionamento (COND) alimenta a parte da empresa responsável pelo acabamento do produto antes da entrega e por parte da alimentação da área administrativa da empresa.

Todas as seis termelétricas G1, G2, G3, G4, G5 e G6 estão interligadas ao sistema de 138 kV através de transformadores exclusivos, onde, no caso dos geradores 3, 4, 5 e 6, tem suas cargas auxiliares conectadas aos terciários de seus transformadores elevadores.

A grande importância da produção da energia elétrica é a reciclagem dos gases oriundos da fabricação do aço. O ganho ambiental é indiscutível, visto que evita a exploração de recursos energéticos, como hidrelétricas e termelétricas consumidoras de combustíveis naturais retirados da natureza. Os gases resultantes dos processos de produção dos Altos-Fornos (*BFG* – “*Blast Furnace Gás*”), da Coqueria (*COG* – “*Coke Oven Gás*”) e da Aciaria (*LDG* – “*LD Gás*”) são utilizados na produção de energia por 4 termelétricas da ArcelorMittal Tubarão. As unidades geradoras 5 e 6 produzem energia elétrica através do aproveitamento do calor gerado na empresa SOL coqueria.

Outra fonte de Energia Elétrica é a *TRT* (“*Top Recovery Turbine*”). Ao contrário do que ocorre nas termelétricas, o gás não é queimado. A *TRT* é uma turbina que recebe o gás do Alto-Forno e faz com que esse perca pressão. Essa queda de pressão permite a geração de energia elétrica, através da expansão dos gases. Dentro deste contexto de um sistema de 280MW de carga instalada e de uma geração de 420MW de média, existe a obrigação de uma alimentação confiável e



# LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE

## CAPACIDADE NOMINAL - 2.000.000 t/ano

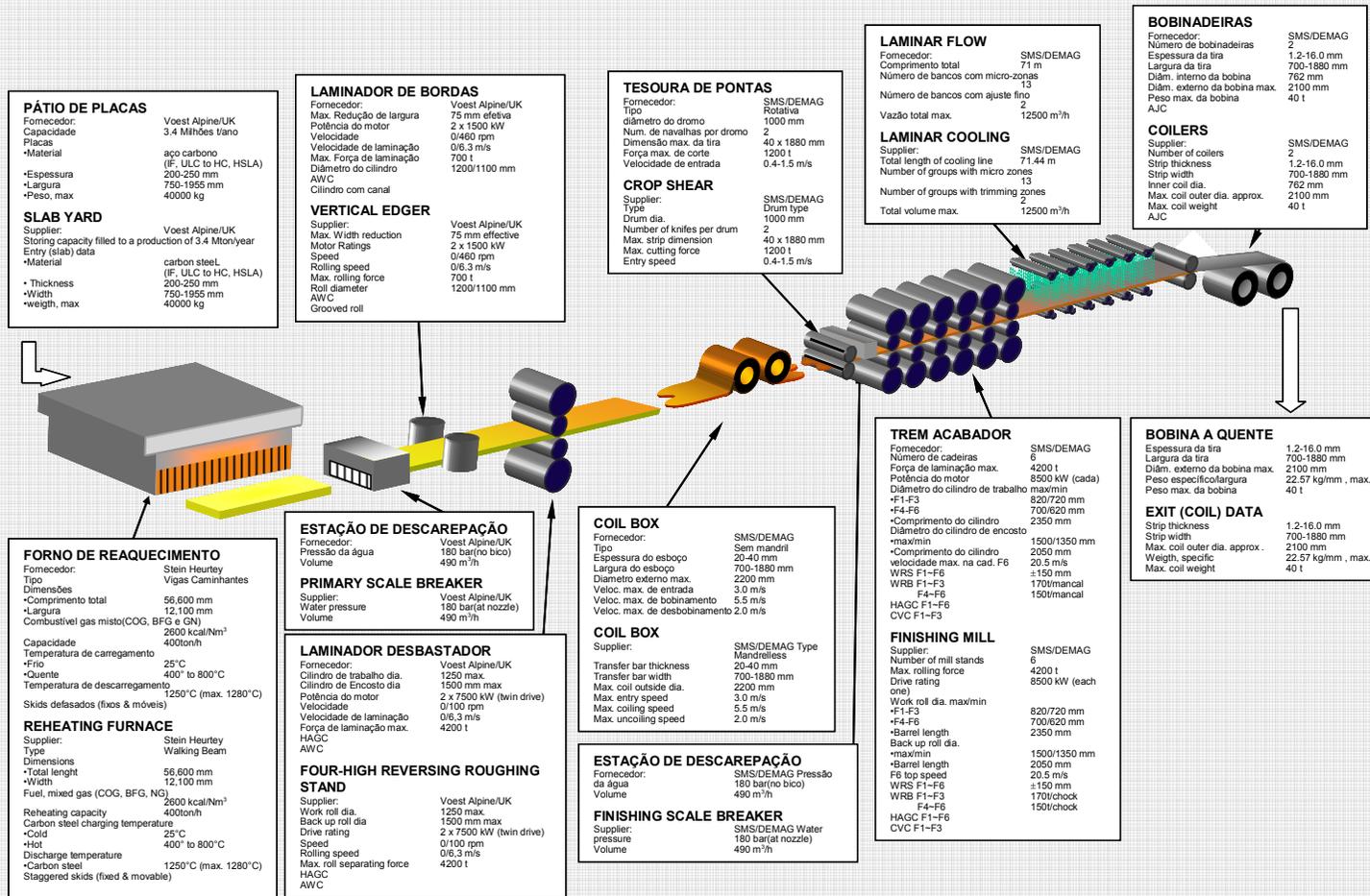


Figura 4.3 – Representação esquemática do processo de laminação.

A figura 4.4 mostra em maior detalhe o diagrama unifilar da subestação do laminador. Percebe-se que, através deste barramento são alimentados os conjuntos cicloconversores (8X) e também o sistema de filtragem harmônica, uma composição de filtros passivos, responsáveis pela compensação harmônica e de reativos do sistema.

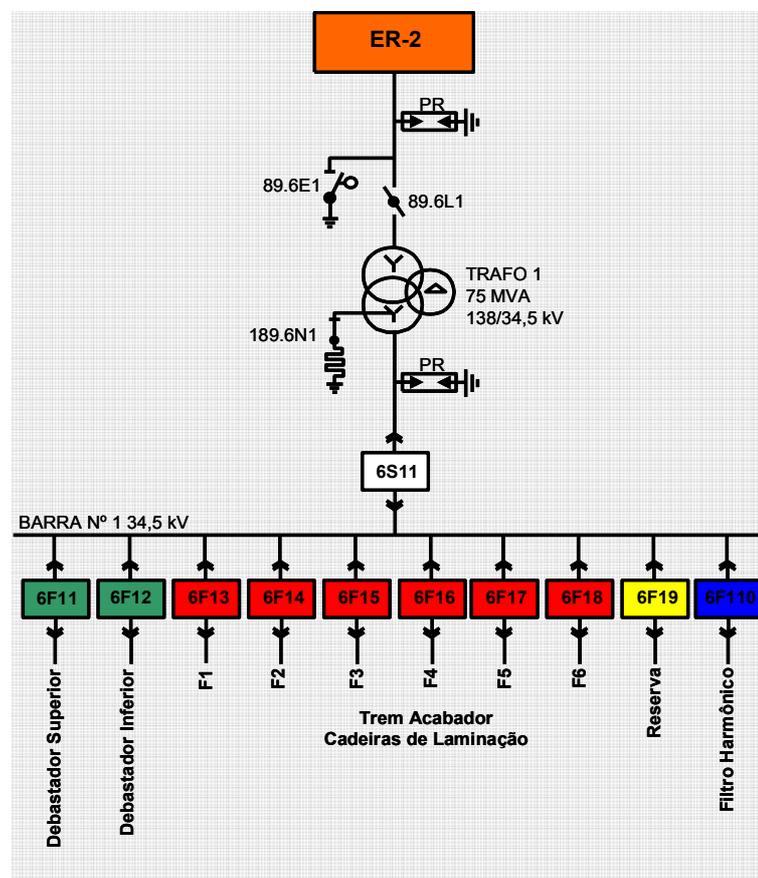


Figura 4.4 – Unifilar da subestação do laminador.

## 4.2 CONTRATO DE CONEXÃO

De forma a regular a conexão do Sistema de Distribuição da indústria ao Sistema de Distribuição da concessionária local, estabelecendo direitos e obrigações de ambas as partes em função da interligação existente, as empresas celebram periodicamente um contrato [12,35].

Deste contrato, do ponto de vista da qualidade de energia, algumas definições merecem destaque, iniciando pelas características técnicas da conexão. O título estabelecido entre as empresas preconiza que a conexão seja em corrente alternada trifásica e equilibrada, na frequência de 60 Hz mais ou menos 1,5% e na tensão de 138kV entre fases mais 5% ou menos 5% [35].

Especificamente no artigo VIII, referente à Qualidade de Energia, são definidos limites a serem observados no ponto de conexão. No âmbito deste trabalho, serão de interesse os requisitos relativos aos índices de qualidade de energia referentes às distorções harmônicas de tensão e corrente.

Apesar do controle dos índices de qualidade de energia ser realizado em um âmbito global, no ponto de conexão com o sistema, e realizado tanto pela indústria quanto pela distribuidora local de distribuição de energia, a avaliação de pontos internos ao sistema de distribuição de energia elétrica da planta torna-se relevante para a sua operação. Avaliações desta natureza são explicadas pelo fato de que as correntes harmônicas fluem da fonte geradora de harmônicas para outras cargas pelo sistema de distribuição da planta. Sendo assim, tais avaliações podem contribuir significativamente para a identificação de anomalias localizadas e sua mitigação, evitando que se tornem problemas de um âmbito global, caso o efeito de vários desses se adicionem.

Os pontos avaliados devem ser aqueles com probabilidade maior de gerar impacto no sistema elétrico com relação aos índices de qualidade de energia durante a operação das plantas. Esta avaliação permite o controle da qualidade de energia distribuída internamente na indústria e evita assim que a sistema de produção sofra as conseqüências negativas de distúrbios de energia gerados internamente, mesmo

que, em um âmbito global, os requisitos de qualidade firmados entre a distribuidora de energia e a empresa estejam atendidos no *PCC*.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA DE ENERGIA DO LAMINADOR**

A caracterização das condições de distorção harmônica a que o sistema de distribuição de energia do laminador está submetido foi estruturada com base nos procedimentos gerais descritos no Capítulo 3, seção 3.1.

#### **4.3.1 Medições no Sistema**

Para este trabalho foram realizadas oscilografias de tensão e corrente na subestação do *LTQ*, utilizando-se um equipamento registrador, além de outros instrumentos, detalhados no Anexo 1 deste trabalho. As medições foram realizadas no secundário do transformador no nível de tensão de 34,5kV, como será detalhado.

##### **4.3.1.1 Variáveis Medidas**

O monitoramento ideal deve ser realizado em vários pontos e de forma simultânea. Devido, no entanto, à disponibilidade limitada de instrumentos de medição, este procedimento não pôde ser adotado. As medições foram assim, realizadas de forma a possibilitar a caracterização de todas as condições de operação do sistema, e de forma a permitir também se calcular, através dos dados medidos, demais variáveis de interesse.

Foram medidas tensões de linha e correntes de linha. As tensões medidas serão representadas como sendo  $v_{rs}, v_{st}^{(1)}$ , distinguindo as diferentes tensões de linha medidas.

---

<sup>1</sup> Os índices *r, s e t*, são padronizados neste texto como referência a tensões e correntes medidas no circuito original. Desta forma é possível uma diferenciação entre tensões e correntes provenientes de simulação, que serão tratadas com os índices *a, b e c*.

Padroniza-se desta forma também conforme a nomenclatura da documentação utilizada no sistema elétrico estudado.

Nos casos em que as tensões apresentadas forem as de fase–neuro tal situação será destacada. A tensão de linha  $v_{tr}$  foi calculada e será caracterizada posteriormente.

As variáveis registradas foram aquelas definidas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis registradas na Subestação do Laminador.

| Item | Variável Medida   | Simbologia |
|------|---|------------|
| 1    | Corrente da fase R no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ    | $i_r$      |
| 2    | Corrente da fase S no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ    | $i_s$      |
| 3    | Corrente da fase R na entrada do conjunto de filtros passivos | $i_{rF}$   |
| 4    | Corrente da fase S na entrada do conjunto de filtros passivos | $i_{sF}$   |
| 5    | Tensão entre as fases R e S - Tensão de linha R-S             | $v_{rs}$   |
| 6    | Tensão entre as fases S e T - Tensão de linha S-T             | $v_{st}$   |

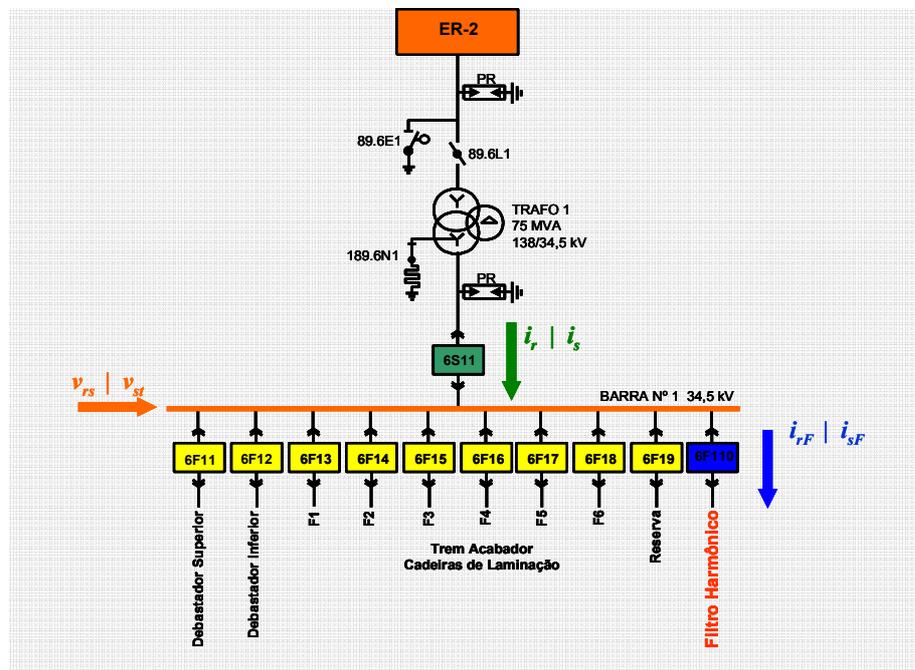


Figura 4.5 – Variáveis medidas na Subestação do Laminador.

A figura 4.5 ilustra de forma simplificada a localização das variáveis medidas.

#### 4.3.1.2 Ajustes no dispositivo Registrador

Para a perfeita aquisição dos dados, fez-se necessário o ajuste das escalas do registrador, principalmente devido à necessidade de realização das medições, no secundário dos  $TP$  e dos  $TC$  existentes no painel. O registrador oscilógrafo é desta forma ajustado para já apresentar os valores tanto de tensão quanto os de corrente em seus valores de linha.

Além dos ajustes de escala, foram necessários ajustes da forma de aquisição dos dados, permitindo sua perfeita reconstituição, dentro de parâmetros pré-estabelecidos. Alguns dos ajustes que se fizeram necessários são destacados a seguir. Ressalta-se que estes ajustes dependeram das possibilidades dadas pelo registrador utilizado.

- ✓ Tempo de amostragem ( $T_s$ ):  $50\mu\text{s}$ ;
- ✓ Filtro “*anti-aliasing*”<sup>2</sup>:  $5\text{kHz}$ .

A partir destes ajustes é possível a verificação, sem interferências, de faixa considerável para estudos de comportamentos de correntes e tensões harmônicas, dentro do que preconizam as recomendações relativas ao assunto. Os ajustes do registrador, além de relevantes para a verificação da correta aquisição dos dados medidos, também serão importantes quando for abordada a utilização dos dados medidos em simulações que serão discutidas posteriormente.

#### 4.3.1.3 Variáveis Calculadas

Como mencionado anteriormente, não foi possível a medição de todas as variáveis consideradas relevantes neste trabalho, por limitação de instrumentos. Procedeu-se então o cálculo das demais variáveis de interesse. Estas variáveis, aqui

---

<sup>2</sup> Filtro “*anti-aliasing*”: Uma vez que frequências acima da frequência de Nyquist,  $f_N=2/T_s$ , não serão bem amostradas para um determinado valor de  $T_s$ , é comum utilizar filtros a fim de cortar tais frequências e assim evitar o falseamento (“*aliasing*”) do sinal [13].

representadas com a indicação do índice (\*), são mostradas na tabela 4.2, onde também é apresentada a formulação utilizada para o cálculo destas variáveis.

Tabela 4.2 - Variáveis calculadas através das variáveis medidas.

| <i>Equação</i> | <i>Variável Calculada</i>                                     | <i>Cálculo</i>          | <i>Variável</i> |
|----------------|---|-------------------------|-----------------|
| (4.1)          | Corrente da fase T no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ    | $= - (i_r + i_s)$       | $i_t^*$         |
| (4.2)          | Corrente da fase T na entrada do conjunto de filtros passivos | $= - (i_{rF} + i_{sF})$ | $i_{tF}^*$      |
| (4.3)          | Tensão entre as fases T e R - Tensão de linha T-R             | $= - (v_{rs} + v_{st})$ | $v_{tr}^*$      |

#### 4.4 AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES

Definindo-se para este estudo o ponto de acoplamento comum (*PCC*) como sendo o secundário do transformador de 138kV/34,5kV e de acordo com seção 3.3 deste trabalho, considerar-se-á o limite de 6% para a distorção total de tensão, sendo que as distorções individuais de tensão deverão também respeitar os limites impostos pela tabela 3.2.

A corrente de curto-circuito (calculada por simulação conforme Anexo 2) neste ponto é de 11,23kA. É assumida como máxima corrente fundamental, aquela medida em condição de plena carga no secundário do mesmo transformador, tendo essa apresentado um valor de 730A. Assim, tem-se que:

$$I_{cc}/I_L = 11.23kA/730 \leq 20 \quad (4.4)$$

Portanto, conforme Tabela 3.4, o valor da *THD* não deve exceder o valor de 5.0%, além do limite máximo de 3% para as harmônicas individuais.

As condições de operação do processo de laminação influenciam no comportamento do *SEP* no qual este se encontra inserido. O laminador opera ou de forma não-simultânea, que corresponde à laminação de uma só placa, ou seja, apenas o

conjunto de laminadores desbastadores ou cadeiras de laminação em operação; ou de forma simultânea. A forma seqüencial corresponde à laminação de mais de uma placa ao mesmo tempo, estando as placas posicionadas em diferentes partes do processo, de forma que o laminador desbastador e cadeiras de laminação, ver figura 4.3, operem laminando juntos. Além das diferentes formas citadas, o laminador pode também estar em condições de operação com seus motores rodando, mas sem estar efetivamente laminando (em espera).

Para caracterização destas diferentes situações de operação do laminador, no que tange o seu sistema de distribuição de energia elétrica, foram realizadas medições para as diferenciadas condições do processo, de forma a evidenciar as diferenças envolvidas e o impacto de cada condição de operação sobre o sistema elétrico em estudo.

#### 4.4.1 Tensões

Como mencionado, serão apresentadas as tensões medidas,  $v_{rs}$ ,  $v_{st}$  e calculada  $v_{tr}^*$ , para diferentes situações de operação da planta. Será também apresentado a seqüência de fase do circuito trifásico <sup>(3)</sup> avaliado.

As tensões de fase, derivadas das tensões de linha  $v_{rs}$ ,  $v_{st}$  e  $v_{tr}^*$ , são equacionadas a partir das seguintes expressões:

$$v_{rn} = \frac{1}{3} \times v_{rs} + \frac{1}{3} \times v_{rt} = V_{qs}^s \quad (4.5)$$

$$V_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} \times v_{ts} \quad (4.6)$$

Das equações acima tem-se que:

---

<sup>3</sup> Seqüência de fase de um circuito trifásico é a ordem em que tensões ou correntes atingem os seus máximos [14]. O Diagrama Fasorial possibilita diferenciar magnitude e ângulo de uma determinada medição.

$$v_{sn} = -\frac{1}{2} \times V_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{ds}^s \quad (4.7)$$

$$v_{tn} = -\frac{1}{2} \times V_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{ds}^s \quad (4.8)$$

As tensões  $V_{ds}^s$  e  $V_{qs}^s$  representam tensões no referencial estacionário, formado pelos eixos  $d$  e  $q$ .

#### 4.4.1.1 Seqüência de Fase

A seqüência de fase observada para o sistema elétrico em questão foi a seqüência positiva  $RST$ . A figura a seguir ilustra o Diagrama Fasorial do sistema estudado.

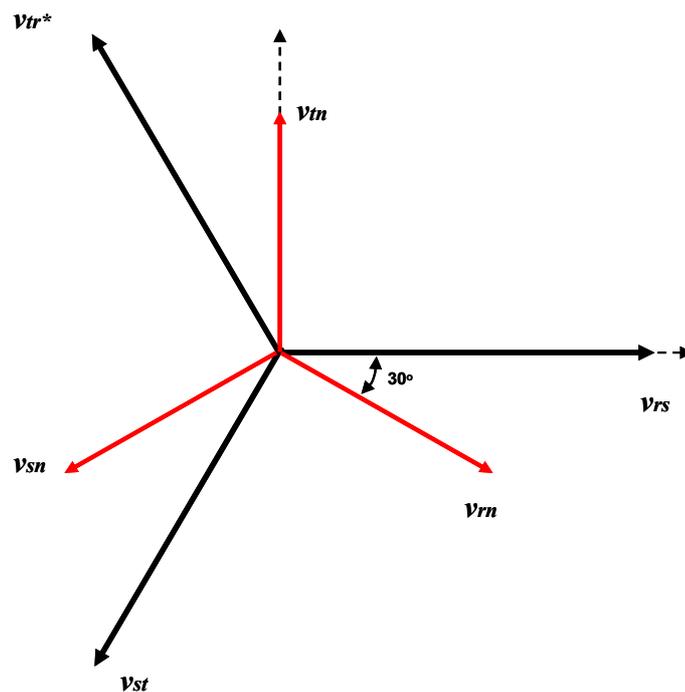


Figura 4.6 – Diagrama de Fase: Seqüência Positiva  $RST$  da tensão.

#### 4.4.1.2 Medição de Tensão 01 (MT01): Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação rodando sem laminar.

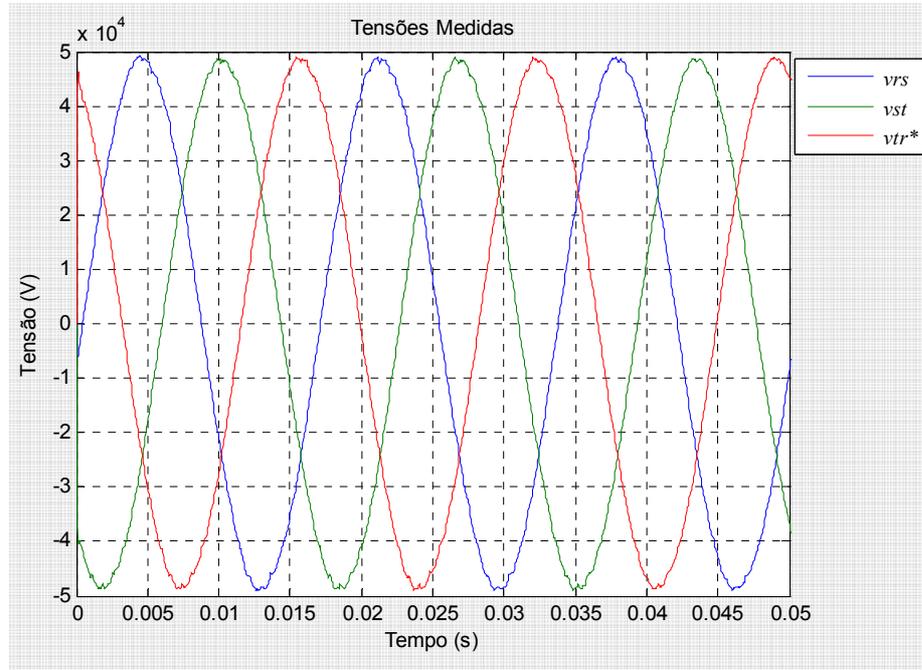
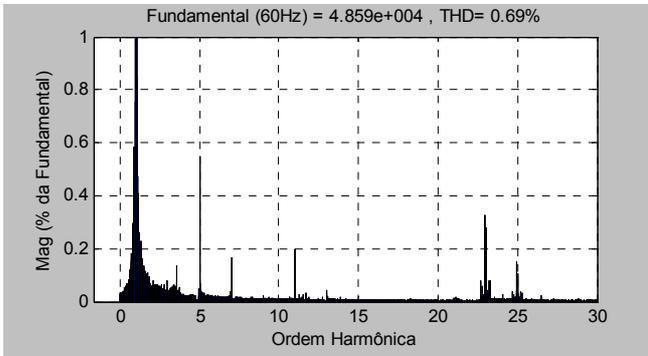


Figura 4.7 – Tensões medidas no barramento de entrada.

MT01: Laminador com motores rodando sem laminar

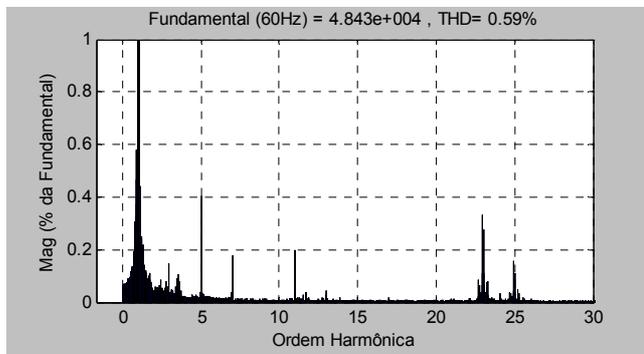
Tabela 4.3 – Valores *RMS* – MT01.

| <b>Valores <i>RMS</i></b> |          |          |          |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| $v_{rs}$                  | 34,36 kV | $v_{rn}$ | 19,84 kV |
| $v_{st}$                  | 34,25 kV | $v_{sn}$ | 19,77 kV |
| $v_{tr}$                  | 34,28 kV | $v_{tn}$ | 19,79 kV |



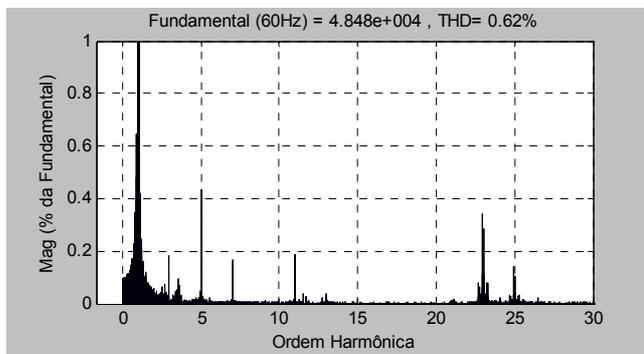
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |       |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|-------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.03 | <b>h18</b> | 0.00  |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01  |
| <b>h2</b>                            | 0.06   | <b>h11</b> | 0.20 | <b>h20</b> | 0.00  |
| <b>h3</b>                            | 0.08   | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.01  |
| <b>h4</b>                            | 0.03   | <b>h13</b> | 0.05 | <b>h22</b> | 0.00  |
| <b>h5</b>                            | 0.55   | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.28  |
| <b>h6</b>                            | 0.02   | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.001 |
| <b>h7</b>                            | 0.17   | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.11  |
| <b>h8</b>                            | 0.01   | <b>h17</b> | 0.01 |            |       |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.02 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.05   | <b>h11</b> | 0.20 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.15   | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.02   | <b>h13</b> | 0.05 | <b>h22</b> | 0.00 |
| <b>h5</b>                            | 0.41   | <b>h14</b> | 0.00 | <b>h23</b> | 0.28 |
| <b>h6</b>                            | 0.02   | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.00 |
| <b>h7</b>                            | 0.18   | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.11 |
| <b>h8</b>                            | 0.01   | <b>h17</b> | 0.02 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.06   | <b>h11</b> | 0.19 | <b>h20</b> | 0.00 |
| <b>h3</b>                            | 0.18   | <b>h12</b> | 0.00 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.01   | <b>h13</b> | 0.04 | <b>h22</b> | 0.00 |
| <b>h5</b>                            | 0.44   | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.29 |
| <b>h6</b>                            | 0.01   | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.00 |
| <b>h7</b>                            | 0.17   | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.11 |
| <b>h8</b>                            | 0.01   | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(c)

Figura 4.8 – Espectros das harmônicas de tensão – MT01: (a)  $v_{rs}$ , (b)  $v_{st}$ , (c)  $v_{tr}^*$ .

#### 4.4.1.3 Medição de Tensão 02 (MT02): Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação com motores rodando sem laminar.

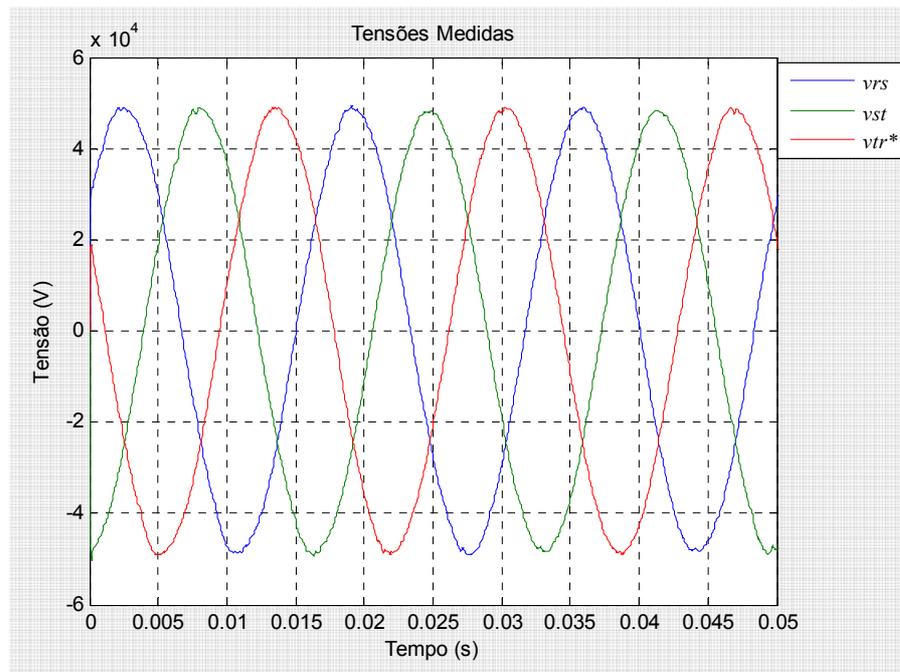
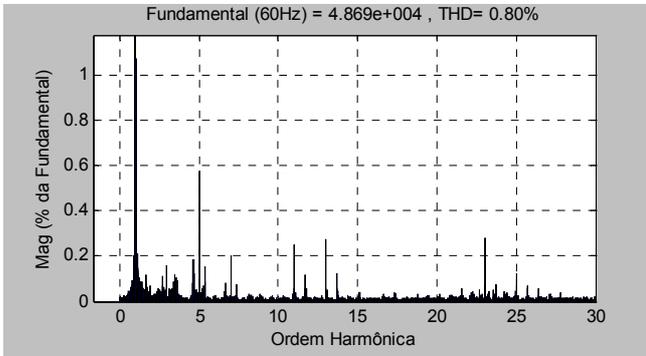


Figura 4.9 – Tensões medidas no barramento de entrada.

MT02: Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação rodando sem laminar.

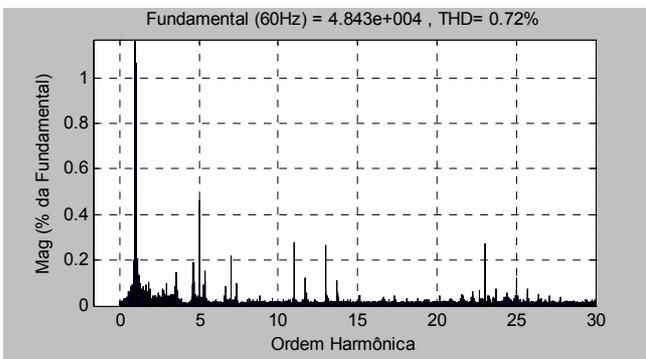
Tabela 4.4 – Valores RMS – MT02.

| <b>Valores rms</b> |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $v_{rs}$           | 34,44 kV | $v_{rn}$ | 19,88 kV |
| $v_{st}$           | 34,25 kV | $v_{sn}$ | 19,77 kV |
| $v_{tr}$           | 34,39 kV | $v_{tn}$ | 19,85 kV |



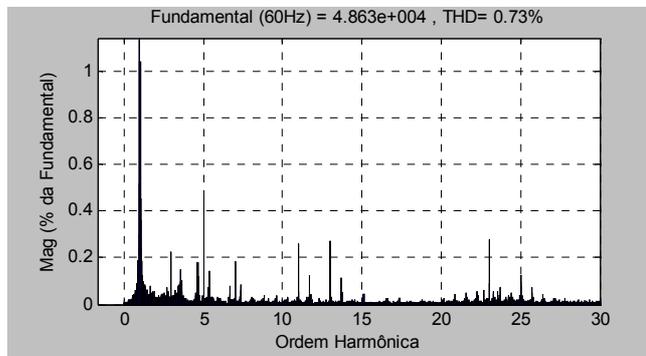
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.02 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.00 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.02   | <b>h11</b> | 0.26 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.16   | <b>h12</b> | 0.00 | <b>h21</b> | 0.00 |
| <b>h4</b>                            | 0.01   | <b>h13</b> | 0.29 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 0.02   | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.30 |
| <b>h6</b>                            | 0.02   | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.00 |
| <b>h7</b>                            | 0.20   | <b>h16</b> | 0.00 | <b>h25</b> | 0.10 |
| <b>h8</b>                            | 0.01   | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.02 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.00 | <b>h19</b> | 0.00 |
| <b>h2</b>                            | 0.02  | <b>h11</b> | 0.27 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.11  | <b>h12</b> | 0.00 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.29 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 0.45  | <b>h14</b> | 0.00 | <b>h23</b> | 0.30 |
| <b>h6</b>                            | 0.00  | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.21  | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.09 |
| <b>h8</b>                            | 0.01  | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.00 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.00 |
| <b>h2</b>                            | 0.00  | <b>h11</b> | 0.25 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.23  | <b>h12</b> | 0.00 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.28 | <b>h22</b> | 0.00 |
| <b>h5</b>                            | 0.46  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.30 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.17  | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.11 |
| <b>h8</b>                            | 0.00  | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(c)

Figura 4.10 – Espectros das harmônicas de tensão – MT02: (a)  $v_{rs}$ , (b)  $v_{st}$ , (c)  $v_{tr}^*$ .

#### 4.4.1.4 Medição de Tensão 03 (MT03): Laminadores desbastadores rodando, sem laminar / cadeiras de laminação laminando.

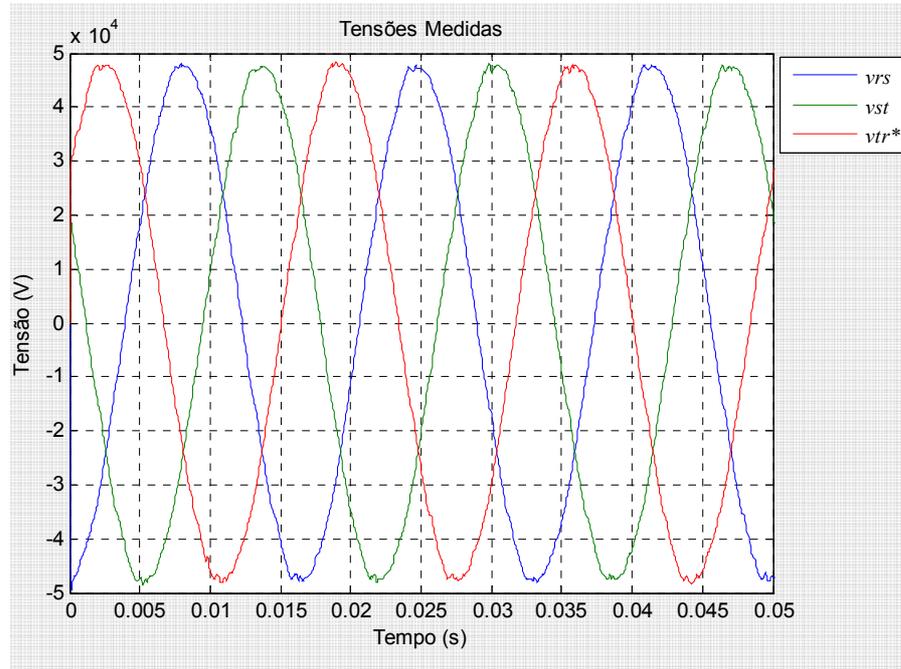
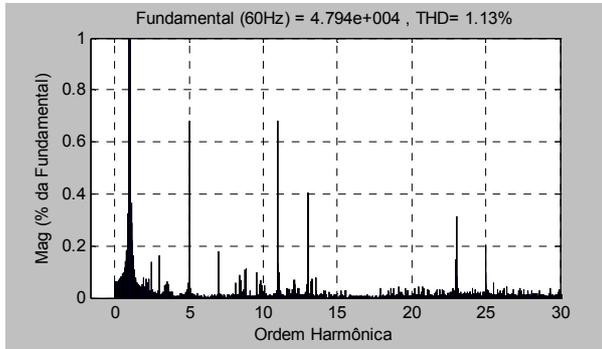


Figura 4.11 – Tensões medidas no barramento de entrada.

MT03: Laminadores desbastadores rodando sem laminar / cadeiras de laminação laminando.

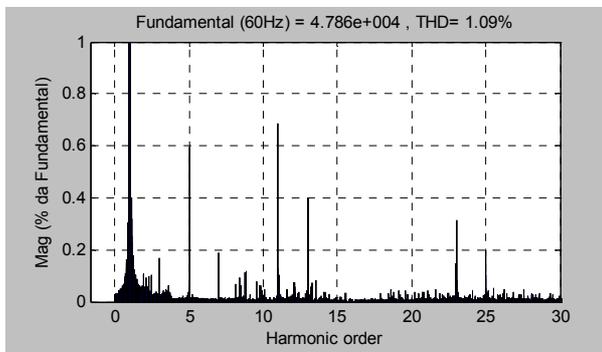
Tabela 4.5 – Valores *RMS* – MT03.

| <b>Valores rms</b> |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $v_{rs}$           | 33,90 kV | $v_{st}$ | 19,57 kV |
| $v_{st}$           | 33,84 kV | $v_{tr}$ | 19,53 kV |
| $v_{tr}$           | 33,95 kV | $v_{rs}$ | 19,60 kV |



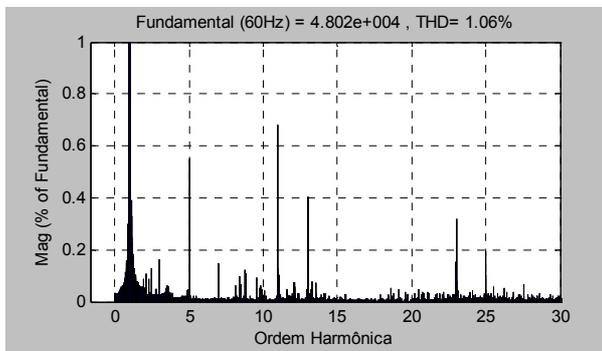
| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.02  | <b>h11</b> | 0.68 | <b>h20</b> | 0.00 |
| <b>h3</b>                            | 0.16  | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.00  | <b>h13</b> | 0.40 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 0.68  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.31 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.18  | <b>h16</b> | 0.00 | <b>h25</b> | 0.20 |
| <b>h8</b>                            | 0.01  | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.02 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.04  | <b>h11</b> | 0.68 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.17  | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.00 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.40 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 0.60  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.31 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.19  | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.20 |
| <b>h8</b>                            | 0.01  | <b>h17</b> | 0.00 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.01 |
| <b>h2</b>                            | 0.05  | <b>h11</b> | 0.68 | <b>h20</b> | 0.00 |
| <b>h3</b>                            | 0.17  | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.00 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.40 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 0.55  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.32 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.15  | <b>h16</b> | 0.00 | <b>h25</b> | 0.19 |
| <b>h8</b>                            | 0.02  | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(c)

Figura 4.12 – Espectros das harmônicas de tensão – MT03: (a)  $v_{rs}$ , (b)  $v_{sb}$ , (c)  $v_{tr}^*$ .

#### 4.4.1.5 Medição de Tensão 04 (MT04): Laminação seqüencial - Laminadores desbastadores laminando e cadeiras de laminação laminando.

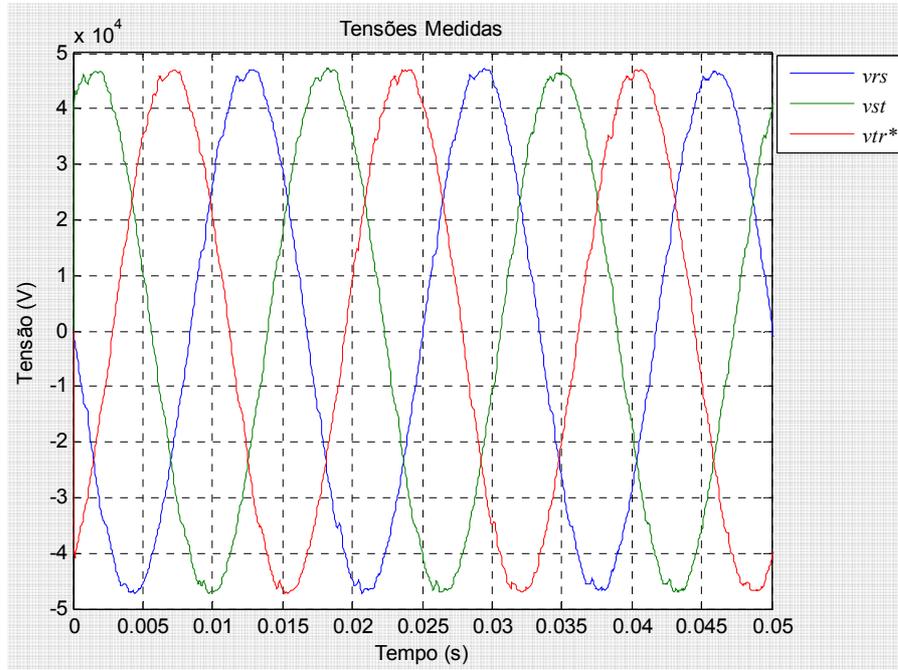
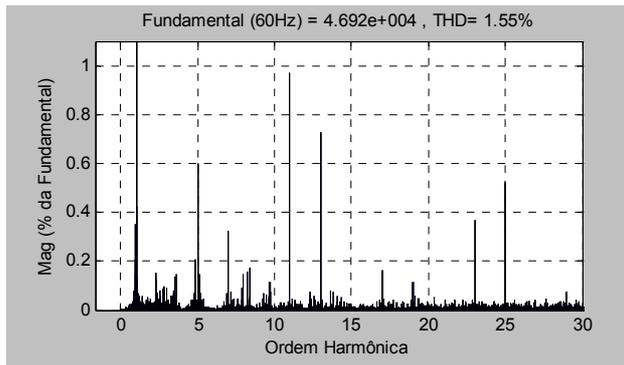


Figura 4.13 – Tensões medidas no barramento de entrada.

MT04: Laminação seqüencial → Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação laminando.

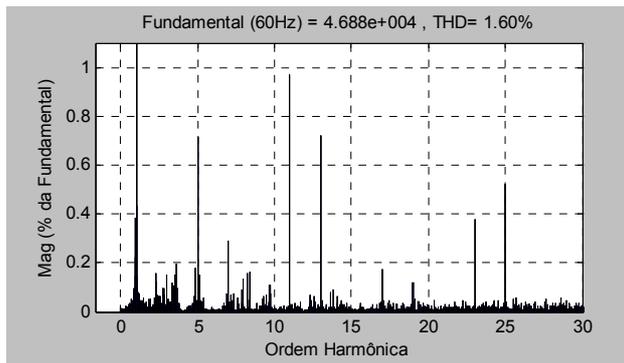
Tabela 4.6 – Valores *RMS* – MT04.

| <b>Valores rms</b> |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $v_{rs}$           | 33,18 kV | $v_{rn}$ | 19,16 kV |
| $v_{st}$           | 33,15 kV | $v_{sn}$ | 19,14 kV |
| $v_{tr}$           | 33,22 kV | $v_{tn}$ | 19,18 kV |



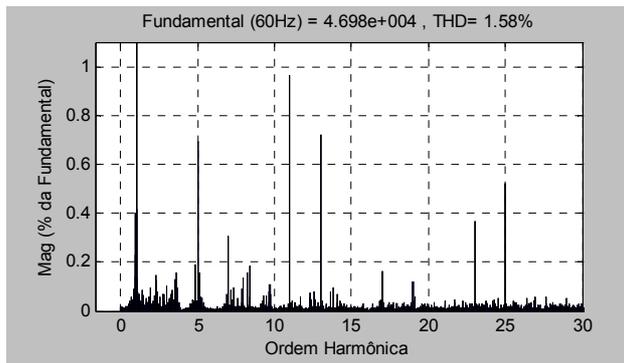
| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.11 |
| <b>h2</b>                            | 0.03  | <b>h11</b> | 0.97 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.09  | <b>h12</b> | 0.00 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.00  | <b>h13</b> | 0.73 | <b>h22</b> | 0.03 |
| <b>h5</b>                            | 0.60  | <b>h14</b> | 0.02 | <b>h23</b> | 0.37 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.32  | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.52 |
| <b>h8</b>                            | 0.01  | <b>h17</b> | 0.16 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.00 | <b>h19</b> | 0.12 |
| <b>h2</b>                            | 0.02  | <b>h11</b> | 0.97 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.15  | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.02 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.72 | <b>h22</b> | 0.02 |
| <b>h5</b>                            | 0.72  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.38 |
| <b>h6</b>                            | 0.00  | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.29  | <b>h16</b> | 0.00 | <b>h25</b> | 0.52 |
| <b>h8</b>                            | 0.02  | <b>h17</b> | 0.17 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |       |            |      |            |      |
|--------------------------------------|-------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00  | <b>h9</b>  | 0.00 | <b>h18</b> | 0.00 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.0 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.12 |
| <b>h2</b>                            | 0.03  | <b>h11</b> | 0.96 | <b>h20</b> | 0.00 |
| <b>h3</b>                            | 0.10  | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.01  | <b>h13</b> | 0.72 | <b>h22</b> | 0.02 |
| <b>h5</b>                            | 0.70  | <b>h14</b> | 0.01 | <b>h23</b> | 0.36 |
| <b>h6</b>                            | 0.01  | <b>h15</b> | 0.00 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.31  | <b>h16</b> | 0.00 | <b>h25</b> | 0.52 |
| <b>H8</b>                            | 0.02  | <b>h17</b> | 0.16 |            |      |

(c)

Figura 4.14 – Espectros das harmônicas de tensão – MT04: (a)  $v_{rs}$ , (b)  $v_{st}$ , (c)  $v_{tr}^*$ .

#### 4.4.1.6 Avaliação das Tensões

Conforme mencionado no item 3.3, será utilizada a recomendação do PRODIST-ANEEL. Para a faixa de tensão entre  $13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$ , o limite máximo para a distorção harmônica total de tensão ( $THD$ ) não deve ser superior a 6%.

Para avaliação, foram apresentados os espectros das harmônicas para as tensões de linha medidas. Os espectros foram representados sob uma janela de avaliação até a trigésima (30<sup>a</sup>) harmônica. A magnitude das distorções harmônicas individuais são também listadas, em relação ao percentual da fundamental. Nas tabelas, a magnitude individual é mostrada até a 25<sup>a</sup> ordem, uma vez que acima deste valor, as amplitudes relativas à fundamental, verificadas em cada caso, não se mostraram relevantes. Os espectros das harmônicas foram realizados em uma janela que se iniciou após 0,05s, o que possibilita a verificação das condições do sistema com menores perturbações que pudessem trazer verificações incoerentes às condições reais do sistema e também para manter coerência com as avaliações que se seguirão.

Verifica-se para a tensão do barramento uma *THD* variando entre 0,60% e 1,60% para os diferentes casos estudados (MT01, MT02, MT03 e MT04). Sendo o limite normativo de 6%, conclui-se que para as tensões medidas, os valores verificados encontram-se em uma faixa bastante inferior aos limites sugeridos pela recomendação brasileira. Os limites de distorções harmônicas individuais, também avaliados conforme o PRODIST, não indicam da mesma forma, valores superiores aos limites recomendados.

Observa-se que as harmônicas de tensão verificadas, independentemente do caso simulado, apresentam-se com características similares, indicando que para as componentes de quinta (5<sup>a</sup>), décima primeira (11<sup>a</sup>), décima terceira (13<sup>a</sup>) e vigésima terceira (23<sup>a</sup>) harmônicas, os valores de amplitude são ligeiramente mais acentuados.

Para as tensões medidas no caso de laminação seqüencial - MT04 – observa-se que, além das harmônicas citadas no parágrafo anterior, existe uma ligeira acentuação também das componentes de sétima (7<sup>a</sup>) e vigésima quinta (25<sup>a</sup>) harmônicas, mantendo-se, no entanto, dentro dos limites propostos.

O aumento da demanda de corrente provoca em conseqüência um ligeiro aumento nos valores de *THD* das tensões do sistema, como é de se esperar.

#### 4.4.2 Correntes

Assim como para as tensões, são avaliadas as correntes  $i_r$ ,  $i_s$  e  $i_t^*$  do sistema, sendo o PCC considerado no secundário do transformador 138/34,5kV. As medições de correntes foram realizadas concomitantemente às tensões e, portanto, avaliadas sob a mesma ótica, ou seja, diferentes situações de operação da planta.

##### 4.4.2.1 Medição de Corrente 01 (MC01): Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação rodando sem laminar.

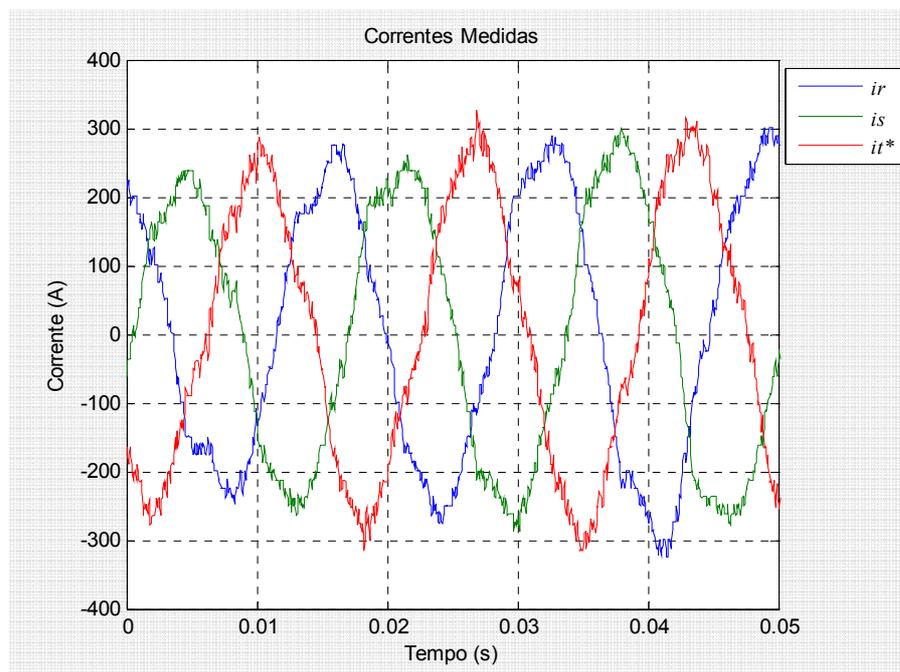
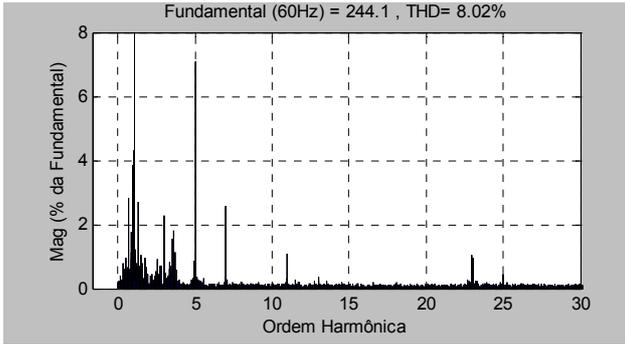


Figura 4.15 – Correntes medidas no barramento de entrada.

MC01: Laminador desbastadores e cadeira de laminação com motores rodando sem laminar.

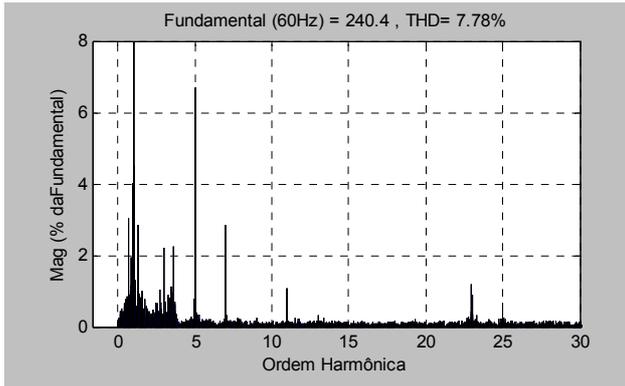
Tabela 4.7 – Valores *RMS* – MC01.

| <b>Valores rms</b> |        |
|--------------------|--------|
| $i_r$              | 172,6A |
| $i_s$              | 170,0A |
| $i_t^*$            | 177,3A |



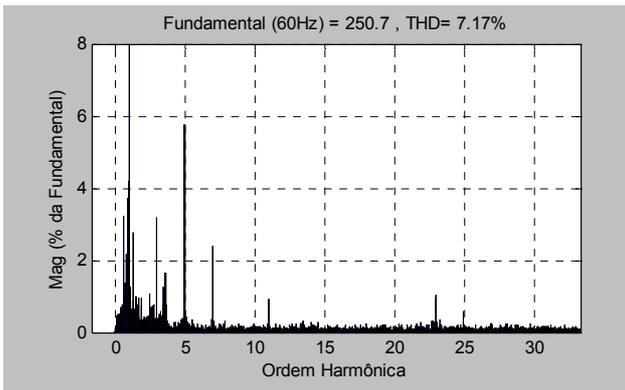
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.17 | <b>h18</b> | 0.12 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.04 | <b>h19</b> | 0.11 |
| <b>h2</b>                            | 0.15   | <b>h11</b> | 1.09 | <b>h20</b> | 0.07 |
| <b>h3</b>                            | 2.27   | <b>h12</b> | 0.04 | <b>h21</b> | 0.09 |
| <b>h4</b>                            | 0.27   | <b>h13</b> | 0.35 | <b>h22</b> | 0.03 |
| <b>h5</b>                            | 7.08   | <b>h14</b> | 0.04 | <b>h23</b> | 0.97 |
| <b>h6</b>                            | 0.06   | <b>h15</b> | 0.02 | <b>h24</b> | 0.11 |
| <b>h7</b>                            | 2.56   | <b>h16</b> | 0.07 | <b>h25</b> | 0.24 |
| <b>h8</b>                            | 0.20   | <b>h17</b> | 0.11 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.26 | <b>h18</b> | 0.06 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.06 | <b>h19</b> | 0.06 |
| <b>h2</b>                            | 0.30   | <b>h11</b> | 1.09 | <b>h20</b> | 0.05 |
| <b>h3</b>                            | 2.21   | <b>h12</b> | 0.06 | <b>h21</b> | 0.10 |
| <b>h4</b>                            | 0.14   | <b>h13</b> | 0.33 | <b>h22</b> | 0.01 |
| <b>h5</b>                            | 6.70   | <b>h14</b> | 0.07 | <b>h23</b> | 0.89 |
| <b>h6</b>                            | 0.21   | <b>h15</b> | 0.06 | <b>h24</b> | 0.05 |
| <b>h7</b>                            | 2.85   | <b>h16</b> | 0.12 | <b>h25</b> | 0.27 |
| <b>h8</b>                            | 0.11   | <b>h17</b> | 0.12 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.09 | <b>h18</b> | 0.06 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.10 | <b>h19</b> | 0.13 |
| <b>h2</b>                            | 0.37   | <b>h11</b> | 0.92 | <b>h20</b> | 0.11 |
| <b>h3</b>                            | 3.18   | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.14 |
| <b>h4</b>                            | 0.16   | <b>h13</b> | 0.23 | <b>h22</b> | 0.23 |
| <b>h5</b>                            | 5.77   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.85 |
| <b>h6</b>                            | 0.15   | <b>h15</b> | 0.04 | <b>h24</b> | 0.20 |
| <b>h7</b>                            | 2.41   | <b>h16</b> | 0.07 | <b>h25</b> | 0.25 |
| <b>h8</b>                            | 0.11   | <b>h17</b> | 0.15 |            |      |

(c)

Figura 4.16 – Espectros das harmônicas de corrente – MC01: (a)  $i_r$ , (b)  $i_s$ , (c)  $i_i^*$ .

#### 4.4.2.2 Medição de Corrente 02 (MC02): Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação com motores rodando sem laminar.

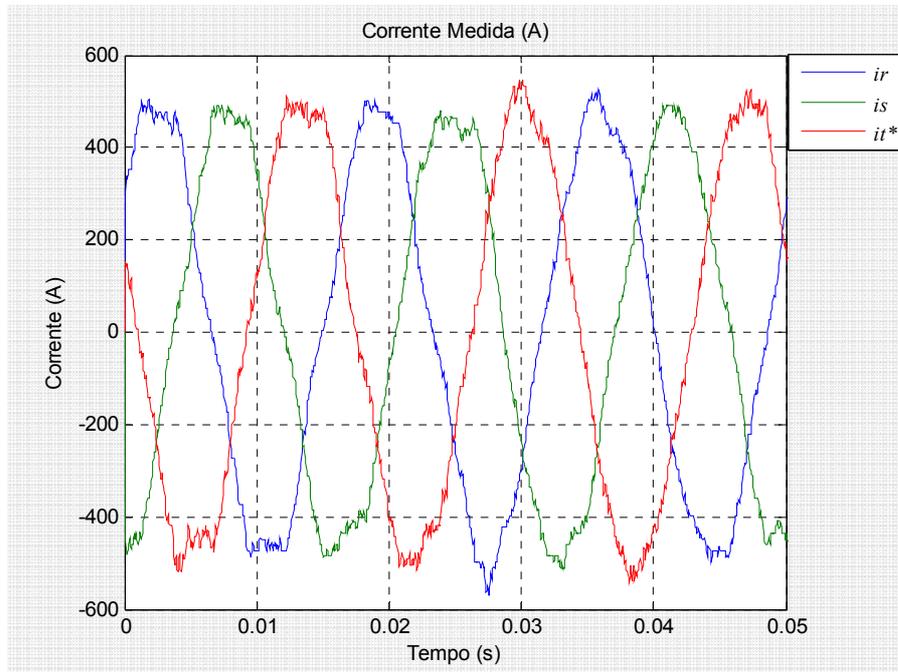
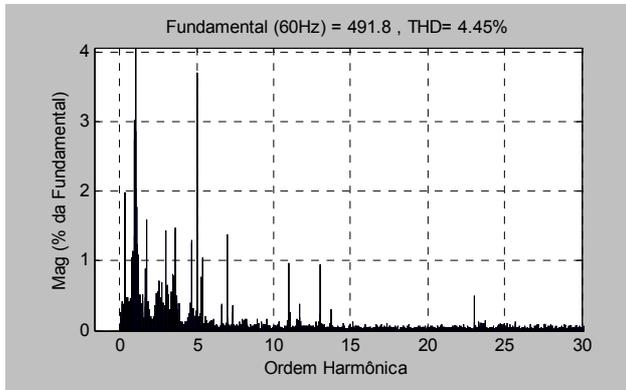


Figura 4.17 – Correntes medidas no barramento de entrada.

MC02: Laminadores desbastadores laminando / cadeiras de laminação com motores rodando sem laminar.

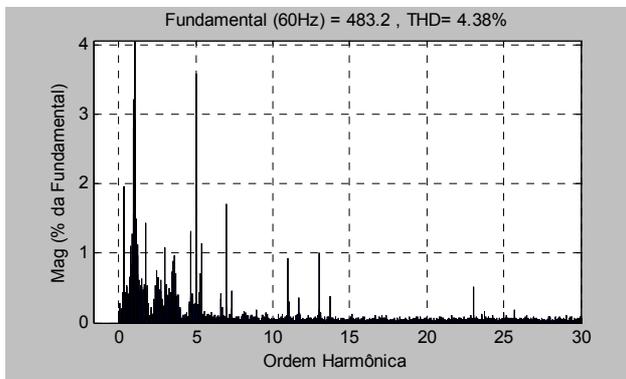
Tabela 4.8 – Valores *RMS* – MC02.

| <b>Valores rms</b> |        |
|--------------------|--------|
| $i_r$              | 347.8A |
| $i_s$              | 341.7A |
| $i_t^*$            | 354.1A |



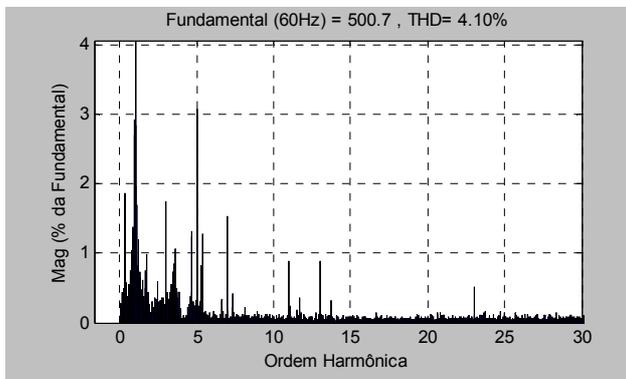
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.11 | <b>h18</b> | 0.02 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.05 | <b>h19</b> | 0.02 |
| <b>h2</b>                            | 0.21   | <b>h11</b> | 0.97 | <b>h20</b> | 0.00 |
| <b>h3</b>                            | 1.44   | <b>h12</b> | 0.06 | <b>h21</b> | 0.05 |
| <b>h4</b>                            | 0.13   | <b>h13</b> | 0.96 | <b>h22</b> | 0.05 |
| <b>h5</b>                            | 3.69   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.49 |
| <b>h6</b>                            | 0.12   | <b>h15</b> | 0.08 | <b>h24</b> | 0.02 |
| <b>h7</b>                            | 1.38   | <b>h16</b> | 0.05 | <b>h25</b> | 0.10 |
| <b>h8</b>                            | 0.09   | <b>h17</b> | 0.05 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.03 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.06 | <b>h19</b> | 0.05 |
| <b>h2</b>                            | 0.07   | <b>h11</b> | 0.92 | <b>h20</b> | 0.03 |
| <b>h3</b>                            | 1.09   | <b>h12</b> | 0.05 | <b>h21</b> | 0.02 |
| <b>h4</b>                            | 0.20   | <b>h13</b> | 1.01 | <b>h22</b> | 0.03 |
| <b>h5</b>                            | 3.58   | <b>h14</b> | 0.04 | <b>h23</b> | 0.51 |
| <b>h6</b>                            | 1.70   | <b>h15</b> | 0.04 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 1.70   | <b>h16</b> | 0.04 | <b>h25</b> | 0.15 |
| <b>h8</b>                            | 0.09   | <b>h17</b> | 0.01 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.10 | <b>h18</b> | 0.03 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.05 | <b>h19</b> | 0.05 |
| <b>h2</b>                            | 0.15   | <b>h11</b> | 0.88 | <b>h20</b> | 0.03 |
| <b>h3</b>                            | 1.74   | <b>h12</b> | 0.09 | <b>h21</b> | 0.07 |
| <b>h4</b>                            | 0.08   | <b>h13</b> | 0.89 | <b>h22</b> | 0.04 |
| <b>h5</b>                            | 3.08   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.52 |
| <b>h6</b>                            | 0.08   | <b>h15</b> | 0.09 | <b>h24</b> | 0.03 |
| <b>h7</b>                            | 1.53   | <b>h16</b> | 0.07 | <b>h25</b> | 0.15 |
| <b>h8</b>                            | 0.04   | <b>h17</b> | 0.10 |            |      |

(c)

Figura 4.18 – Espectros das harmônicas de corrente – MC02: (a)  $i_r$ , (b)  $i_s$ , (c)  $i_r^*$ .

#### 4.4.2.3 Medição de Corrente 03 (MC03): Laminadores desbastadores rodando, sem laminar / cadeiras de laminação laminando.

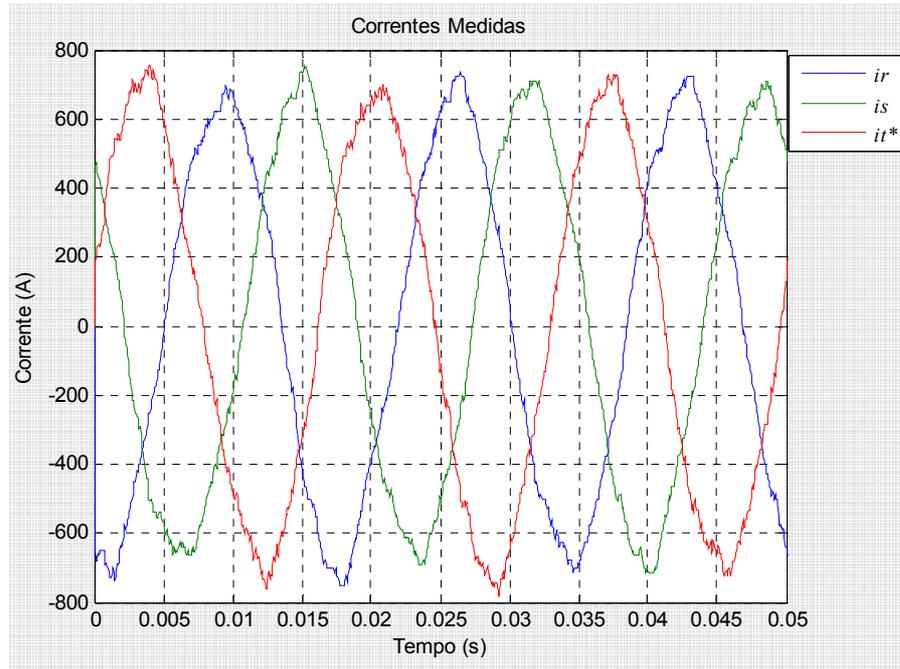
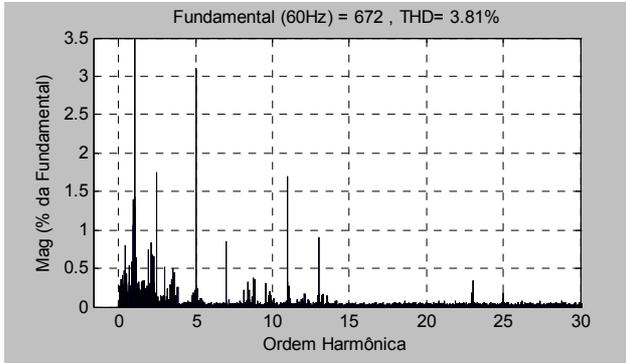


Figura 4.19 – Correntes medidas no barramento de entrada.

MC03: Laminador desbastador rodando, sem laminar / cadeiras de Laminação laminando.

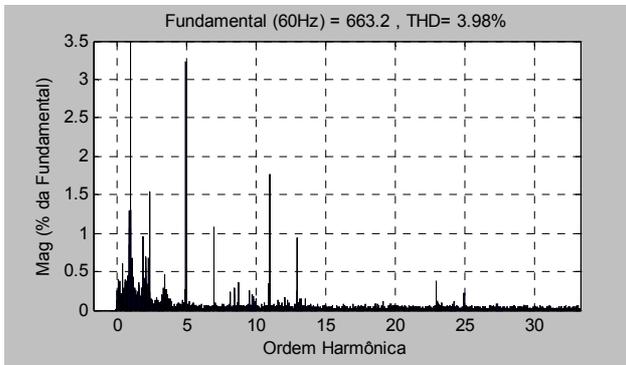
Tabela 4.9 – Valores *RMS* – MC03.

| <b>Valores rms</b> |        |
|--------------------|--------|
| $i_r$              | 475.2A |
| $i_s$              | 469.0A |
| $i_{t^*}$          | 485.5A |



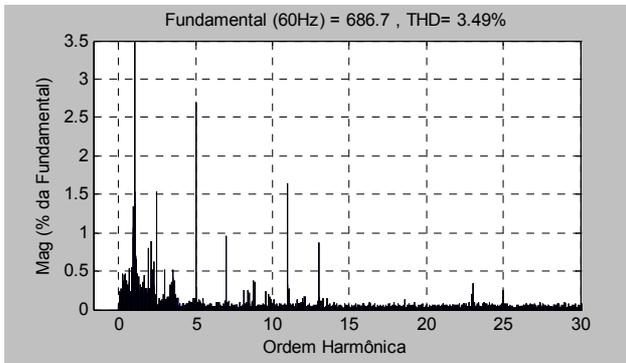
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.07 | <b>h18</b> | 0.04 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.05 | <b>h19</b> | 0.02 |
| <b>h2</b>                            | 0.19   | <b>h11</b> | 1.71 | <b>h20</b> | 0.04 |
| <b>h3</b>                            | 0.53   | <b>h12</b> | 0.03 | <b>h21</b> | 0.04 |
| <b>h4</b>                            | 0.04   | <b>h13</b> | 0.91 | <b>h22</b> | 0.03 |
| <b>h5</b>                            | 3.10   | <b>h14</b> | 0.02 | <b>h23</b> | 0.35 |
| <b>h6</b>                            | 0.06   | <b>h15</b> | 0.03 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.85   | <b>h16</b> | 0.02 | <b>h25</b> | 0.19 |
| <b>h8</b>                            | 0.03   | <b>h17</b> | 0.04 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.07 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.03 | <b>h19</b> | 0.02 |
| <b>h2</b>                            | 0.18   | <b>h11</b> | 1.76 | <b>h20</b> | 0.05 |
| <b>h3</b>                            | 0.09   | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.04 |
| <b>h4</b>                            | 0.11   | <b>h13</b> | 0.93 | <b>h22</b> | 0.04 |
| <b>h5</b>                            | 3.23   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.38 |
| <b>h6</b>                            | 0.07   | <b>h15</b> | 0.07 | <b>h24</b> | 0.02 |
| <b>h7</b>                            | 1.08   | <b>h16</b> | 0.03 | <b>h25</b> | 0.22 |
| <b>h8</b>                            | 0.02   | <b>h17</b> | 0.07 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.05 | <b>h18</b> | 0.04 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.03 | <b>h19</b> | 0.05 |
| <b>h2</b>                            | 0.25   | <b>h11</b> | 1.64 | <b>h20</b> | 0.06 |
| <b>h3</b>                            | 0.51   | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.07 |
| <b>h4</b>                            | 0.08   | <b>h13</b> | 0.87 | <b>h22</b> | 0.04 |
| <b>h5</b>                            | 2.70   | <b>h14</b> | 0.04 | <b>h23</b> | 0.35 |
| <b>h6</b>                            | 0.04   | <b>h15</b> | 0.05 | <b>h24</b> | 0.02 |
| <b>h7</b>                            | 0.95   | <b>h16</b> | 0.04 | <b>h25</b> | 0.25 |
| <b>h8</b>                            | 0.03   | <b>h17</b> | 0.04 |            |      |

(c)

Figura 4.20 – Espectros das harmônicas de corrente – MC03: (a)  $i_r$ , (b)  $i_s$ , (c)  $i_t^*$ .

#### 4.4.2.4 Medição de Corrente 04 (MC04): Laminação seqüencial – Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação laminando.

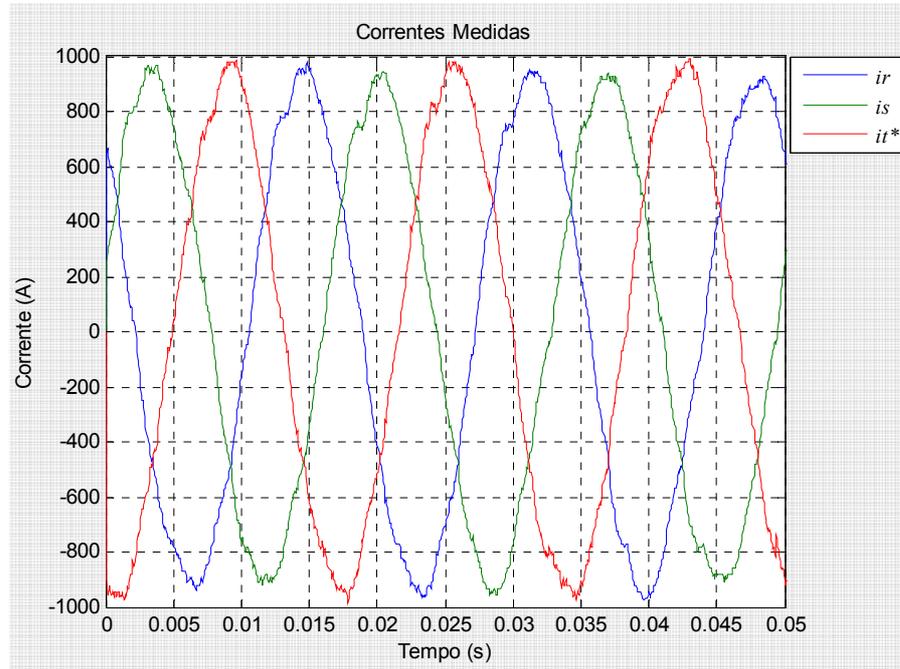
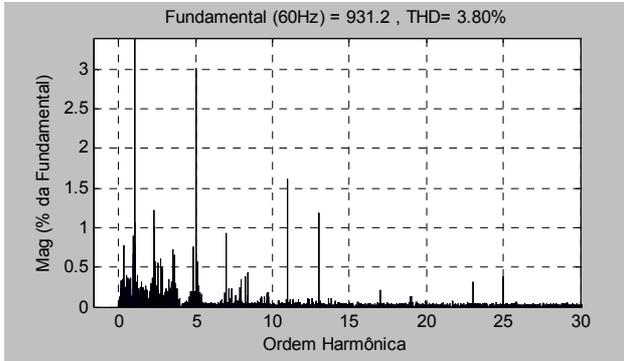


Figura 4.21 – Correntes medidas no barramento de entrada.

MC04: Laminação seqüencial - Laminador desbastador e cadeiras de laminação laminando.

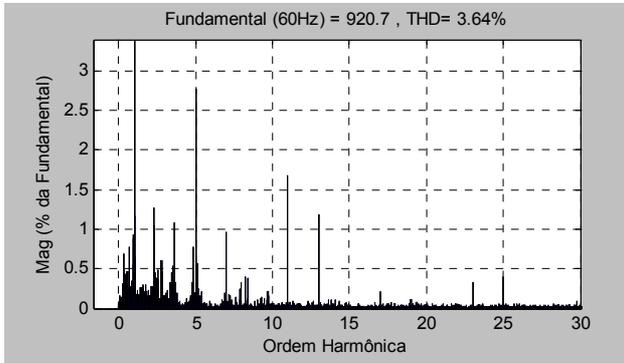
Tabela 4.10 – Valores *RMS* – MC04.

| <b>Valores rms</b> |         |
|--------------------|---------|
| $i_r$              | 658,5A  |
| $i_s$              | 651,0A  |
| $i_t^*$            | 672,4 A |



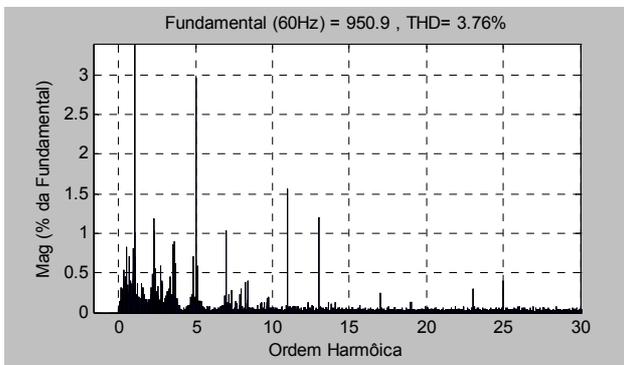
| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.07 | <b>h18</b> | 0.01 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.02 | <b>h19</b> | 0.13 |
| <b>h2</b>                            | 0.20   | <b>h11</b> | 1.62 | <b>h20</b> | 0.01 |
| <b>h3</b>                            | 0.19   | <b>h12</b> | 0.01 | <b>h21</b> | 0.05 |
| <b>h4</b>                            | 0.11   | <b>h13</b> | 1.19 | <b>h22</b> | 0.02 |
| <b>h5</b>                            | 3.02   | <b>h14</b> | 0.02 | <b>h23</b> | 0.32 |
| <b>h6</b>                            | 0.06   | <b>h15</b> | 0.03 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.93   | <b>h16</b> | 0.01 | <b>h25</b> | 0.39 |
| <b>h8</b>                            | 0.06   | <b>h17</b> | 0.22 |            |      |

(a)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.05 | <b>h18</b> | 0.02 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.03 | <b>h19</b> | 0.11 |
| <b>h2</b>                            | 0.04   | <b>h11</b> | 1.69 | <b>h20</b> | 0.03 |
| <b>h3</b>                            | 0.02   | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.10   | <b>h13</b> | 1.19 | <b>h22</b> | 0.05 |
| <b>h5</b>                            | 2.78   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.34 |
| <b>h6</b>                            | 0.05   | <b>h15</b> | 0.02 | <b>h24</b> | 0.01 |
| <b>h7</b>                            | 0.97   | <b>h16</b> | 0.02 | <b>h25</b> | 0.40 |
| <b>h8</b>                            | 0.02   | <b>h17</b> | 0.21 |            |      |

(b)



| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.04 | <b>h18</b> | 0.03 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.01 | <b>h19</b> | 0.14 |
| <b>h2</b>                            | 0.16   | <b>h11</b> | 1.57 | <b>h20</b> | 0.03 |
| <b>h3</b>                            | 0.18   | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.05 |
| <b>h4</b>                            | 0.06   | <b>h13</b> | 1.20 | <b>h22</b> | 0.03 |
| <b>h5</b>                            | 2.96   | <b>h14</b> | 0.03 | <b>h23</b> | 0.31 |
| <b>h6</b>                            | 0.03   | <b>h15</b> | 0.05 | <b>h24</b> | 0.02 |
| <b>h7</b>                            | 1.04   | <b>h16</b> | 0.02 | <b>h25</b> | 0.40 |
| <b>h8</b>                            | 0.08   | <b>h17</b> | 0.24 |            |      |

(c)

Figura 4.22 – Espectros das harmônicas de corrente – MC04: (a)  $i_r$ , (b)  $i_s$ , (c)  $i_t^*$ .

#### 4.4.2.5 Avaliação das Correntes

A norma IEEE 519, conforme visto na seção 3.3, propõe os limites de distorção de corrente totais e individuais que serão utilizados neste estudo. Mais particularmente, a tabela 3.4 apresenta o critério de restrição, impondo o limite de 5%, no comportamento da distorção harmônica total.

É unânime entre alguns autores [20,21] que a interpretação dos limites apresentados na tabela 3.4 não deve exagerar “na dose” no controle das harmônicas de corrente, impondo medidas restritivas e induzindo a instalação de equipamentos de correção sem necessidade aparente.

Este conceito está claramente exposto na própria IEEE 519, quando se considera o propósito de controlar a distorção de corrente para que a distorção de tensão não extrapole os limites estabelecidos, uma vez que esta depende evidentemente da primeira.

Os espectros das harmônicas de corrente também são representados sob uma janela de avaliação até a trigésima (30<sup>a</sup>) ordem. A magnitude das distorções harmônicas individuais são também listadas em relação ao percentual da fundamental, a exemplo das tensões. Acima da 25<sup>a</sup> ordem, apesar de regulamentado pela IEEE 519, nos casos avaliados não se observa relevância e são, portanto, suprimidos na avaliação das tabelas.

As distorções harmônicas totais de corrente possuem variação entre 8% e 3.70%, portanto, em alguns casos ultrapassando os limites de norma e em outros se aproximando desses. No entanto, conforme mencionado, apesar dos limites de distorção de corrente ultrapassar os limites propostos pela recomendação, os limites de distorção harmônica total das tensões são mantidos sob controle.

Observa-se que os espectros das harmônicas, independentemente do caso simulado e a exemplo das tensões, se apresentam com características similares, caso a caso. As componentes de quinta (5<sup>a</sup>), sétima (7<sup>a</sup>), décima primeira (11<sup>a</sup>), décima terceira (13<sup>a</sup>) e vigésima terceira (23<sup>a</sup>) harmônicas apresentam valores de amplitude mais acentuados, mas dentro dos limites estabelecidos.

Nos casos de menor carga (MC01 e MC02) a distorção harmônica de corrente é maior, sob ponto de vista dos aspectos relativos à corrente fundamental, apesar dos valores absolutos, em Amperes, de cada uma das correntes harmônicas serem menores do que em plena carga. Esta situação era esperada.

#### **4.5 DESEMPENHO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO EXISTENTE**

Existem muitas técnicas utilizadas para mitigar efeitos das harmônicas em sistemas elétricos industriais. A técnica mais comum é o uso de filtros passivos. A aplicação de filtros passivos tem sido utilizada com sucesso para controlar distorções harmônicas e também interharmônicas particularmente em projetos que utilizam cicloconversores [17]. Para o sistema de distribuição de energia elétrica em estudo, essa também é a técnica atualmente aplicada para a compensação harmônica do barramento.

O projeto dos filtros para compensação harmônica de correntes geradas por cargas acionadas por cicloconversores, requer conhecimento específico da operação desses conversores e da faixa de harmônicas e interharmônicas por eles geradas. Um cuidado especial deve ser dirigido ao estudo das ressonâncias paralelas, que devem ser suprimidas e que influenciam diretamente a confecção do projeto dos filtros [18].

O projeto do filtro resultante deve ser uma otimização entre os fatores de qualidade de energia requeridos “*versus*” considerações econômicas, ressaltando a eficiência, custo de capital, espaço físico requerido na instalação e esforços para implementação.

No circuito em estudo, para filtragem das componentes harmônicas e interharmônicas geradas durante o funcionamento dos cicloconversores, existe um sistema de filtragem passiva instalado no barramento de 34,5kV. Este sistema de filtragem é composto por 4 (quatro) ramos, cada um desses sintonizado numa frequência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas e interharmônicas geradas. A figura 4.23 ilustra o filtro harmônico trifásico instalado no

barramento principal do Laminador de Tiras a Quente, com as seguintes características [19]:

- ✓ Ramo 1 – Filtro Passa Alta, 10MVar, sintonizado na harmônica “2,6” (#2,6HP) → 156 Hz.
- ✓ Ramo 2 – Filtro Passa Faixa, 10,8MVar, sintonizado na harmônica “4,08” (#4,08FL) → 244,8 Hz;
- ✓ Ramo 3 – Filtro Passa Alta, 12,5MVar, sintonizado na harmônica “6” (#6HP) → 360 Hz;
- ✓ Ramo 4 – Filtro Passa Alta, 12,3MVar, sintonizado na harmônica “10” (#10HP) → 600 Hz.

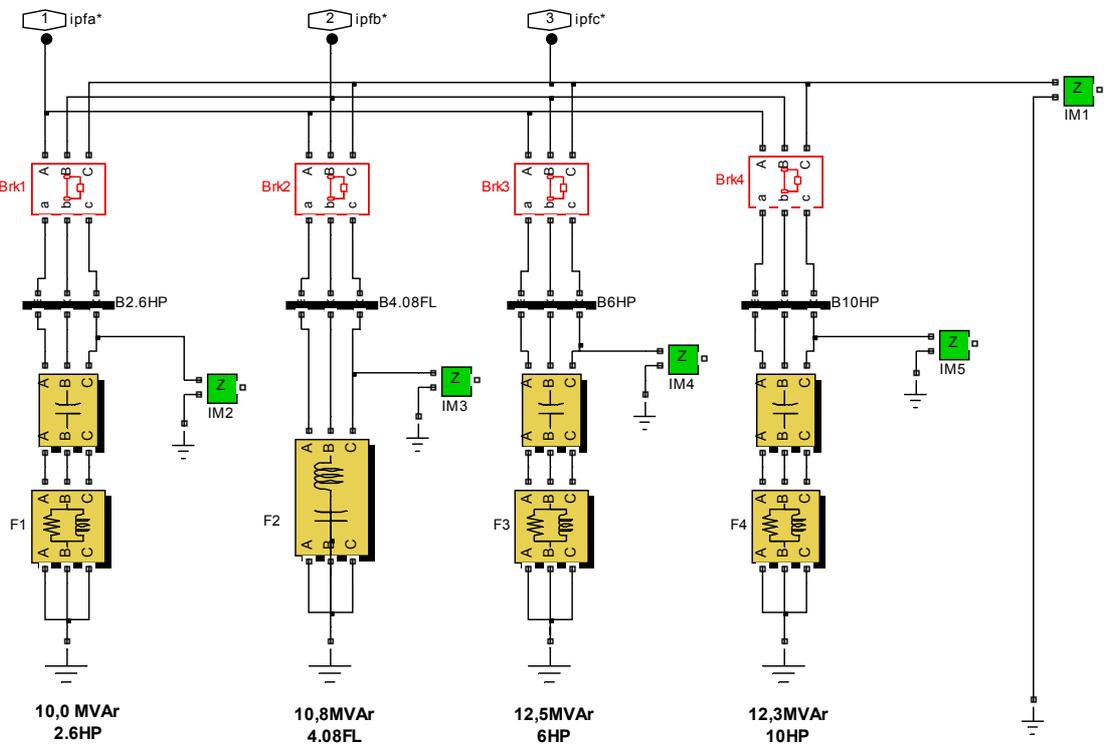


Figura 4.23 – Esquema representativo do filtro harmônico existente - Modelo simulado.

Para a avaliação de desempenho do filtro existente, foi utilizado um modelo de simulação, implementado no “software” *Matlab / Simulink / Powersystem Blockset*. O modelo implementado tem como objetivo avaliar a resposta em frequência do sistema instalado e possibilita verificar a correspondência entre as frequências de projeto e a resposta do filtro.

A resposta em frequência do equivalente com o sistema é visualizada na figura 4.24.

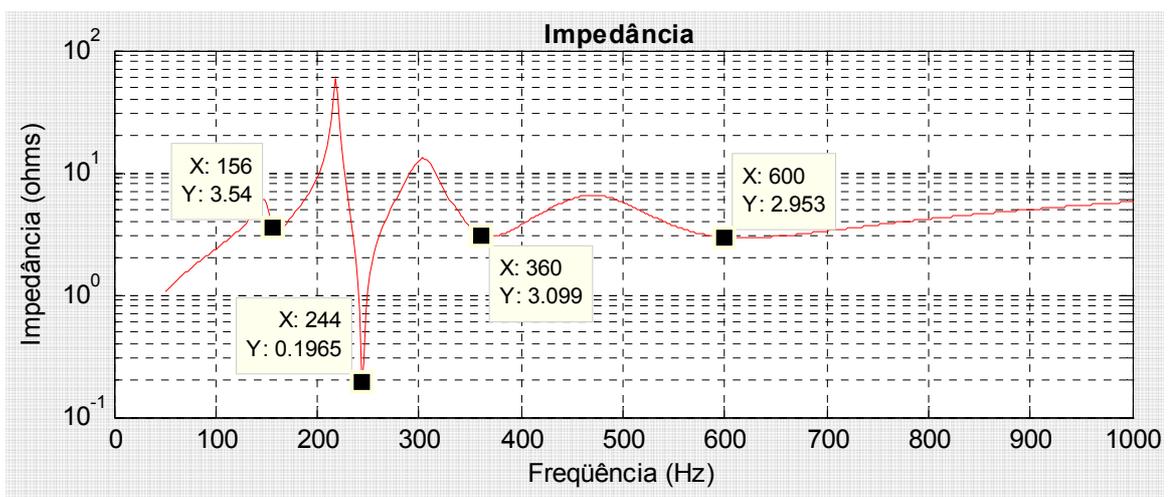


Figura 4.24 - Resposta em frequência do filtro harmônico existente.

Percebe-se claramente que o sistema de filtragem passiva existente provê menores impedâncias nas faixas de frequências de projeto.

Medições das correntes do sistema de filtragem passiva também foram realizadas, consecutivamente às medições anteriormente abordadas. A figura 4.25 mostra a forma de onda das correntes do filtro. As correntes medidas são representadas por  $i_{rF}$ ,  $i_{sF}$ , sendo a corrente  $i_{iF}^*$  calculada, através das correntes medidas e de acordo com o equacionamento a seguir:

$$i_{iF}^* = - (i_{rF} + i_{sF}) \quad (4.11)$$

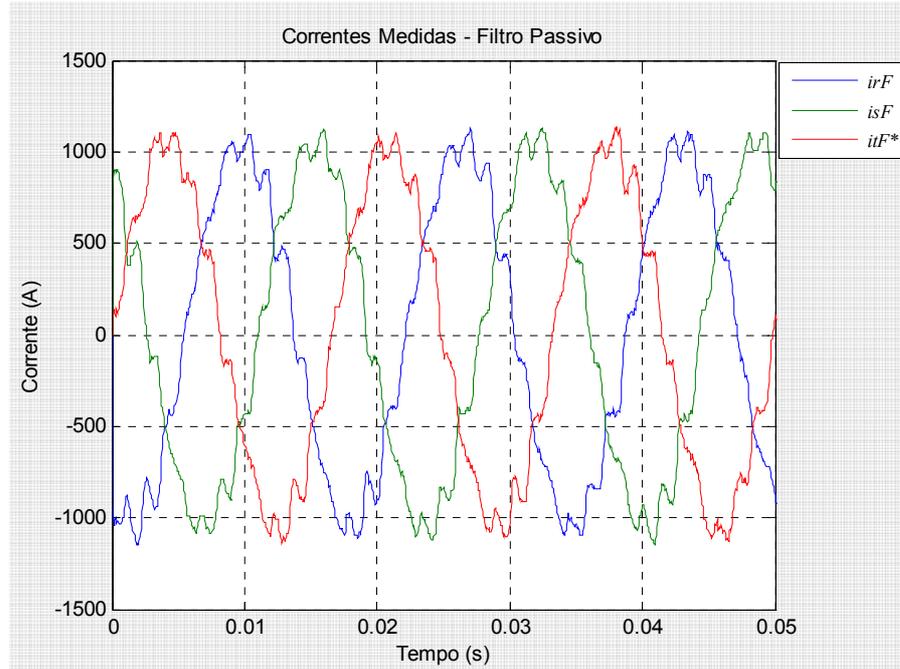
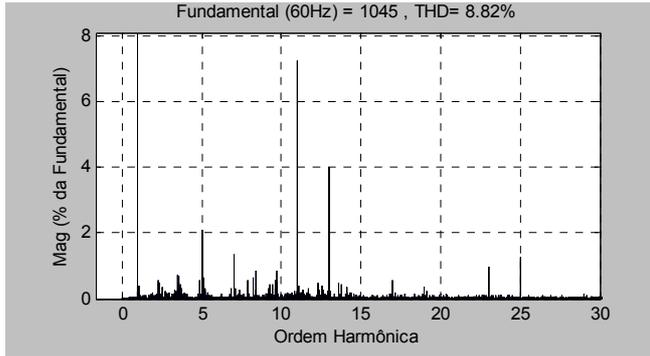


Figura 4.25 – Correntes medidas do Filtro passivo.

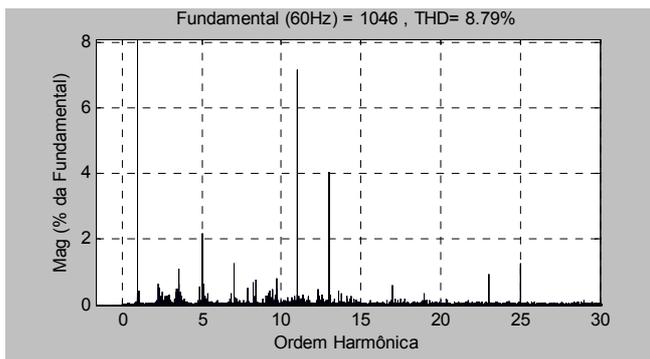
Tabela 4.11 – Valores *RMS* – Filtro Passivo

| <b>Valores rms</b> |         |
|--------------------|---------|
| $i_{rF}$           | 738,9A  |
| $i_{sF}$           | 739,8A  |
| $i_{tF}^*$         | 736,6 A |



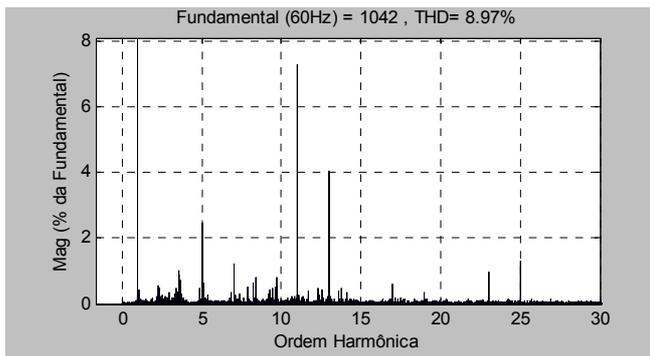
(a)

| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.01 | <b>h18</b> | 0.02 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.09 | <b>h19</b> | 0.37 |
| <b>h2</b>                            | 0.09   | <b>h11</b> | 7.24 | <b>h20</b> | 0.04 |
| <b>h3</b>                            | 0.17   | <b>h12</b> | 0.07 | <b>h21</b> | 0.02 |
| <b>h4</b>                            | 0.13   | <b>h13</b> | 4.02 | <b>h22</b> | 0.06 |
| <b>h5</b>                            | 2.08   | <b>h14</b> | 0.06 | <b>h23</b> | 0.98 |
| <b>h6</b>                            | 0.07   | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.06 |
| <b>h7</b>                            | 1.34   | <b>h16</b> | 0.03 | <b>h25</b> | 1.26 |
| <b>h8</b>                            | 0.06   | <b>h17</b> | 0.56 |            |      |



(b)

| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.06 | <b>h18</b> | 0.03 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.07 | <b>h19</b> | 0.35 |
| <b>h2</b>                            | 0.03   | <b>h11</b> | 7.16 | <b>h20</b> | 0.03 |
| <b>h3</b>                            | 0.32   | <b>h12</b> | 0.02 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.10   | <b>h13</b> | 4.05 | <b>h22</b> | 0.10 |
| <b>h5</b>                            | 2.20   | <b>h14</b> | 0.07 | <b>h23</b> | 0.95 |
| <b>h6</b>                            | 0.02   | <b>h15</b> | 0.02 | <b>h24</b> | 0.04 |
| <b>h7</b>                            | 1.26   | <b>h16</b> | 0.03 | <b>h25</b> | 1.25 |
| <b>h8</b>                            | 0.06   | <b>h17</b> | 0.60 |            |      |



(c)

| Amplitude relativa à fundamental (%) |        |            |      |            |      |
|--------------------------------------|--------|------------|------|------------|------|
| <b>DC</b>                            | 0.00   | <b>h9</b>  | 0.07 | <b>h18</b> | 0.05 |
| <b>Fund.</b>                         | 100.00 | <b>h10</b> | 0.07 | <b>h19</b> | 0.37 |
| <b>h2</b>                            | 0.07   | <b>h11</b> | 7.29 | <b>h20</b> | 0.02 |
| <b>h3</b>                            | 0.36   | <b>h12</b> | 0.07 | <b>h21</b> | 0.01 |
| <b>h4</b>                            | 0.04   | <b>h13</b> | 4.06 | <b>h22</b> | 0.06 |
| <b>h5</b>                            | 2.46   | <b>h14</b> | 0.04 | <b>h23</b> | 0.97 |
| <b>h6</b>                            | 0.05   | <b>h15</b> | 0.01 | <b>h24</b> | 0.04 |
| <b>h7</b>                            | 1.24   | <b>h16</b> | 0.02 | <b>h25</b> | 1.29 |
| <b>h8</b>                            | 0.12   | <b>h17</b> | 0.60 |            |      |

Figura 4.26 – Espectros das harmônicas de corrente filtradas pelo filtro passivo: (a)  $i_{rF}$ , (b)  $i_{sF}$ , (c)  $i_{tF}^*$ .

As componentes de quinta (5<sup>a</sup>), sétima (7<sup>a</sup>), décima primeira (11<sup>a</sup>), décima terceira (13<sup>a</sup>) e vigésima terceira (23<sup>a</sup>) e vigésima quinta (25<sup>a</sup>) harmônicas apresentam valores de amplitude mais acentuados, mostrando que o filtro atua sobre as principais componentes harmônicas presentes nas correntes de entrada do barramento medidas.

## 4.6 CONCLUSÕES

Foi apresentado neste capítulo o sistema de distribuição de energia elétrica do laminador em estudo. Medições oscilográficas de tensão e corrente foram realizadas e aqui apresentadas para diferentes situações de operação do sistema de energia do laminador, permitindo assim avaliações referenciadas a recomendações normativas nacionais e internacionais.

Foi também realizada uma avaliação de desempenho do sistema de filtragem passiva para compensação harmônica, utilizada pelo sistema em estudo.

Os níveis de distorção harmônica total e individual da tensão são mantidos dentro dos limites impostos pelas recomendações normativas e são mais importantes de serem considerados. Em alguns dos casos medidos as distorções harmônicas total e individual de corrente apresentam-se fora dos limites normativos, mas mesmo para estes casos as distorções de tensão são mantidas dentro dos limites.

Considera-se que o esforço de filtragem passiva melhora significativamente a forma da corrente, mas o resultado pode ser melhorado empregando outras técnicas, principalmente tendo-se em vista a expansão da planta e/ou influências externas que possam causar sobrecarga do sistema de filtragem. Presume-se que a utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem permitirá um melhor desempenho do sistema sob análise, sendo este o próximo passo do estudo.

As medições realizadas serão importantes no transcorrer deste trabalho e permitirão a implementação direta de modelos do sistema elétrico em estudo, capazes de realizar a avaliação de melhorias neste sistema elétrico, frente a situações adversas.

# 5. MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

*No capítulo anterior foram apresentadas e verificadas as condições de operação do sistema elétrico no qual se insere um laminador siderúrgico. Foram avaliadas, frente a medições realizadas no sistema elétrico desta planta, as suas condições atuais de operação, principalmente quanto às estratégias de compensações harmônicas aplicadas e seu desempenho, balizadas por normalização nacional e internacional que abrange o assunto. Visando a aprofundar os estudos neste sistema elétrico, de forma a caracterizar possíveis alterações das atuais condições de operação do sistema elétrico, como estudado no capítulo anterior, este capítulo abordará a implementação de um modelo computacional capaz de simular o sistema de potência em estudo.*

## 5.1 MODELAMENTO DE SISTEMAS

Para a otimização, avaliação de desempenho, avaliações de alterações das condições de operação, dentre outras demandas de um sistema industrial, torna-se necessário o conhecimento pleno deste sistema de interesse, bem como o conhecimento das principais variáveis ou grandezas que o cercam. Para tal, existe a possibilidade de suporte através de programas computacionais que permitem criar modelos em plataformas de simulação que representem e simulem, de forma fidedigna, as condições de operação do sistema industrial estudado, gerando dados e resultados que auxiliarão na conduta das investigações que se deseja realizar.

Com a correta implementação do modelo e verificação de sua aderência ao sistema real, é possível então simular alterações em condições diversas do processo e assim prever o efeito destas alterações em parâmetros de controle deste sistema em estudo. Estas considerações são também válidas para casos onde os objetos de

estudo a serem tratados sejam sistemas elétricos de potência em ambientes industriais.

Será detalhado a seguir o modelo de simulação do sistema elétrico de potência do laminador siderúrgico estudado. O modelo foi implementado com base em levantamentos diversos, realizados na documentação do sistema de distribuição de energia elétrica desse laminador, de suas principais características elétricas, como as impedâncias que compõem o sistema, características técnicas do sistema de filtragem passiva, utilização das medições realizadas no sistema elétrico para a modelagem da carga dos cicloconversores, dentre outras considerações.

### **5.1.1 Plataforma de Simulação – *Matlab / Simulink / SimPowerSystem***

No caso de sistemas de potência e seus variados elementos, experimentos montados em ambiente computacional permitem, a um custo muito baixo, o acesso ao funcionamento minucioso dos circuitos de força e de controle, sendo possível monitorar correntes, tensões em suas várias formas em cada parte de um circuito e no formato em que se deseja realizar esta avaliação.

Devido à grande aceitação nos meios acadêmico, industriais, e também devido à disponibilidade de uma biblioteca desenvolvida especialmente para sistemas de potência (*SymPowerSystems - PSB*), o aplicativo *Simulink*, uma extensão do programa *Matlab*, permite desenvolver e analisar sistemas dinâmicos por meio de diagramas de blocos que representam modelos matemáticos com funções específicas. É uma ferramenta poderosa para o estudo de sistemas elétricos industriais e será, portanto, utilizada neste trabalho.

O *PSB* emprega análise por meio de variáveis de estado para modelagem e solução de equações em sistemas elétricos e eletromecânicos, e é formado por um conjunto de bibliotecas contendo diversos componentes de sistemas de potência para ser utilizado no próprio *Simulink* ou em interação com algum sinal gerado por um programa elaborado no *Matlab* (arquivos com extensão *.m*). O conjunto de bibliotecas do *PSB* é bastante completo, fornecendo modelos de diversos componentes de rede, tais como elementos RLC concentrados, cargas não lineares,

diversos modelos de máquinas elétricas, componentes de eletrônica de potência, fontes controladas, etc. [31].

## **5.2 IMPLEMENTAÇÃO, AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DO LTQ**

Observa-se na figura 5.1 o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência modelado e na figura 5.2, de forma macro, o modelo já simulado em ambiente *Matlab/Simulink* e as partes que o compõem, correlacionadas ao unifilar apresentado na figura 5.1. Os blocos numerados de 1 a 3 representam, respectivamente:

- ✓ **1** → Fonte do sistema (modelada a partir do secundário do transformador 138/34,5kV – 75MVA) e representada pela fonte e pela impedância de linha  $Z_s$  do sistema.
- ✓ **2** → Cicloconversores – Correntes absorvidas pelos cicloconversores medidas e injetadas diretamente no barramento;
- ✓ **3** → Sistema de filtragem passiva – Modelo do sistema existente;

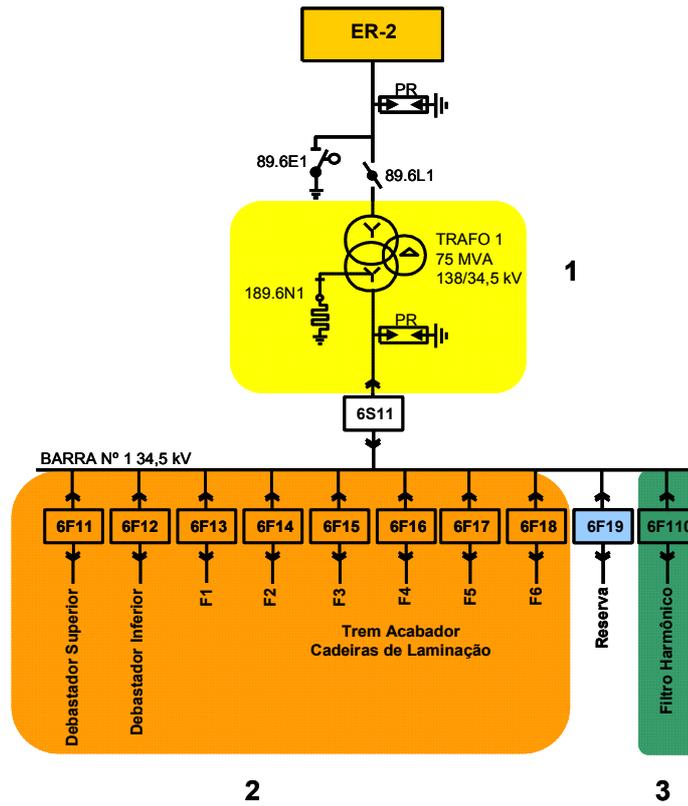


Figura 5.1 – Unifilar do sistema elétrico estudado.

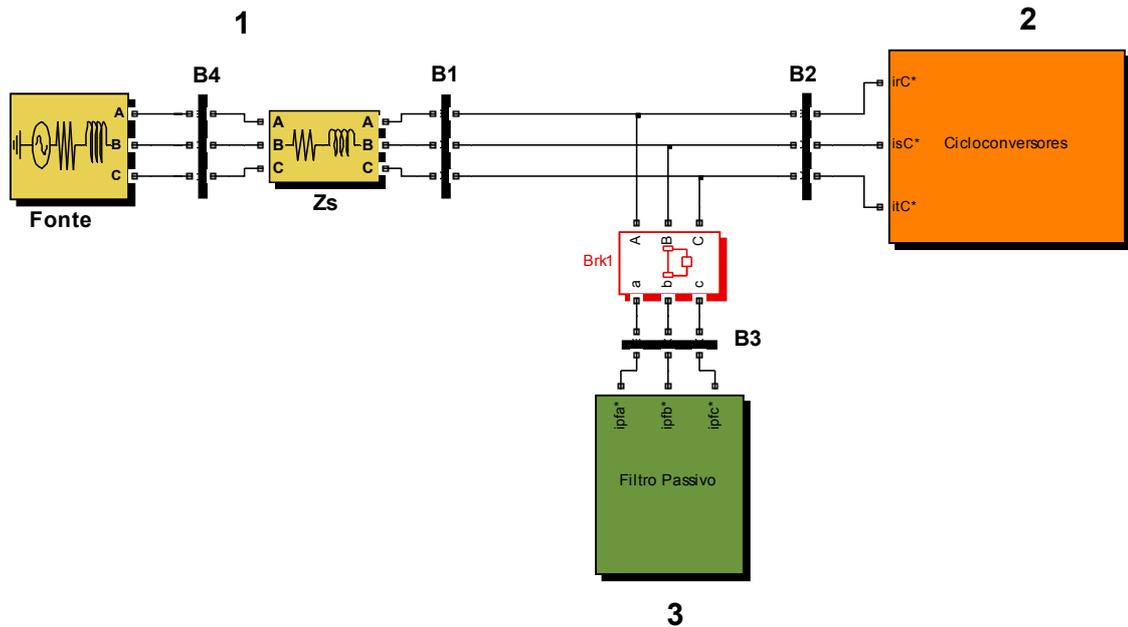


Figura 5.2 – Sistema elétrico simulado em ambiente *Matlab/Simulink/PSB*.

São detalhados a seguir cada um dos componentes do sistema simulado, indicando os modelos implementados e os parâmetros ajustados em cada bloco.

### 5.2.1 Bloco 1 - Fonte do sistema de potência

O Bloco 1 da figura 5.2 modela a fonte do sistema de potência do laminador. O modelo implementado é referenciado ao secundário do transformador de 34,5kV, conforme unifilar da figura 5.1.

A caracterização da fonte foi realizada utilizando-se o modelo “*Three-Phase Source*” do *PSB*. Este modelo permite o ajuste da amplitude e do ângulo da tensão desejada, além de modelar também sua impedância interna, com a opção de realização desta através das características de curto-circuito do sistema. As correntes de curto-circuito, necessárias para o modelo, foram levantadas através do simulador de fluxo de potência e curto-circuito, utilizado internamente pela área de Engenharia da indústria em estudo. Os resultados desta simulação são visualizados no Anexo 2. Para o que se propõem este trabalho, é de interesse avaliar a corrente de curto-circuito trifásica em regime permanente do barramento do 34,5kV, figura 5.1.

A figura 5.3 mostra o ajuste dos demais parâmetros da fonte do sistema, realizado através do *Block Parameters* do *Simulink/PSB*.

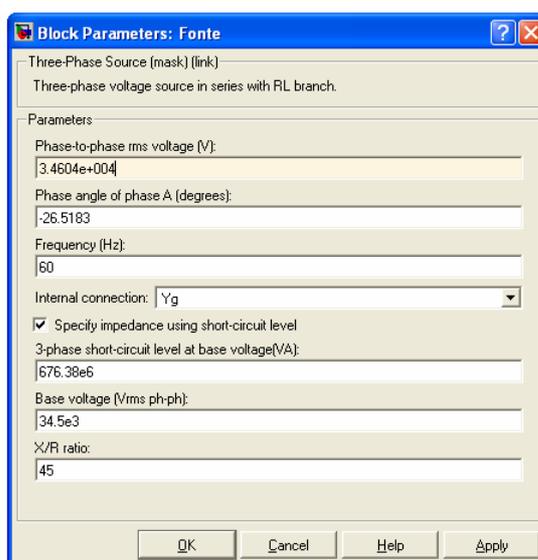


Figura 5.3 – Ajuste de Parâmetros da Fonte – Block Parameters do *Simulink/PowerSystem Blockset*

O ajuste da amplitude da tensão dependerá do caso considerado. Aqui, os casos a serem considerados no modelo são aqueles estudados no Capítulo 4, referentes às diferentes situações de operação da planta e medidas em seus parâmetros de tensão e corrente. O ajuste da amplitude de tensão, conforme o caso, é necessário para conservar as características de tensão e corrente da simulação com as características verificadas em campo, no barramento. No Apêndice B – Lista de programas, a rotina *Calcu\_TensaoFonte\_Impedância.m* calcula a tensão a ser considerada para o ajuste da fonte. Este valor dependerá da queda de tensão da impedância do cabo ( $Z_s$ ) e também dos valores de tensão encontrados para o caso simulado. Os valores *rms* das variáveis medidas são verificados no modelo *Defasagem\_RMS.mdl* que também pode ser visualizado no Apêndice B. Este modelo possibilita verificar também a defasagem entre as diversas variáveis medidas.

Além do valor *rms* da tensão, também é necessário o ajuste do ângulo da tensão do barramento com relação à tensão medida, de forma a compatibilizar as verificações realizadas em campo com o modelo gerado. Esta avaliação e cálculo também são realizadas pela rotina *Calcu\_TensaoFonte\_Impedância.m* e consideram o ângulo real da tensão medida no barramento com base no modelo *Defasagem\_RMS.mdl*.

De acordo com a simulação de curto-circuito, apresentada no Anexo 2, a corrente de curto-circuito, em valores *rms*, é de 11,269 kA e, portanto, para uma tensão de linha de 34,5kV (*rms*) tem-se a potência trifásica do circuito avaliada em:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \times 11,29kA \times 34,5kV = 676,38MVA \quad (5.1)$$

A relação  $X/R$  corresponde à relação entre a reatância indutiva e a resistência do circuito e foi estimada através de dados consultados em modelos e documentos internos da empresa, que mostram uma relação de cerca de 45, considerando ser esta a impedância do secundário do Trafo 1 de 75MVA da figura 5.1.

A impedância  $Z_s$  corresponde à impedância do cabo que liga o transformador ao barramento da subestação, e conforme documentações de projeto, possui valores de  $R_s=0,34\Omega$  e  $L_s=2,5mH$  para a resistência e indutância, respectivamente.

As Barras B1 a B4, representadas no modelo da figura 5.2, permitem a medição das tensões e correntes nos pontos onde estão inseridas.

### 5.2.2 Bloco 2 - Cicloconversores

A precisão do modelo do sistema elétrico de potência do laminador depende diretamente da confiabilidade na modelagem da carga dos cicloconversores. Uma das grandes vantagens da simulação do conjunto de cicloconversores, da forma como implementada neste trabalho, é a possibilidade da entrada de dados reais da planta, utilizando-se das medições de corrente e tensão realizadas em campo, no barramento de alimentação do conjunto. Com isso, a modelagem da carga elétrica do conjunto de cicloconversores é melhor representada, sendo inserida no circuito simulado exatamente da forma como verificadas no barramento da subestação, para os diferentes casos estudados.

Esta forma de realizar a modelagem de um processo ou de variáveis elétricas de interesse reduz as limitações impostas por modelos teóricos e permite representar de forma mais real o processo em avaliação, além de permitir avaliações de variações diversas do processo em estudo. É necessário, no entanto, para estes casos, a verificação da correta aquisição dos dados e verificação da aderência das medições com o modelo proposto.

Através da interação entre o *Simulink* e a área de trabalho do *Matlab* e com a geração de rotina denominada *ExcelTransfer.m*, detalhada na lista de programas, os dados em planilhas coletados das medições de corrente são carregados para o *Matlab* e assim a corrente dos cicloconversores pode ser conhecida. Além de carregados, os dados das planilhas precisam ser tratados, função esta realizada também pelo código *ExcelTransfer.m*, que remove possíveis níveis *CC* das medições realizadas em campo, que são imperfeições do processo de medição, devido à configuração do circuito de potência.

Desta forma, com os dados medidos, tratados e inseridos na área de trabalho do *Matlab* é possível através do modelo do *PSB* para fonte de corrente controlada, inseri-los diretamente no barramento do modelo. Como explanado no Capítulo 4, devido às limitações dos dispositivos para a medição individual de cada variável de

interesse, foi necessário calcular algumas das variáveis. Assim, para o cálculo das correntes do cicloconversor, as correntes apresentadas nas tabelas a seguir foram medidas e calculadas para cada caso verificado.

Tabela 5.1 – Correntes registradas na subestação do laminador.

| Item | Variável Medida   | Simbologia |
|------|---|------------|
| 1    | Corrente da fase R no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ 1  | $i_r$      |
| 2    | Corrente da fase S no secundário do Trafo 1 75MVA – SE LTQ 1  | $i_s$      |
| 3    | Corrente da fase R na entrada do conjunto de filtros passivos | $i_{rF}$   |
| 4    | Corrente da fase S na entrada do conjunto de filtros passivos | $i_{sF}$   |

A figura 5.4 ilustra, de maneira simplificada, as variáveis medidas e calculadas na barra de 34,5kV do laminador, e que permitem se conhecer as correntes do conjunto de cicloconversores.

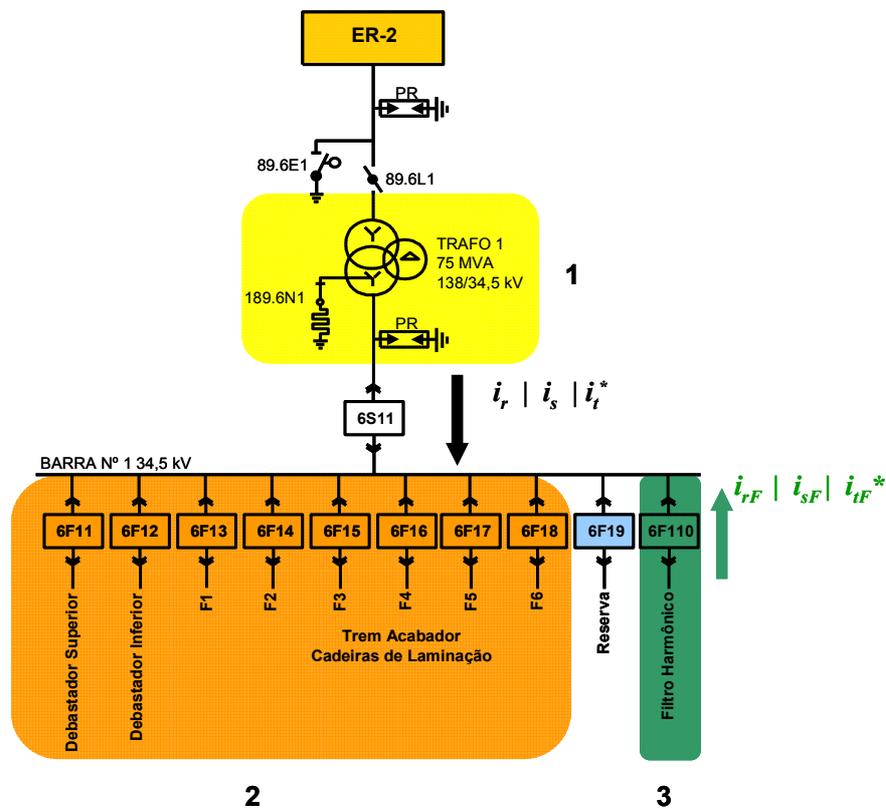


Figura 5.4 – Identificação das variáveis medidas e estimadas na subestação do laminador.

As variáveis calculadas, ou seja, não medidas, além das equações são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Correntes calculadas através das correntes medidas.

| <b>Equação</b> | <b>Variável Calculada</b>                            | <b>Cálculo</b>        | <b>Variável</b> |
|----------------|--|-----------------------|-----------------|
| (5.2)          | Corrente da fase T no secundário do Trafo 1 75MVA    | $- (i_r + i_s)$       | $= i_t^*$       |
| (5.3)          | Corrente da fase T na entrada do conjunto de filtros | $- (i_{rF} + i_{sF})$ | $= i_{tF}^*$    |

Conhecidas as variáveis listadas nas tabelas 5.1 e 5.2 e aplicando-se a Lei de Kirchoff para as correntes, considerando-se o nó como sendo o barramento de 34,5kV da figura 5.4, é possível conhecer a carga do conjunto de cicloconversores em funcionamento para cada caso estudado. A corrente do conjunto de cicloconversores, por fase é dada então por:

Tabela 5.3 - Correntes por fase do conjunto de cicloconversores.

| <b>Equação</b> | <b>Variável Calculada</b>                       | <b>Cálculo</b>           | <b>Variável</b> |
|----------------|---|--------------------------|-----------------|
| (5.4)          | Corrente da fase R do conjunto cicloconversores | $= - (i_r + i_{rF})$     | $i_{rC}^*$      |
| (5.5)          | Corrente da fase S do conjunto cicloconversores | $= - (i_s + i_{sF})$     | $i_{sC}^*$      |
| (5.6)          | Corrente da fase T do conjunto cicloconversores | $= - (i_t^* + i_{tF}^*)$ | $i_{tC}^*$      |

A figura 5.5 mostra como exemplo, a corrente verificada para o conjunto de cicloconversores na abordagem acima descrita, no caso estudado de laminação seqüencial, ou seja, cadeiras de laminação e laminadores desbastadores operando simultaneamente.

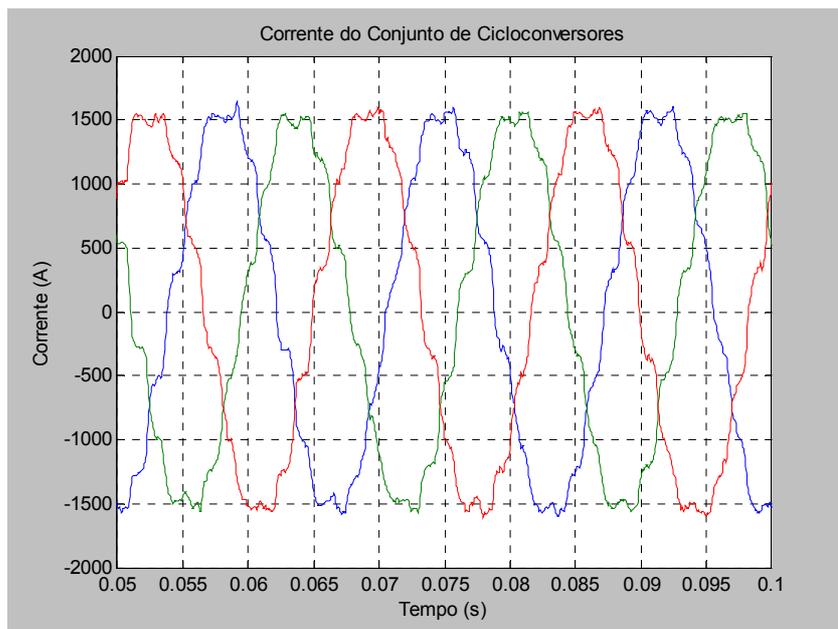


Figura 5.5 - Forma de onda da corrente para o conjunto de cicloconversores.

### 5.2.3 Bloco 3 - Sistema de filtragem passiva existente

De acordo com o detalhamento realizado na seção 4.5 deste trabalho, para a filtragem das componentes harmônicas e interharmônicas geradas durante o funcionamento dos cicloconversores no circuito em estudo, existe um sistema de filtragem passiva. Este sistema encontra-se instalado no barramento de 34,5kV e é composto por 4 (quatro) ramos, cada um desses sintonizado numa frequência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas e interharmônicas geradas, sendo o filtro assim composto [32]:

- ✓ Ramo 1 – Filtro Passa Alta, 10,0MVAR, sintonizado na harmônica “2,6” (#2,6HP) → 156 Hz.
- ✓ Ramo 2 – Filtro Passa Faixa, 10,8MVAR, sintonizado na harmônica “4,08” (#4,08FL) → 244,8 Hz;
- ✓ Ramo 3 – Filtro Passa Alta, 12,5MVAR, sintonizado na harmônica “6” (#6HP) → 360 Hz;
- ✓ Ramo 4 – Filtro Passa Alta, 12,3MVar, sintonizado na harmônica “10” (#10HP) → 600 Hz.

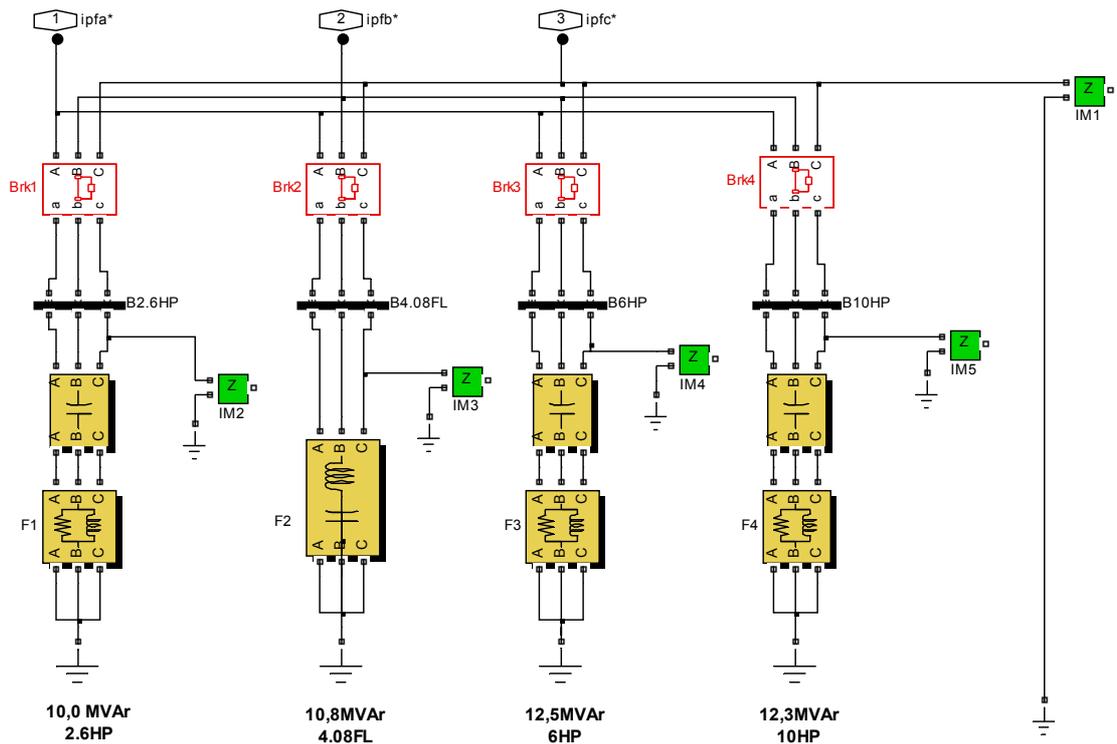


Figura 5.6 – Esquema representativo do filtro harmônico instalado - Modelo simulado

O modelo, como apresentado na seção 4.5, figura 4.23, possibilita também avaliar a resposta em frequência do sistema instalado.

#### 5.2.4 Ajustes gerais e entrada de dados

As entradas de dados para o modelo, medições de corrente, são realizadas pelo código *ExcelTransfer.m*, como visto anteriormente e sempre carregadas quando o modelo é aberto ou quando se inicia uma nova simulação. Estas funções de carregamento da base de dados são executadas pela janela “*Model Properties*” do *Simulink*, apresentada na figura 5.7. Também nesta janela procede-se a entrada do tempo  $T_s$ , que define o tempo de amostragem das medições inseridas no modelo, e que deve ser compatibilizado com o tempo de amostragem definido no oscilógrafo, quando da realização das medições em campo. Outras variáveis também podem ser inseridas no modelo através desta janela, sendo este recurso utilizado nos capítulos posteriores.

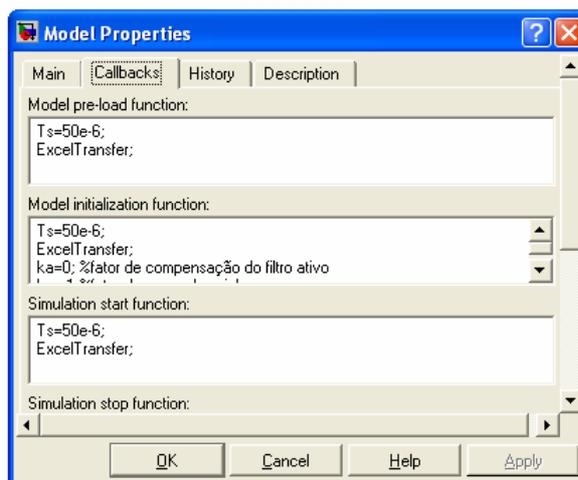


Figura 5.7 – Janela de entrada de dados *Model Properties* do *Simulink*.

### 5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO – SIMULAÇÃO

Comparar a simulação do modelo obtido com dados medidos é provavelmente a forma mais usual de se validar um modelo. Nesse caso, deseja-se saber se o modelo reproduz ao longo do tempo os dados observados. Este procedimento é importante e, em muitas aplicações, não é trivial obter um modelo cuja simulação se aproxime das observações. Por ser relativamente simples, tal procedimento é muito comum. Entretanto, há alguns cuidados que precisam ser observados, dependendo da forma como se implementa o modelo, que podem ser verificados em [13].

Na modelagem do circuito de potência em questão, uma vez que cada componente do sistema é modelado em blocos, o modelo do sistema como um todo será considerado válido se de uma forma global este incorporar características consideradas fundamentais para a aplicação em questão. Assim, a aderência das tensões e correntes geradas na simulação, quando comparadas às tensões e correntes medidas em campo validarão o modelo. Formas de onda, valores *rms* e distorções harmônicas serão adotados como balizadores para a consideração de aderência e validade do modelo implementado.

Para as verificações propostas, será abordado novamente o caso medido de operação seqüencial do laminador (MT04 e MC04) do Capítulo 4, ou seja, laminadores desbastadores e cadeiras de laminação operando de forma simultânea,

que representa a maior demanda para o sistema elétrico, em termos de potência instantânea.

A nomenclatura das tensões e correntes apresentadas considera o padrão do Capítulo 4, ou seja, quando houver referência às tensões e correntes medidas, serão usadas os índices *rst* e quando houver referência às tensões e correntes geradas pelo modelo, os índices *abc* serão os utilizados.

### 5.3.1 Validação das tensões

Como explanado na seção anterior, proceder-se-á a avaliação da aderência das tensões do barramento geradas pelo modelo com as tensões medidas. São avaliados a coerência da forma de onda, valores *rms* das tensões de linha e distorção harmônica do barramento para o caso estudado.

A figura 5.8 compara as formas de onda das tensões de linha medidas e simuladas. Na figura 5.8(a) são mostradas as tensões de linha medidas,  $V_{rst}$ , e na figura 5.8(b) as tensões de linha simuladas,  $V_{abc}$ .

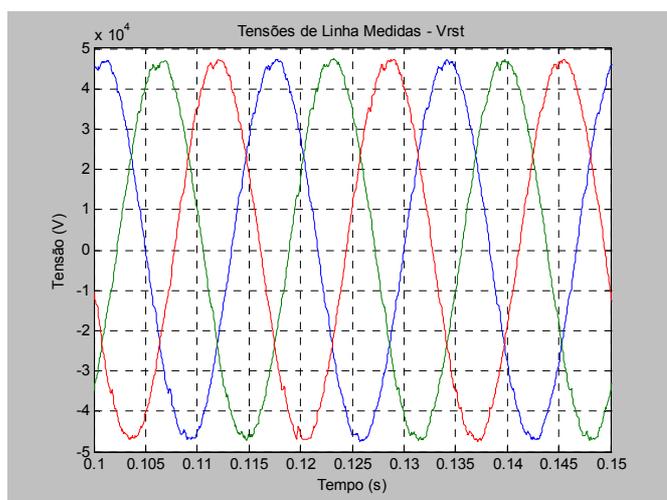
Verificando-se uma a uma as tensões de linha, figuras 5.8(c), 5.8(d) e 5.8(e), onde são comparadas as tensões  $V_{rs}$  X  $V_{ab}$ ,  $V_{st}$  X  $V_{bc}$  e  $V_{tr}$  X  $V_{ca}$ , percebe-se a aderência das tensões simuladas às medidas. Nas figuras 5.8 de (c) a (e), também é mostrado o erro da tensão, que corresponde a relação da tensão medida menos a tensão simulada, ou seja:

$$e_{t1} = V_{rs} - V_{ab} \quad (5.6)$$

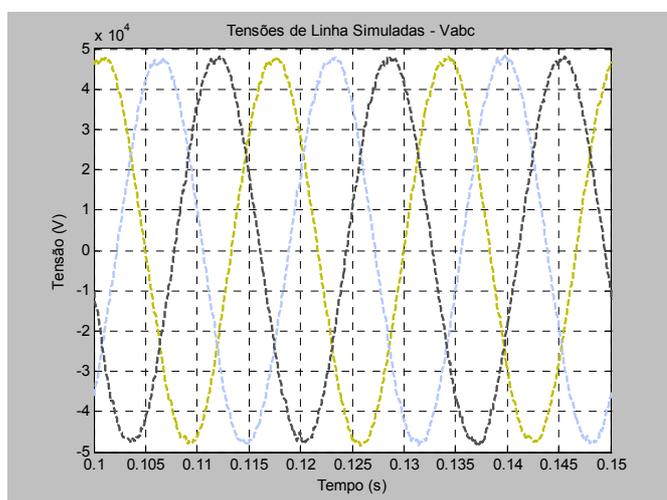
$$e_{t2} = V_{st} - V_{bc} \quad (5.7)$$

$$e_{t3} = V_{tr} - V_{ca} \quad (5.8)$$

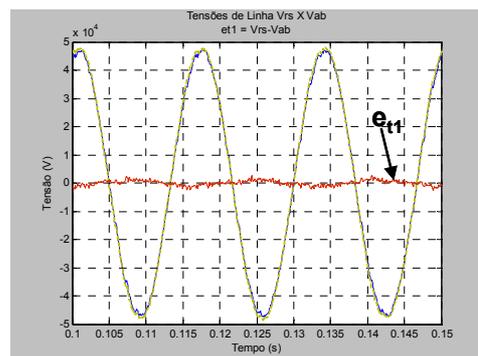
Esta verificação dos erros é mais uma forma de mostrar a elevada correlação entre as tensões de linha medidas e simuladas, sendo que, como podem ser observados, os erros relativos são sempre muito pequenos, ponto a ponto das variáveis medidas e simuladas ao longo do tempo.



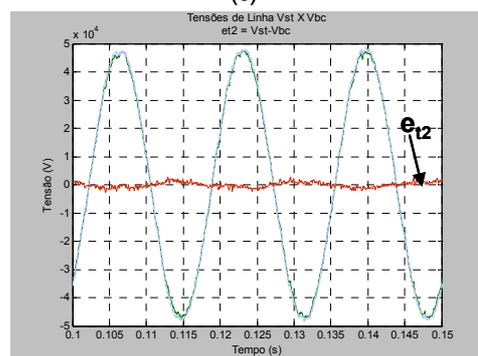
(a)



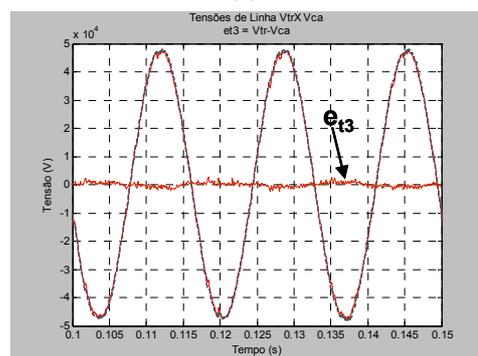
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.8 – Validação das Tensões.

(a) Tensões de linha medidas -  $V_{rst}$ . (b) Tensões de linha simuladas -  $V_{abc}$ .

(c)  $V_{rs} \times V_{ab}$ . (d)  $V_{st} \times V_{bc}$ . (e)  $V_{tr} \times V_{ca}$  e erro associado

A tabela 5.4 compara também os valores *rms* entre as tensões, mostrando valores muito próximos entre a medição e a simulação.

Tabela 5.4 – Comparação entre valores *rms* das tensões medidas e simuladas.

| <b>Valores <i>rms</i></b> |          |                  |         |
|---------------------------|----------|------------------|---------|
| <b>Medição</b>            |          | <b>Simulação</b> |         |
| $V_{rs}$                  | 33,18 kV | $V_{ab}$         | 33,21kV |
| $V_{st}$                  | 33,15 kV | $V_{bc}$         | 33,24kV |
| $V_{tr}$                  | 33,22 kV | $V_{ca}$         | 33,17kV |

Por fim, são observadas as variações entre as distorções harmônicas das tensões medidas e aquelas geradas pelo modelo, figura 5.9.

Concluí-se, portanto, pela análise dos dados apresentados, formas de onda, erro de tensão medida X simulada, valores *rms*, *THD* e espectros das harmônicas, que o modelo tem excelente aderência para as tensões, com elevada correlação.

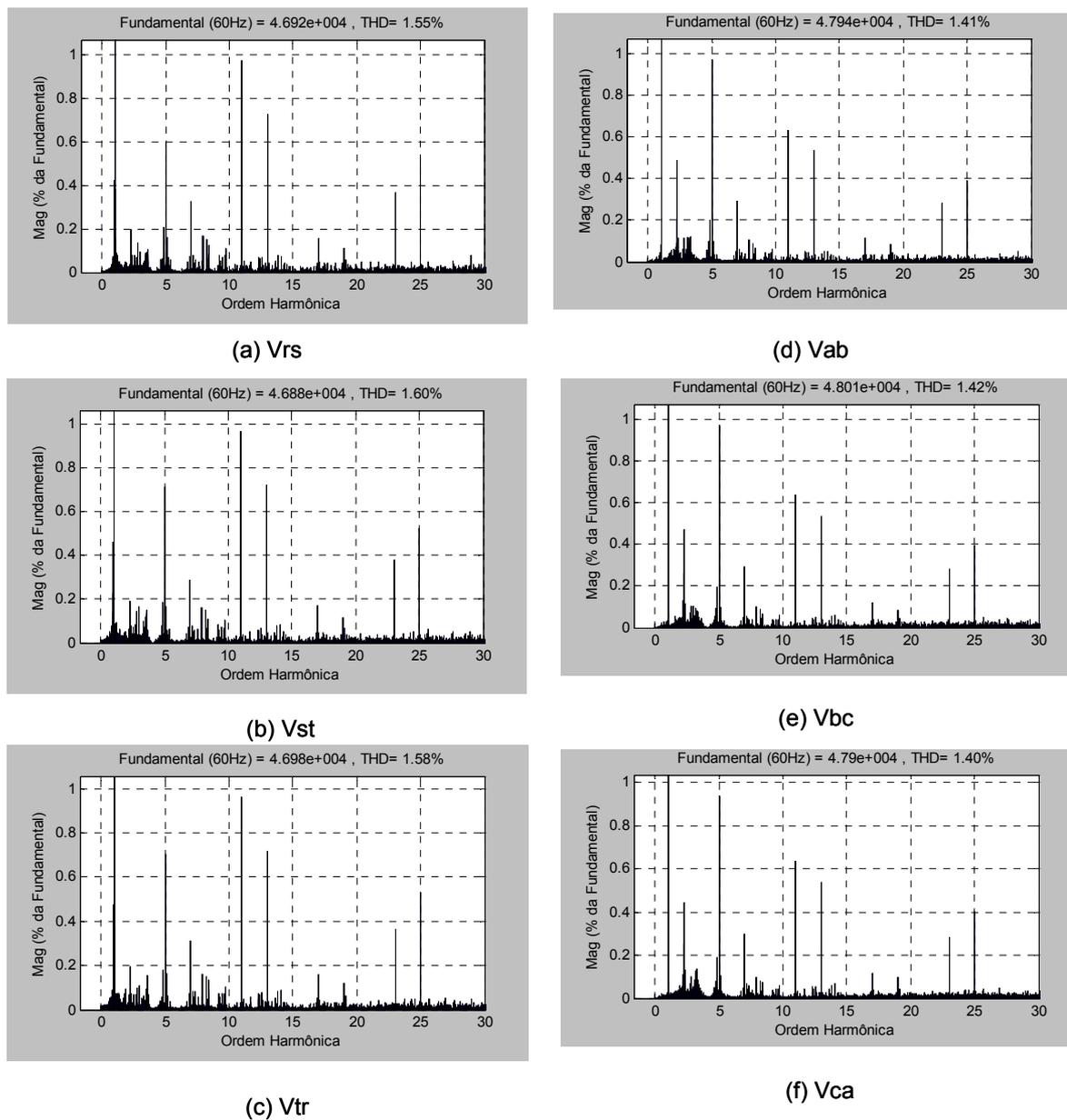


Figura 5.9 – Espectro das harmônicas por fase.

(a) (b) (c) Espectro das tensões medidas.

(d) (e) (f) Espectro das tensões simuladas.

### 5.3.2 Validação das correntes

Assim como para as tensões, uma análise sob os mesmos parâmetros é realizada para a corrente de entrada do barramento, que alimenta o conjunto de cicloconversores, e o conjunto de filtragem passiva, figura 5.4.

A figura 5.10 compara as formas de onda das correntes de linha medidas e simuladas. A Figura 5.10(a) mostra as correntes de linha medidas,  $I_r$ ,  $I_s$ ,  $I_t$ , e na Figura 5.10(b) as tensões de linha simuladas,  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ , são mostradas.

Comparando-se uma a uma as correntes de linha, figuras 5.10(c), 5.10(d) e 5.10(e), percebe-se a aderência das correntes simuladas às medidas, com alto-grau de correlação entre elas.

Assim como realizado para as tensões, verifica-se uma a uma as correntes de linha, figuras 5.10(c), 5.10(d) e 5.10 (e), onde são comparadas as tensões  $I_r \times I_a$ ,  $I_s \times I_b$  e  $I_t \times I_c$ . As correntes simuladas, apesar de relativamente um pouco menos aderentes se comparadas às tensões, ainda mantém um alto grau de correlação com as correntes medidas. Nas mesmas figuras também são mostrados os erros das correntes, que corresponde à relação das correntes medidas menos as simuladas, de acordo com as equações a seguir:

$$e_{c1} = I_r - I_a \quad (5.9)$$

$$e_{c2} = I_s - I_b \quad (5.10)$$

$$e_{c3} = I_t - I_c \quad (5.11)$$

A tabela 5.5 compara os valores *rms* entre as correntes, mostrando valores muito próximos entre a medição e a simulação.

Tabela 5.5 – Comparação entre valores *rms* das correntes medidas e simuladas.

| Valores <i>rms</i> |         |           |        |
|--------------------|---------|-----------|--------|
| Medição            |         | Simulação |        |
| <b>Ir</b>          | 658,5A  | <b>Ia</b> | 677,1A |
| <b>Is</b>          | 651,0A  | <b>Ib</b> | 658,9A |
| <b>It</b>          | 672,4 A | <b>Ic</b> | 677,1A |

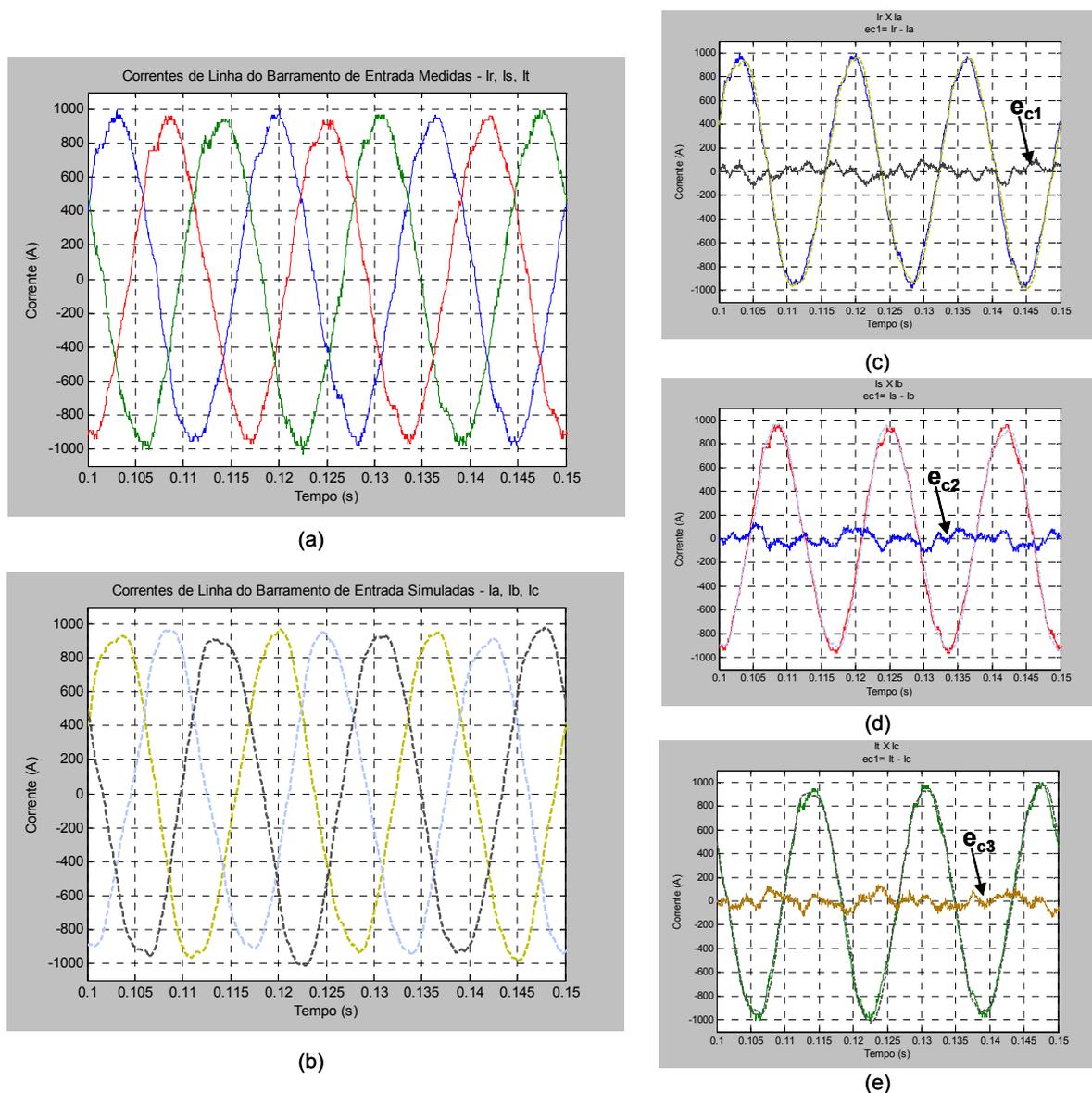


Figura 5.10 – Validação das Correntes.

(a) Correntes de linha medidas –  $I_r, I_s, I_t$ . (b) Correntes de linha simuladas –  $I_a, I_b, I_c$ .(c)  $I_r \times I_a$ . (d)  $I_s \times I_b$ . (e)  $I_t \times I_c$  e erro associado.

Da mesma forma que para a tensão, são observadas as variações das distorções harmônicas das correntes medidas e aquelas geradas pelo modelo, figura 5.11.

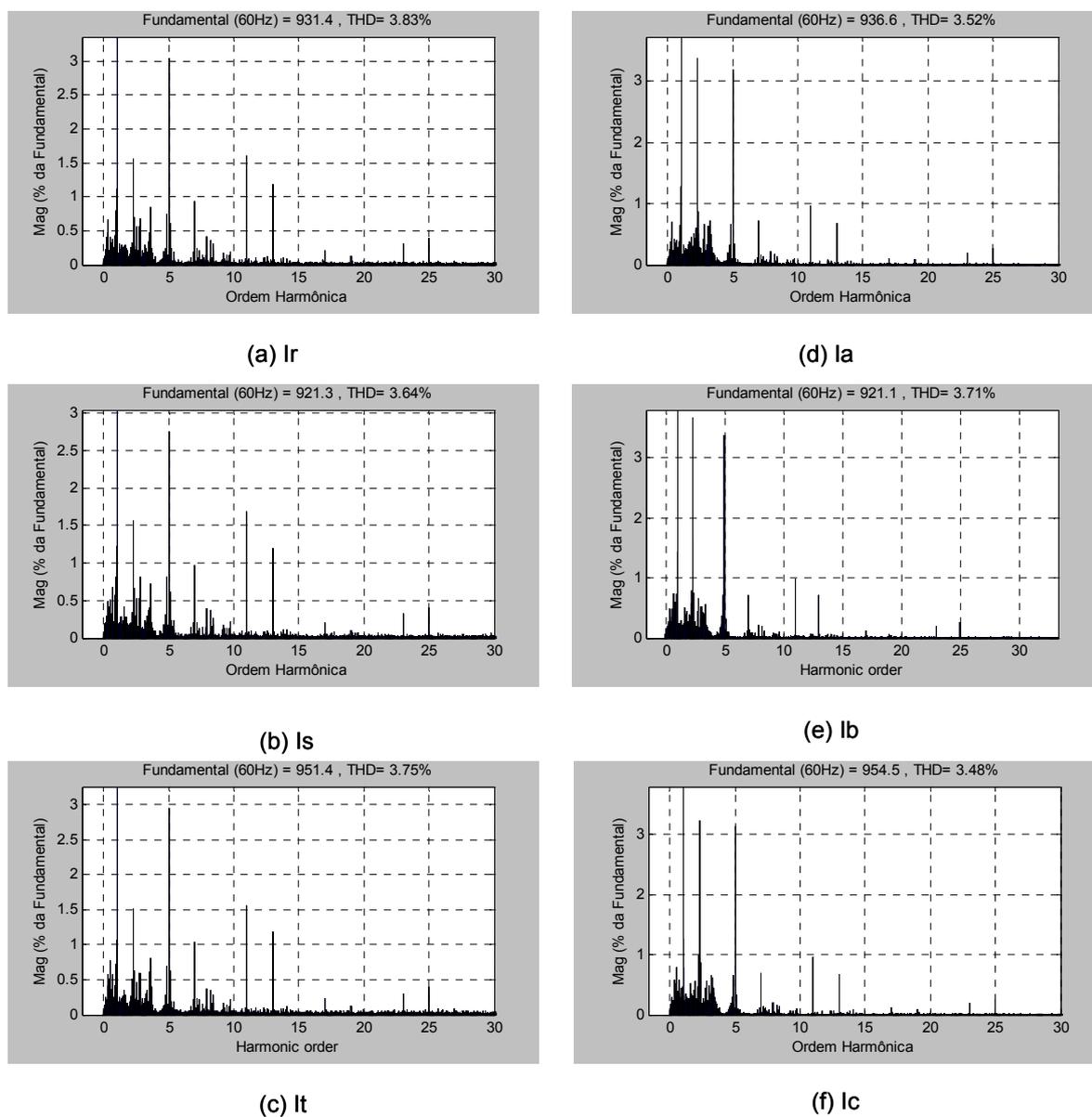


Figura 5.11 – Espectro das harmônicas de corrente por fase.

(a) (b) (c) Espectro das correntes medidas.

(d) (e) (f) Espectro das correntes simuladas.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o modelo implementado obteve excelente aderência às variáveis de interesse (tensões e correntes medidas em área) e pode, assim, ser utilizado como uma referência válida para simulações e avaliações diversas no sistema elétrico de potência do Laminador em estudo.

#### **5.4 SIMULAÇÃO DE AMPLIAÇÃO DO LAMINADOR**

Uma vez obtido e validado o modelo do sistema elétrico do laminador, torna-se possível a caracterização, através de simulações, de situações diversas, ocasionadas por alterações de parâmetros ou formas de operação deste laminador. Estas simulações devem considerar situações realistas, a exemplo da possível expansão de suas cargas elétricas, frente a uma expansão da planta para aumentos de produção.

Desta forma, como considerado no parágrafo anterior, proceder-se-á à simulação de uma expansão da planta do laminador. Para tal, será simulada uma condição bastante severa para a planta, considerando-se o aumento da carga em 30% do seu valor atual, que poderia representar, por exemplo, a entrada de um novo conjunto de laminadores desbastadores (“*Top*” e “*Bottom*”), implementando um aumento de carga de 2 x 7,5MVA ao sistema. A figura 5.12 representa o arranjo do processo de laminação, considerando sua expansão através da inserção de novos Laminadores.

A análise que se realizará a seguir pretende, e se limita, a abordar os possíveis efeitos da expansão da carga elétrica da planta para o sistema de compensação harmônica existente. Não é o propósito a identificação de necessidades gerais para a expansão do sistema elétrico correspondente, tais como: demanda total de potência, capacidade dos elementos do sistema de alimentação, estudo de estabilidade do sistema elétrico da usina correlacionado à concessionária local de energia, limitações de operação, estudo do fluxo de reativo do sistema, tecnologias a serem utilizadas, estudos de coordenação da proteção, ajustes diversos e outras necessidades.

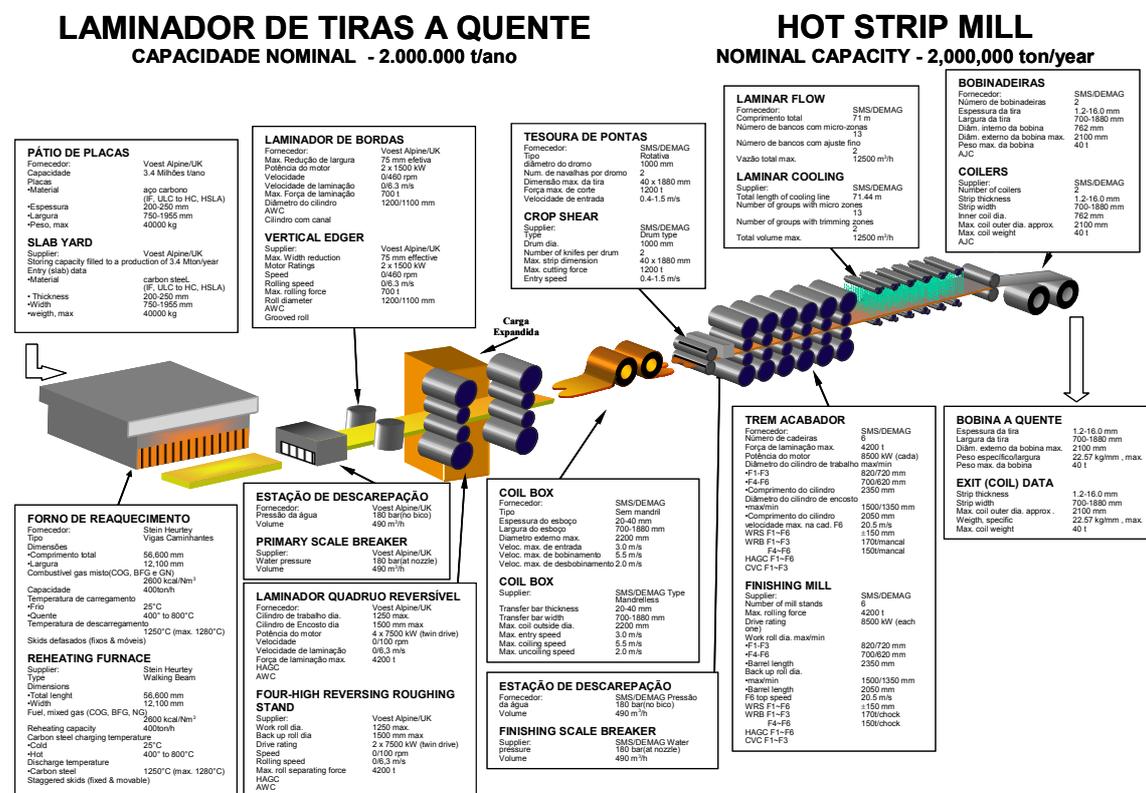


Figura 5.12 – Processo de laminação – Representação da expansão da planta com inserção de novos laminadores desbastadores.

São considerados dois panoramas na avaliação:

- ✓ **Panorama 1:** Carga atual do laminador (caso base). Operação em momento de maior demanda, ou seja, operação sequencial (laminadores desbastadores e cadeiras de laminação operando simultaneamente);
- ✓ **Panorama 2:** Carga do laminador acrescida em 30%, situação também de operação em laminação sequencial.

As simulações que se seguem consideram as características nominais dos ramos do sistema de filtragem passiva existente a saber, tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Características nominais dos ramos do sistema de filtragem passiva existente.

| <b>Filtro</b> | <b>Potência Nominal do Ramo</b> | <b>Corrente Nominal (rms)</b> |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 2,60 HP       | 10,0 MVar                       | 167 A                         |
| 4,08 FL       | 10,8 MVar                       | 181 A                         |
| 6,00 HP       | 12,5 MVar                       | 209 A                         |
| 10,00 HP      | 12,3 MVar                       | 206 A                         |

#### **5.4.1 Panorama 1: Situação atual de arranjo da planta em laminação seqüencial.**

Os resultados de simulação a seguir apresentados têm como objetivo o levantamento de parâmetros de referência para avaliação das demais situações simuladas. É simulada a condição de laminação seqüencial, sem expansão da carga elétrica, ou seja, situação atual de operação.

As figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados de simulação para a condição acima descrita. Verifica-se que as correntes dos ramos do sistema de filtragem passiva encontram-se ligeiramente abaixo dos valores nominais, operando sem restrições nas condições atuais.

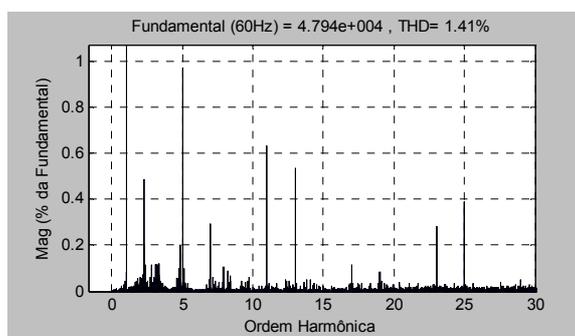
É interessante observar, através da figura 5.14, a contribuição de cada ramo para a filtragem das harmônicas mais relevantes.

Além dos valores de corrente, a *THD* de corrente e de tensão do barramento também devem ser observadas e servirão de referência para as simulações subseqüentes. A tensão do barramento, assim como discutido anteriormente, foi ajustada para operar nos mesmos níveis de amplitude e ângulo das medições realizadas no barramento, para o caso base.

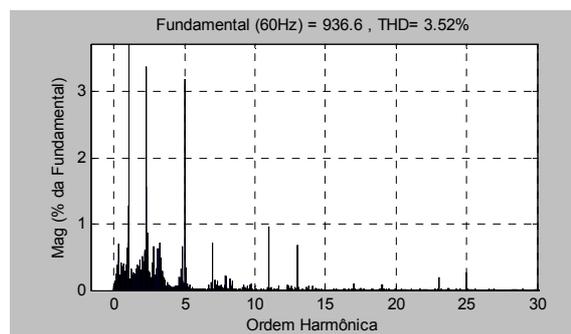
Tabela 5.7 - Resultado de simulação – Panorama 1

| Parâmetro                             | Valores de simulação (rms) |
|---------------------------------------|----------------------------|
| V <sub>ab</sub> (V de linha da Barra) | 33,22kV / 0,96pu           |
| I <sub>a_B1</sub> (Cor. Total Barra)  | 668,9 A                    |
| I <sub>a_B2</sub> (Cor. Ciclo)        | 1148 A                     |
| I <sub>a_B3</sub> (Cor. F.Passivo)    | 733,6 A                    |

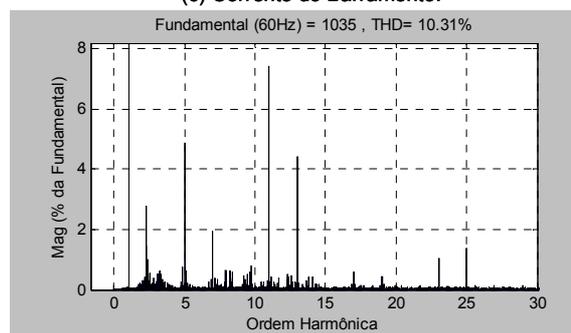
(a)



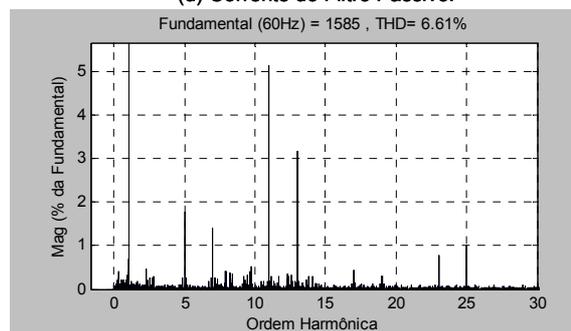
(b) Tensão do Barramento.



(c) Corrente do Barramento.



(d) Corrente do Filtro Passivo.



(e) Corrente dos Cicloconverters.

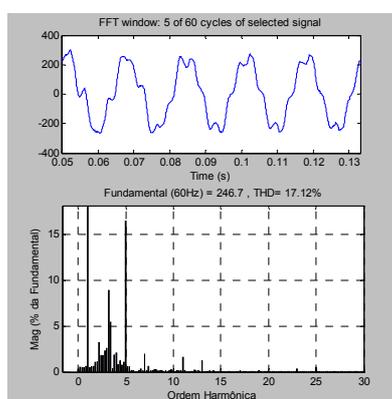
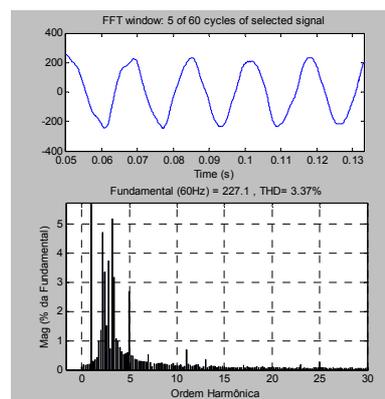
Figura 5.13 – Resultados de simulação – Panorama de simulação 1.

Tabela 5.8 - Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 1

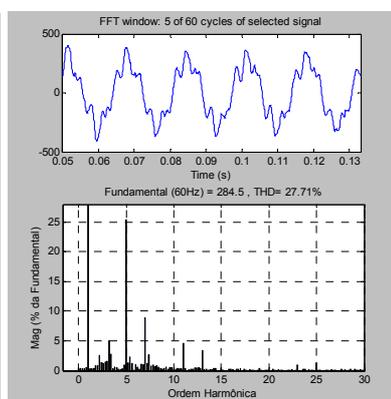
| Corrente  | Corrente Nominal (rms) | Corrente Simulada (rms) |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| la_B3     | -                      | 733,6 A                 |
| la_2,6HP  | 167 A                  | 161,9 A                 |
| la_4,08FL | 181 A                  | 174,0 A                 |
| la_6HP    | 209 A                  | 203,4 A                 |
| la_10HP   | 206 A                  | 203,6 A                 |

(a)

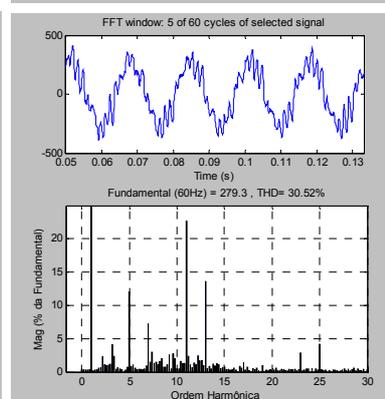
(b) la\_2,6HP



(c) la\_4,08FL



(d) la\_6HP



(e) la\_10HP

Figura 5.14 – Valores nominais de corrente e resultados de simulação para os ramos do sistema de filtragem passiva - Panorama de simulação 1.

#### 5.4.2 Panorama 2: Expansão da planta em 30% de sua carga para a situação de laminação seqüencial medida.

São verificados a seguir panoramas de simulação considerando-se a expansão da planta em 30% da carga, na condição de laminação seqüencial, que representa a condição de maior demanda de potência para o sistema elétrico.

É realizada uma abordagem inicial da simulação, Panorama 2A, com os resultados apontados nas tabelas 5.9 e 5.10. Verifica-se que, com o aumento da carga dos cicloconverters é registrada uma queda de 4% no nível de tensão do barramento. Em conseqüência, o nível de corrente para o conjunto de cicloconverters aumenta (la\_B1 da tabela 5.9), para o atendimento do nível de potência.

Outro efeito do aumento da carga observado é a queda nos valores de corrente dos ramos do sistema de filtragem passiva, associada, principalmente, à queda de tensão do barramento.

Deve-se considerar para o sistema elétrico que, valores de tensão inferiores a determinados limites, podem provocar desligamento de equipamentos, resultando em perdas de produção. Os equipamentos ligados a esta barra tornar-se-iam mais vulneráveis a possíveis afundamentos de tensão, uma vez que essa já se encontrariam com valores críticos para sua operação. Os limites de tensão dos equipamentos referidos são especificados pelos fabricantes e se constituem em referências para especificação da aplicação, ajustes de proteção, estratégias de operação do sistema elétrico, etc.

Tabela 5.9 - Resultados de simulação – Panorama 2A

| Parâmetro                        | Valores de simulação (rms) |
|----------------------------------|----------------------------|
| <b>Vab</b> (V de linha da Barra) | 31,66kV / 0,92pu           |
| <b>la_B1</b> (Cor. Total Barra)  | 999 A                      |
| <b>la_B2</b> (Cor. Ciclo)        | 1492 A                     |
| <b>la_B3</b> (Cor. F.Passivo)    | 700,5 A                    |

Tabela 5.10 - Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 2A

| Corrente         | Corrente Nominal (rms) | Corrente Simulada (rms) |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>la_B3</b>     | -                      | 700,5 A                 |
| <b>la_2,6HP</b>  | 167 A                  | 154,5 A                 |
| <b>la_4,08FL</b> | 181 A                  | 166,4 A                 |
| <b>la_6HP</b>    | 209 A                  | 196,4 A                 |
| <b>la_10HP</b>   | 206 A                  | 199,5 A                 |

Visando à implementação de uma simulação mais consistente e que reproduza as condições do sistema elétrico, realizar-se-á então o ajuste da tensão da fonte. Esta é também uma situação que se justifica na prática, devido à presença de dispositivo de ajuste automático de tensão no transformador 138/34,5kV-75MVA, da subestação do laminador [33].

São realizados ajustes na amplitude da tensão, mantendo o mesmo nível registrado na simulação do Panorama 1, ou condição atual de operação. Para manter a veracidade na expansão em 30%, faz-se necessária também a realização de ajustes no valor do ângulo da tensão da fonte ideal, reproduzindo no secundário do transformador o defasamento experimental entre tensões e correntes (fundamentais). Este ajuste de ângulo é realizado através da rotina *Calcu\_TensaoFonte\_Impedância.m*, apresentado no Apêndice B. Os resultados verificados em simulação são mostrados nas figuras 5.15 e 5.16.

Verifica-se que as distorções harmônicas de tensão e corrente no barramento têm seus valores alterados a maior, figuras 5.15 (b) e (c), mas mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas (IEEE e PRODIST), como discutido no Capítulo 4.

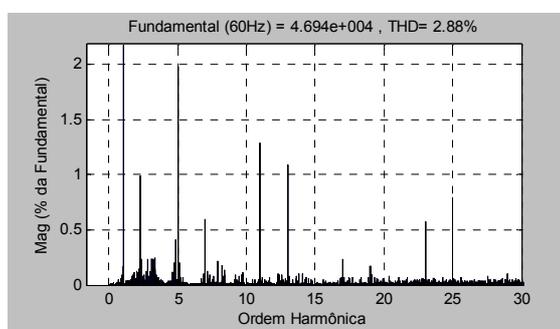
A tabela 5.12 da figura 5.16, mostra uma ligeira elevação nos valores de correntes dos ramos do sistema de filtragem passiva, apresentando-se acima dos valores nominais. Este aumento no valor das correntes coloca cada ramo, individualmente, mais susceptíveis a desarmes (“*trip*”) por proteção de sobrecarga, o que traria sérios prejuízos ao sistema de compensação harmônica. O acréscimo nos valores nominais de alimentação do circuito, nas dimensões verificadas, não deve ultrapassar limites de suportabilidade e reservas de capacidade, adotadas em projetos de filtros. A especificação geral do filtro harmônico existente [37] mostra no seu item de desempenho a suportabilidade do filtro a sobrecargas impostas e o tempo que o equipamento pode suportar esta sobrecarga. Por exemplo, uma sobrecarga de 20% nos valores nominais somente será suportada por um período máximo de 5 minutos. Sobrecargas tendem a degradar os componentes do filtro, diminuindo sua vida útil, com possibilidade de acarretar dano imediato e irreversível ao sistema de filtragem dependendo de sua dimensão.

As harmônicas mais relevantes permanecem as mesmas, no entanto, com seus valores relativos à fundamental acrescidos. Esta situação pode se tornar crítica, caso provoque desligamento dos ramos do sistema de filtragem passiva, em virtude do tipo de proteção elétrica utilizada neste sistema, que monitora e limita os valores das correntes harmônicas individuais que circulam por cada ramo.

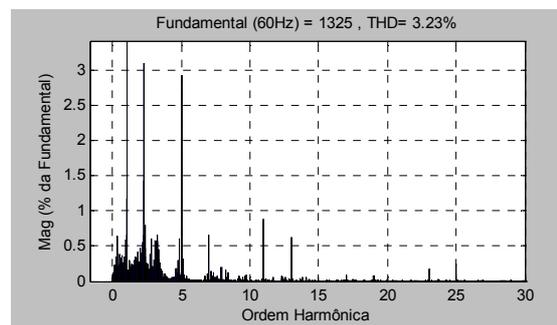
Tabela 5.11 - Resultados de simulação – Panorama 2B

| Parâmetro                             | Valores de simulação (rms) |
|---------------------------------------|----------------------------|
| V <sub>ab</sub> (V de linha da Barra) | 33,21kV / 0,96pu           |
| I <sub>a_B1</sub> (Cor. Total Barra)  | 949,6 A                    |
| I <sub>a_B2</sub> (Cor. Ciclo)        | 1457 A                     |
| I <sub>a_B3</sub> (Cor. F.Passivo)    | 757,6 A                    |

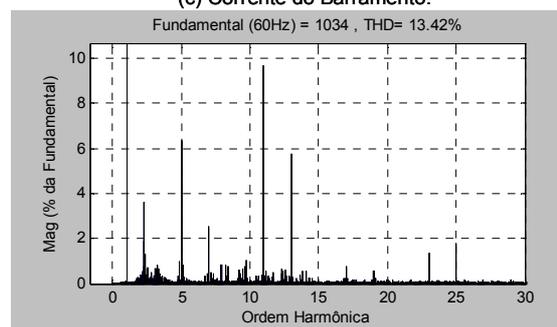
(a)



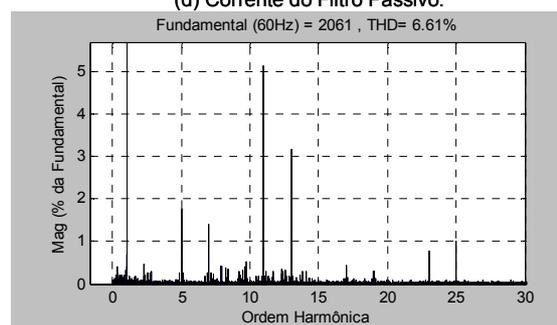
(b) Tensão do Barramento.



(c) Corrente do Barramento.



(d) Corrente do Filtro Passivo.



(e) Corrente dos Cicloconverters.

Figura 5.15 - Resultados de simulação – Panorama de simulação 2B.

Diante do panorama verificado, sugere-se o estudo de alternativas que permitam o sistema de filtragem passiva operar com os valores de corrente (fundamental, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> harmônica, etc.) nas condições atuais, sem expansão do sistema.

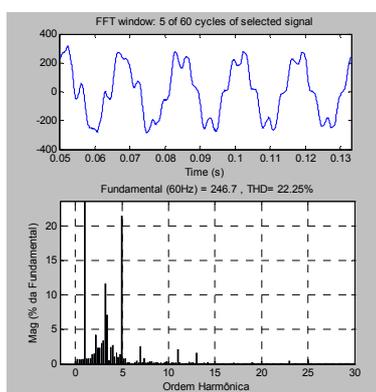
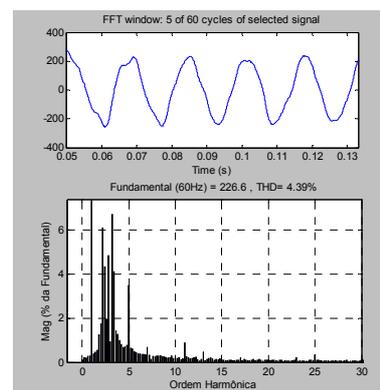
Presume-se que a utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem permitirá um melhor desempenho do sistema sob análise, sendo este o próximo passo do estudo.

Tabela 5.12 - Valores nominais e resultados de simulação – Panorama 2B

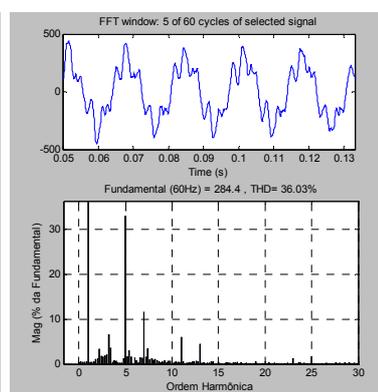
| Corrente  | Corrente Nominal (rms) | Corrente Simulada (rms) |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| la_B3     | -                      | 757,6 A                 |
| la_2,6HP  | 167 A                  | 170,9 A                 |
| la_4,08FL | 181 A                  | 190,9 A                 |
| la_6HP    | 209 A                  | 219,6 A                 |
| la_10HP   | 206 A                  | 215,6 A                 |

(b) la\_2,6HP

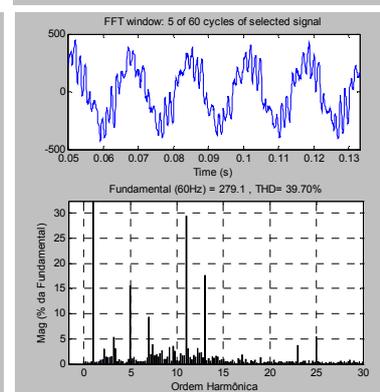
(a)



(c) la\_4,08FL



(d) la\_6HP



(e) la\_10HP

Figura 5.16 - Valores nominais de corrente e resultados de simulação para o sistema de filtragem passiva - Panorama de simulação 2B.

## 5.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma abordagem detalhada da implementação dos blocos funcionais de um modelo capaz de simular o sistema elétrico do laminador estudado. Foram detalhados os ajustes necessários, a partir de determinados pontos de operação do sistema verificados durante medições, e realizada a validação das principais variáveis elétricas do modelo implementado. Os resultados de simulação, confrontados com os medidos, mostraram um modelo robusto e apto a avaliações diversas, como alterações de condições ou formas de operação da planta e do seu sistema de distribuição de energia elétrica.

Outra questão abordada neste capítulo, como aprofundamento dos estudos do sistema elétrico baseados no modelo implementado, foi a verificação dos efeitos da

expansão da carga elétrica do laminador com foco nos impactos sobre o sistema de compensação harmônica existente.

# **6. APLICAÇÃO DE FILTRO HÍBRIDO NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR**

*O aprofundamento dos estudos do sistema elétrico do Laminador, baseado no modelo implementado, sugere a investigação da utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido acoplado ao sistema elétrico de potência. Este estudo permite verificar as possíveis melhorias de desempenho do sistema de compensação sob análise, se considerada a expansão da planta.*

## **6.1 COMPENSAÇÃO HARMÔNICA HÍBRIDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

Como observado nos Capítulos 4 e 5, o esforço de filtragem passiva melhora significativamente a forma de onda de tensões e correntes no sistema elétrico estudado, mantendo os limites de distorções harmônicas dentro das recomendações dos padrões de referência adotados, para as diferentes situações de operação observadas ou simuladas.

Alterações nas atuais condições operacionais do sistema elétrico, como expansões na planta ou mudanças nas atuais condições do sistema elétrico podem, como simulado no Capítulo 5, resultar em penalidades ao sistema de distribuição de energia local e em consequência ao sistema de compensação harmônica existente, e em consequência deteriorando os índices de qualidade de energia da planta.

Apesar dos resultados das simulações realizadas no Capítulo 5 apontarem para a manutenção dos índices de qualidade de energia dentro dos limites impostos por padrões, cenários de expansão ou alterações das condições operacionais da planta sugerem a verificação de estratégias que permitam manter a operação e a manutenção do sistema da forma como se encontra atualmente. Frente à

necessidade destas investigações, propõem-se que as condições do sistema sejam melhoradas empregando-se outras técnicas, como a utilização de filtragem ativa conjunta à filtragem passiva, formando um sistema híbrido de compensação harmônica.

Filtros híbridos têm se tornado cada vez mais uma solução atraente em ambientes industriais e, sendo assim, várias topologias como as que combinam filtro ativo série com filtro passivo paralelo [22], filtro ativo em série com o filtro passivo [23,24] ou operação paralela de ambos os sistemas [25] tem sido exploradas, com o intuito de combinar as vantagens dos filtros passivos e filtros ativos. Algumas destas topologias foram mostradas no Capítulo 2.

Como forma de preservar as características de instalação e operação do sistema elétrico estudado neste trabalho, e com o intuito de se verificar os efeitos da inserção de um sistema de filtragem ativa no sistema, propõe-se a topologia que combina as vantagens da atual filtragem passiva com a implantação de Filtros Ativos, através da operação paralela destes conjuntos. Esta topologia é atraente para o sistema em questão e possui várias vantagens, como a manutenção de independência de operação do sistema de filtragem passiva, podendo esse operar com ou sem o filtro ativo. Nesta situação a filtragem ativa deverá ser controlada de forma a atuar somente sobre uma parcela das necessidades de filtragem do sistema, permitindo assim a redução em potência (MVA), do seu dimensionamento [25].

Deve-se considerar que os impactos operacionais da implantação de novos sistemas a plantas existentes e em operação, com reflexo direto na cadeia produtiva de uma empresa, devem ser sempre minimizados. Estes fatores constituem-se também como determinantes na escolha de uma solução de engenharia em detrimento de outra. A topologia proposta torna-se assim uma solução interessante quando há a necessidade de realização de “*retrofitings*” de plantas existentes, que já possuem sistemas de filtragem passiva instalados, como o caso em estudo. Desta forma causaria menor impacto à operação do processo produtivo, durante sua instalação e/ou manutenção dos conjuntos, se instalada na topologia proposta, detalhada na próxima seção.

## 6.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO

A figura 6.1 ilustra de forma esquemática a configuração de filtragem híbrida proposta, onde o sistema de filtragem ativa é inserido paralelamente ao sistema elétrico fonte e ao conjunto de cicloconversores (carga do sistema elétrico estudado que acionam os motores síncronos (*MS*) do laminador) e filtragem passiva.

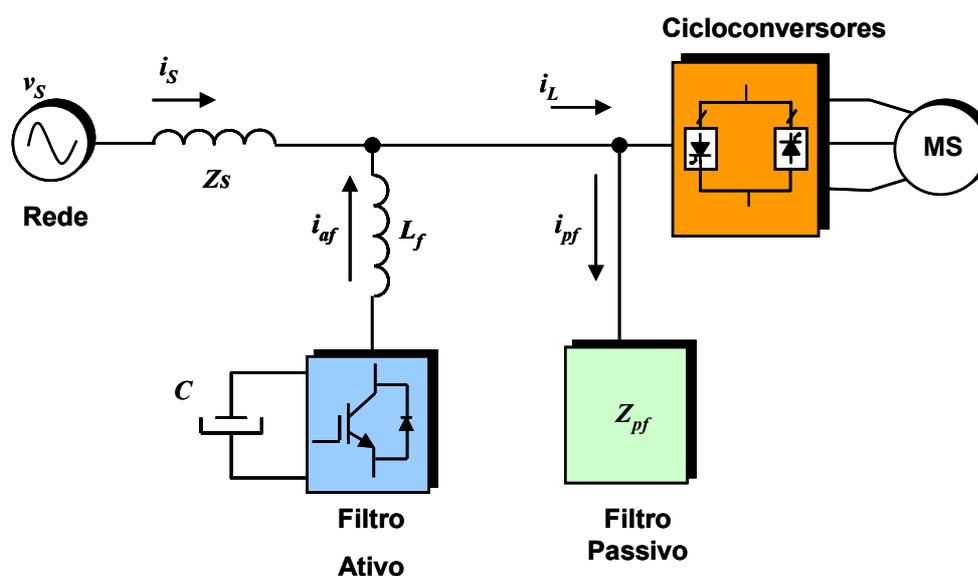


Figura 6.1 – Esquema da instalação paralela dos filtros ativo e passivo

O filtro passivo,  $Z_{pf}$ , é sintonizado para remover o conjunto de harmônicas principais geradas pelo conjunto Cicloconversores, como visto no Capítulo 2. A conexão em paralelo do filtro ativo e o seu controle em corrente permitem injetar correntes harmônicas no sistema local, visando o cancelamento de uma parcela das correntes harmônicas geradas pela carga.

Um filtro ativo conectado em paralelo com a rede e com um filtro passivo irá se comportar como uma fonte de corrente que pode ser controlada em proporção à corrente harmônica  $I_{ah}$ , expressa como  $G_A I_{ah}$  e ilustrada na figura 6.2. Existirão portanto duas fontes de corrente nesta representação, a fonte de corrente harmônica

gerada pela carga não linear e a fonte de corrente da compensação harmônica, gerada e controlada pelo filtro ativo [25].

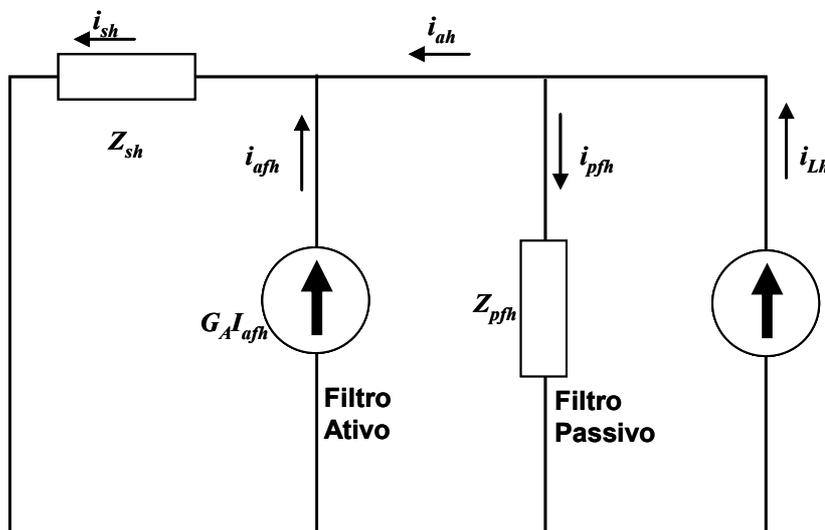


Figura 6.2 – Sistema de Filtragem Híbrida, representação por fontes de corrente.  
(h=ordem harmônica)

### 6.3 OPERAÇÃO COORDENADA ENTRE FILTROS ATIVOS E PASSIVOS

A operação de filtros passivos e ativos para a configuração proposta deve levar em consideração uma estratégia de controle coordenada [30]. As correntes harmônicas geradas pelo filtro ativo não devem ser coincidentes com as correntes de compensação do filtro passivo nem por este circularem. Caso isso ocorra os filtros poderão se sobrecarregar, desligando-se por proteção e perdendo suas funções de compensação. Um estudo sobre a coordenação desta operação será realizado ainda no transcorrer deste capítulo e abordará melhor estes aspectos de operação coordenada.

### 6.4 O CONTROLE DO FILTRO ATIVO

A eficácia de compensação harmônica do Filtro Ativo está relacionada, dentre outras questões, à sua topologia, que possui efeito direto na sua habilidade de gerar as correntes harmônicas nas faixas desejadas. Assim, dentro das características de

topologia do filtro ativo, devem ser avaliados com bastante critério os métodos de detecção e controle da corrente ou tensão, uma vez que estes definem diretamente a eficácia de operação do filtro, principalmente no que concerne à sua precisão, resposta dinâmica e banda de passagem (“*bandwidth*”) [27].

Como mencionado, um dos pontos chave para a implementação do controle do filtro ativo é o uso de métodos eficazes para geração das referências de tensão e corrente. Existe na literatura uma variedade de filosofias de implementações, suportadas por diferentes teorias (no domínio do tempo ou da frequência) [26,27, 28].

Neste trabalho será utilizado o método *SRF* (“*Synchronous Reference Frame*”) que realizará a extração e geração das referências de controle. Um diagrama esquemático com os principais blocos da topologia proposta é mostrado na figura 6.3.

O método *SRF* é menos susceptível às distorções de tensão uma vez que utiliza sinais sincronizados com a fundamental da fonte, gerados por um “*Phase Locked Loop*” (*PLL*) [29], além de proporcionar dinâmica e precisão suficientes [26] à aplicação idealizada por este estudo.

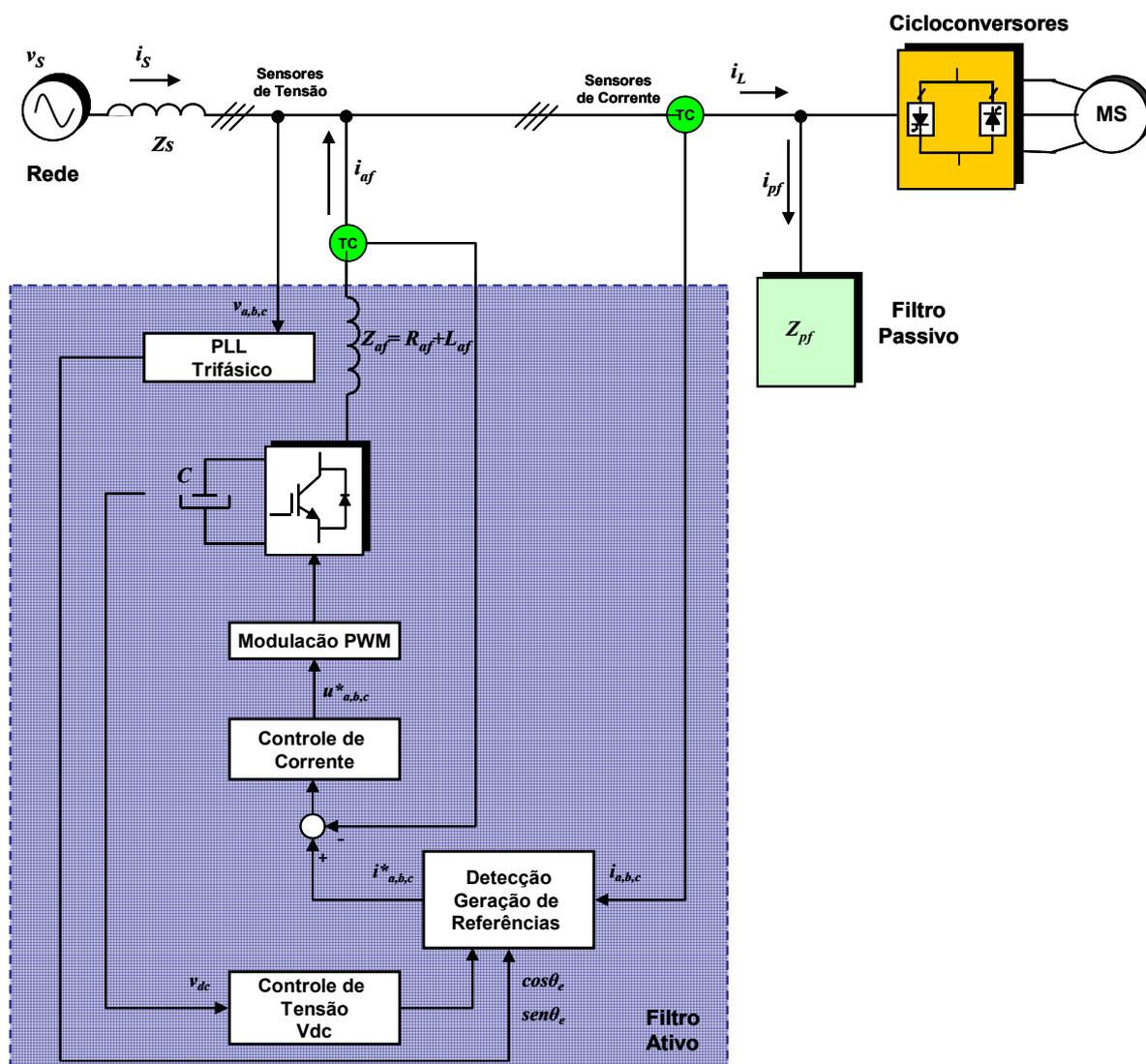


Figura 6.3 – Filtro ativo → Diagrama esquemático.

A figura 6.4 mostra o ramo principal do Controlador *SRF* desenvolvido neste estudo, para a aplicação do filtro ativo.

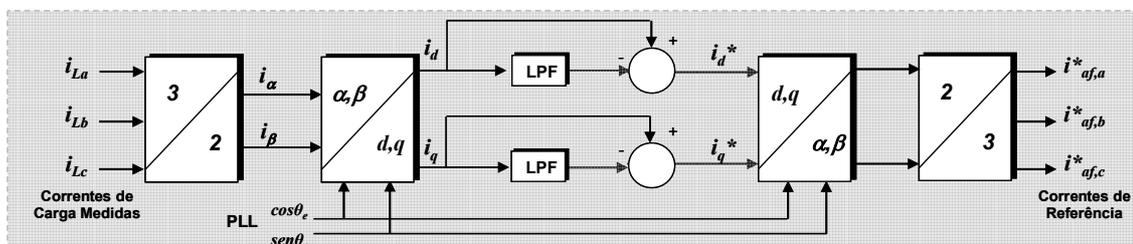


Figura 6.4 – Controle principal do filtro ativo – “Synchronous Reference Frame” – *SRF*.

No *SRF* os eixos  $a$ ,  $b$  e  $c$  representam as grandezas trifásicas. A escolha de um conjunto de eixos estacionários,  $\alpha$  e  $\beta$ , permite a obtenção da representação das grandezas trifásicas através de grandezas bifásicas. Neste caso, esta representação é obtida pela transformação:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Além disto, o referencial síncrono, formado pelos eixos  $d$  e  $q$ , e girando no espaço a uma freqüência angular igual à freqüência angular relacionada às variações temporais das grandezas trifásicas, define um ângulo instantâneo  $\theta$ . A obtenção da representação das grandezas bifásicas neste referencial de eixos síncronos é feita através da relação:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

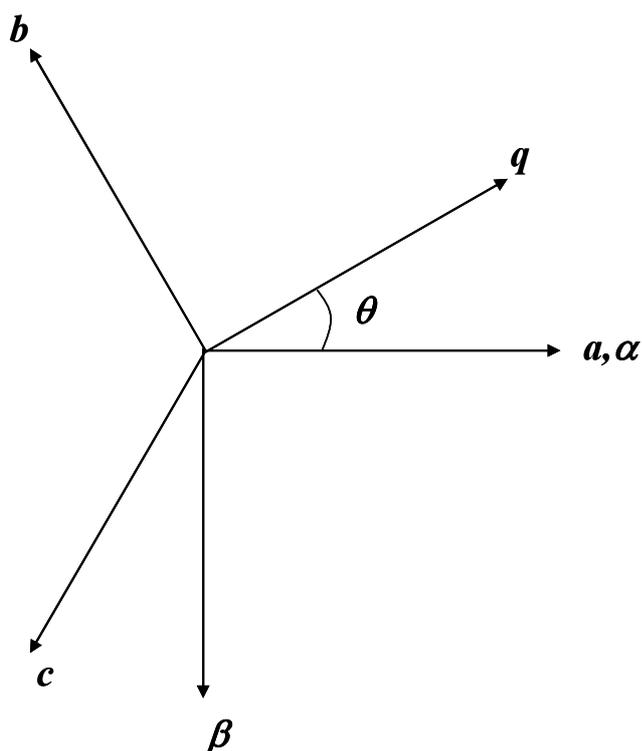


Figura 6.5 – Sistema de eixos de referência para as transformações.

As relações inversas à (6.1) e (6.2) são dadas, respectivamente por:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

No Controlador *SRF* da Figura 6.4 a corrente de carga  $i_L$  é medida e as correntes harmônicas desta são extraídas no referencial síncrono  $d-q$ . Os vetores unitários são gerados por um circuito “*Phase Locked Loop*” (*PLL*) através da tensão de rede. No referencial síncrono  $d-q$  a componente fundamental da corrente é transformada em grandeza  $cc$ , em ambos os eixos, e todas as componentes harmônicas são transformadas para grandezas  $ca$ , com uma frequência de deslocamento em 60Hz, dependendo da ordem harmônica a que está associada [27].

As componentes  $cc$  são extraídas pelo filtro passa-baixa ( $LPF$ ) implementado em ambos os eixos  $d-q$ , detectando portanto, somente as quantidades alternadas relativas às harmônicas. O filtro passa-baixa utilizado foi implementado por um filtro Butterworth de 2ª (segunda) ordem com uma frequência de corte de 30Hz.

O Apêndice A aborda com maiores detalhes as etapas de implementação da simulação do filtro ativo.

## 6.5 ESTUDO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Para fins de avaliação da topologia de filtragem híbrida proposta, avaliação de desempenho do controle e da operação conjunta dos filtros ativos e passivos, foi implementado um modelo do sistema para verificações. A implementação destas simulações foi também realizada no ambiente de simulação do aplicativo *Matlab/Simulink/PowerSystem Blockset*.

Utilizou-se neste estudo o modelo implementado do sistema elétrico do laminador, detalhado no Capítulo 5. O sistema contempla assim, a modelagem do sistema de distribuição de energia da planta, a partir do secundário do seu transformador de 138/34,5kV – 75MVA; sistema de injeção de correntes, modelando o comportamento como carga elétrica dos 8 (oito) conjuntos cicloconversores; sistema de filtragem passiva; e sistema de filtro ativo, modelando seu controle e potência (injeção de correntes de compensação).

As simulações realizadas são implementadas em um ambiente ideal, ou seja, não é modelado neste momento o conversor  $CC/CA$  do filtro ativo, uma vez que, o que se pretende verificar é a eficácia da topologia, sua operação coordenada ao conjunto de filtragem passiva e características gerais do sistema proposto. Assim, o conversor de potência será modelado por fontes ideais de corrente, injetando as correntes de compensação diretamente no barramento estudado.

A figura 6.6, ilustra de forma global o modelo simulado em ambiente *Matlab/Simulink*.



### 6.5.1 Operação Paralela dos Filtros Ativo e Passivo.

Será apresentada uma análise da operação combinada dos sistemas de filtragem, considerando o efeito da compensação harmônica global do sistema, as melhorias da forma de onda impostas pela inserção do filtro ativo, a coordenação da operação dos filtros, o fluxo de corrente entre os sistemas e os níveis de amplitude das principais grandezas envolvidas nos casos que serão simulados.

Considere-se a figura 6.7, que mostra o circuito equivalente da técnica de compensação aplicada. O circuito de controle atua sob o filtro ativo de acordo com a referência de corrente  $I_{Lh}$  (corrente harmônica da carga) que neste caso corresponde à soma das correntes harmônicas do conjunto de cicloconversores e do sistema de filtragem passiva [30].

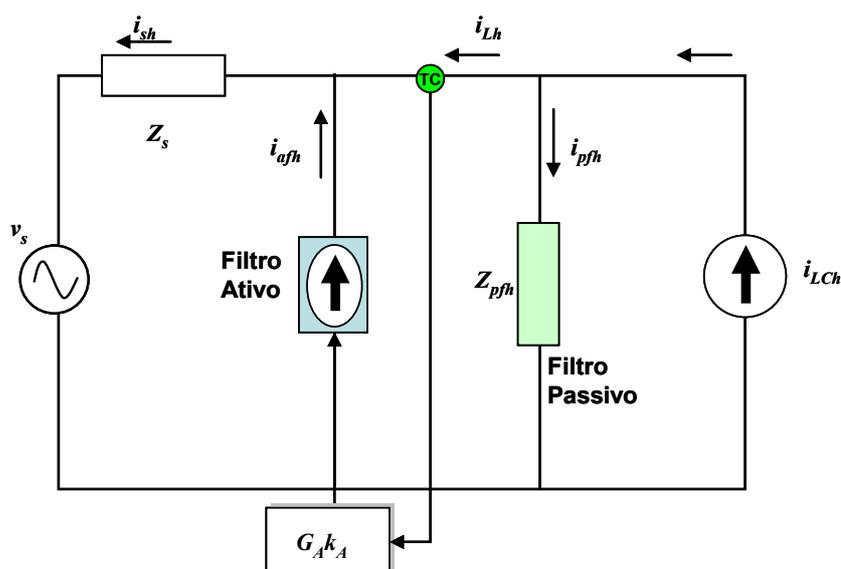


Figura 6.7 – Circuito equivalente do método de compensação harmônica híbrida para a carga dos cicloconversores.

A análise do circuito utilizando-se o modelo da figura 6.7 mostra a representação do filtro ativo como uma fonte de corrente controlada. No controle de corrente do filtro ativo, o símbolo  $G_A$  representa a função de transferência para o circuito de detecção e o símbolo  $k_A$  representa o fator de compensação que determina o nível de compensação a ser realizada pelo filtro ativo em cima da corrente detectada.

Serão implementados e observados os resultados das simulações, conforme modelo da figura 6.6, para 3 (três) diferentes valores do fator de compensação  $k_A$ , ou seja,  $k_A = 1,0, 0,8$  e  $0,6$ . Todas as simulações ocorrerão modelando o sistema de injeção de correntes (simulador da carga) com os cicloconversores na condição medida de demanda máxima (caso MC04 do Capítulo 4), ou seja, laminadores desbastadores e laminadores de acabamento (cadeiras de laminação) laminando consecutivamente e sistema de filtragem passiva em operação. Além dessa condição, a carga dos cicloconversores é ajustada para 30% a mais do que as medidas, modelando assim uma expansão do laminador, assim como no capítulo anterior. Como visto anteriormente, a condição de aumento de carga provoca em consequência aumentos nos índices de distorção harmônica de corrente e de tensão, aumento das correntes *rms* do sistema e também quedas de tensão no barramento, aumento da corrente dos ramos de filtragem passiva, etc. Ressalta-se que esta é uma condição possível, dentro de um plano de expansão de produção da planta, que vislumbre a instalação de novos conjuntos de laminadores desbastadores (“*Top*” e “*Bottom*”), também visto no Capítulo 5.

Ajustes nos valores de amplitude e ângulo da tensão, a exemplo dos realizados no Capítulo 5, também são necessários para reproduzir a situação de área. Em resumo, utiliza-se a simulação do Panorama 2B adicionando o filtro ativo na simulação.

A figura 6.8 mostra a corrente do conjunto de cicloconversores com valor 30% maior do que o valor medido e o espectro de suas harmônicas. Para o espectro das harmônicas de corrente apresentado, o valor de *THD* é meramente ilustrativo, sendo de maior interesse conhecer as frequências harmônicas individuais de maior relevância, ou seja, 5<sup>a</sup> (quinta), 7<sup>a</sup> (sétima), 11<sup>a</sup> (décima primeira), 13<sup>a</sup> (décima terceira), 23<sup>a</sup> (vigésima terceira) e 25<sup>a</sup> (vigésima quinta).

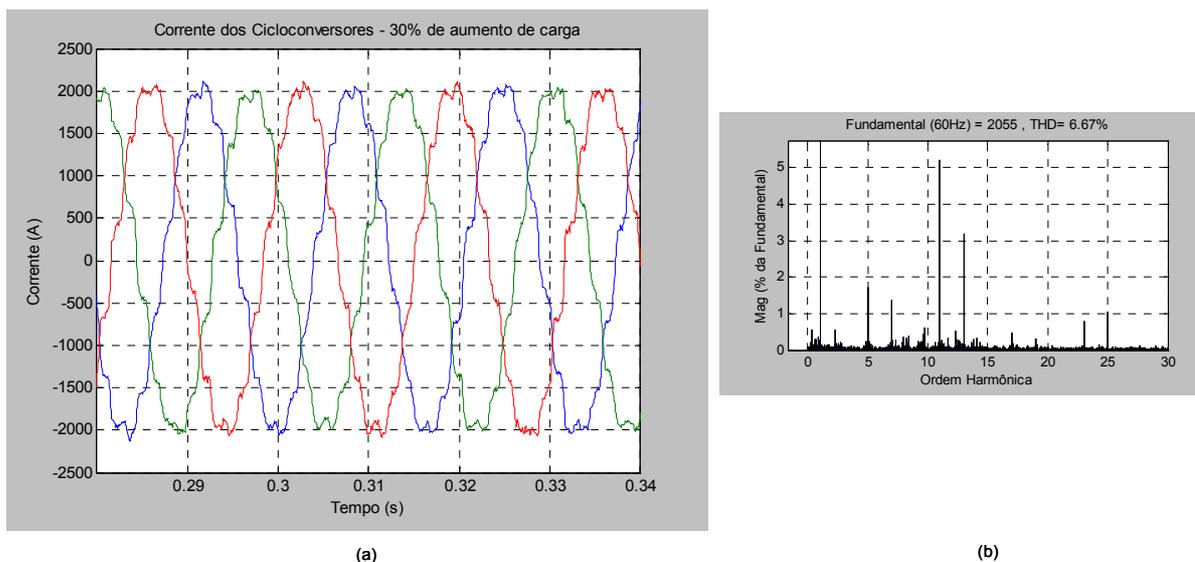


Figura 6.8 – Corrente do conjunto de cicloconversor simulada com 30% de aumento de carga.

(a) Forma de onda. (b) Espectro das harmônicas.

Nas simulações apresentadas a seguir, o filtro ativo inicia sua operação após 0,3s, possibilitando apresentar o panorama anterior e posterior à entrada do filtro ativo. Evita-se desta forma também que avaliações sejam realizadas sobre transitórios iniciais. Serão apresentadas em uma mesma figura a forma de onda das variáveis de interesse, o espectro das harmônicas antes e após a entrada da filtragem ativa, estas últimas sobrepostas e em mesma escala, de forma a possibilitar uma melhor visualização e interpretação dos dados destacados.

Nas seções 6.5.1.1; 6.5.1.2; 6.5.1.3 são apresentadas, na seqüência, e conforme o parágrafo anterior, a tensão no barramento de entrada, a corrente neste barramento, e as correntes nos filtros passivo e ativo. Cada seção é completada com uma análise dos resultados.

### 6.5.1.1 Fator de Compensação do Filtro Ativo - $k_A = 1,0$

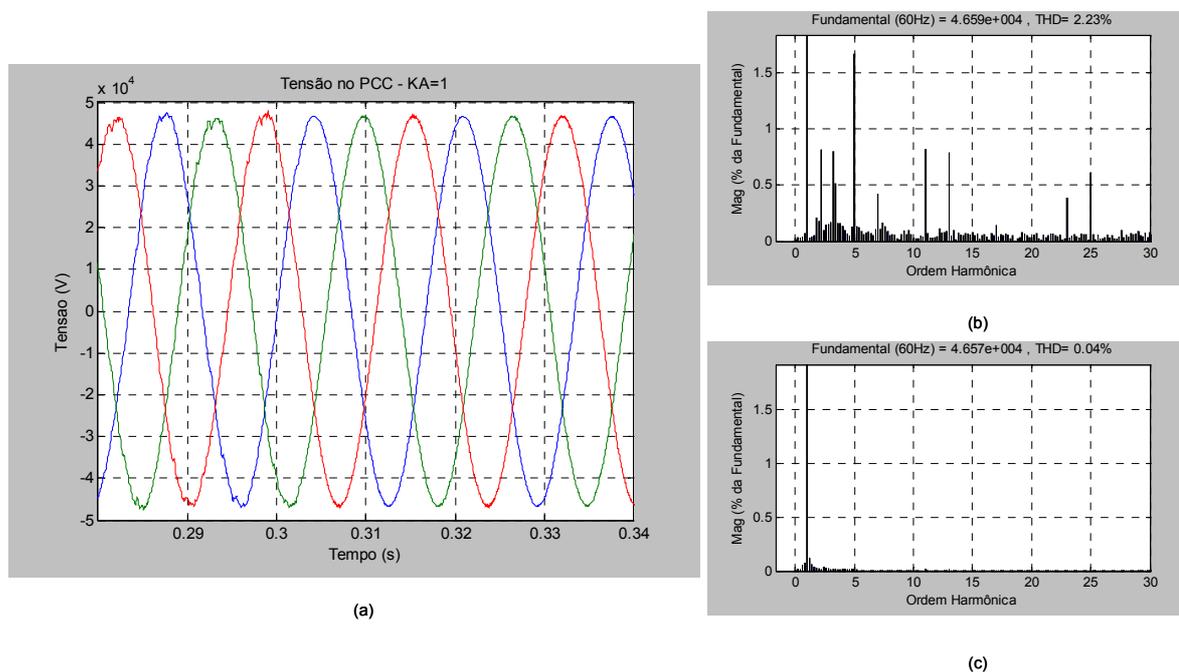


Figura 6.9 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

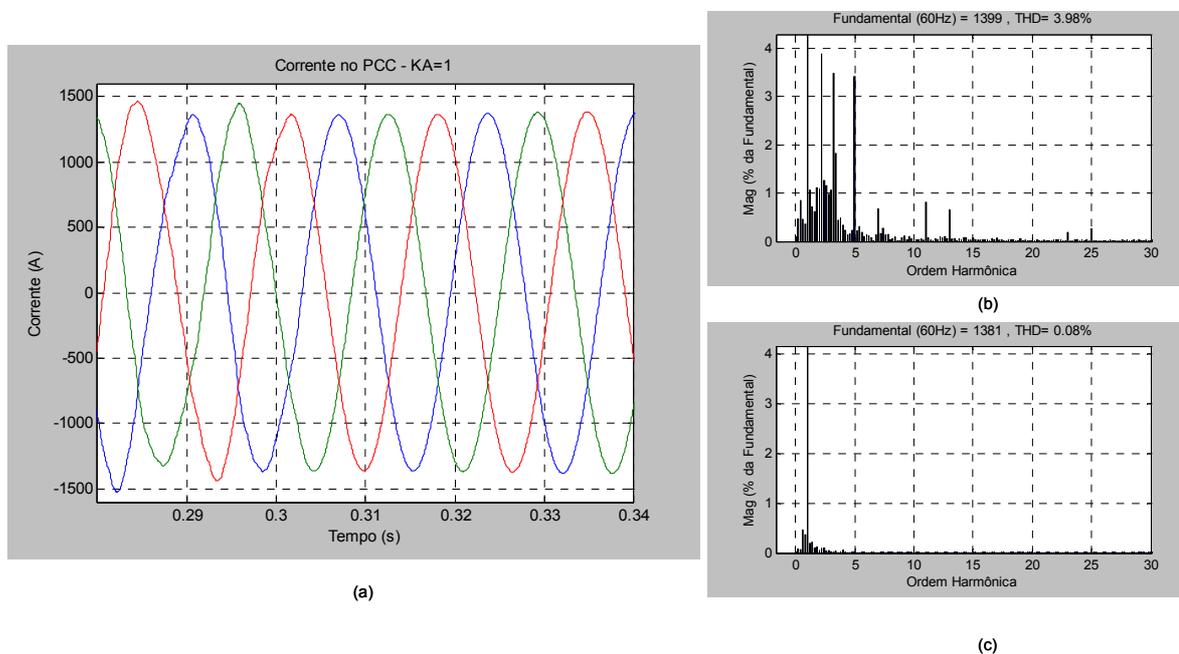


Figura 6.10 - Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da Corrente; Espectros das harmônicas→ (b) Antes da atuação do Filtro Ativo, (c) após atuação do Filtro Ativo.

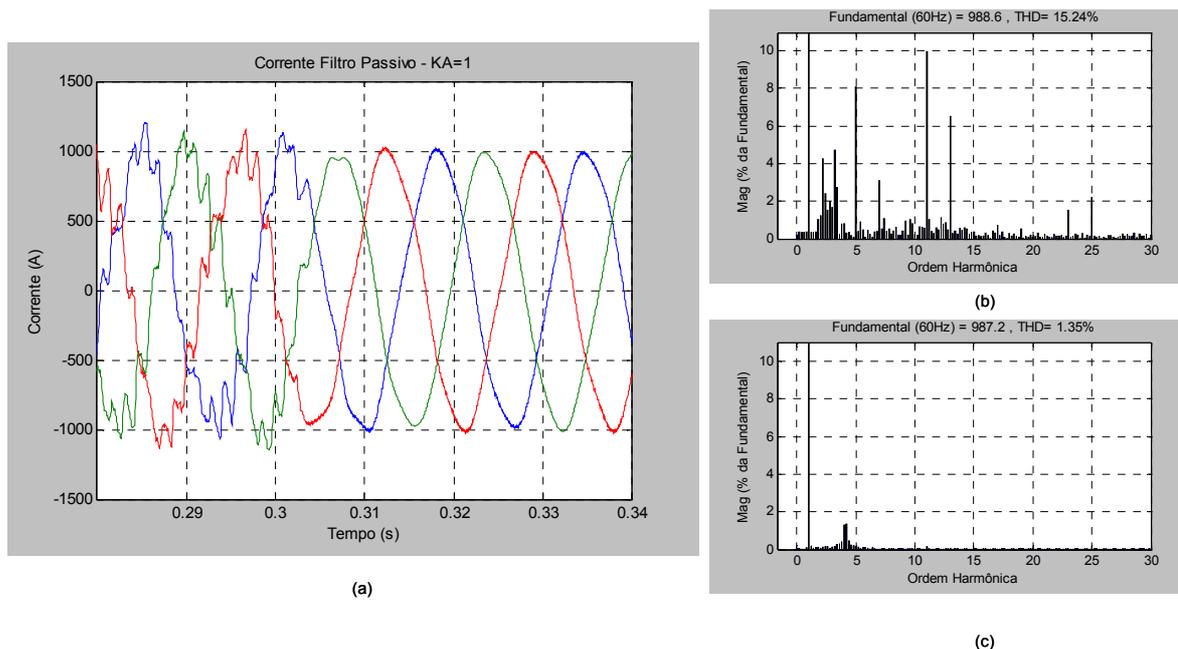


Figura 6.11 – Corrente do filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do Filtro Ativo.

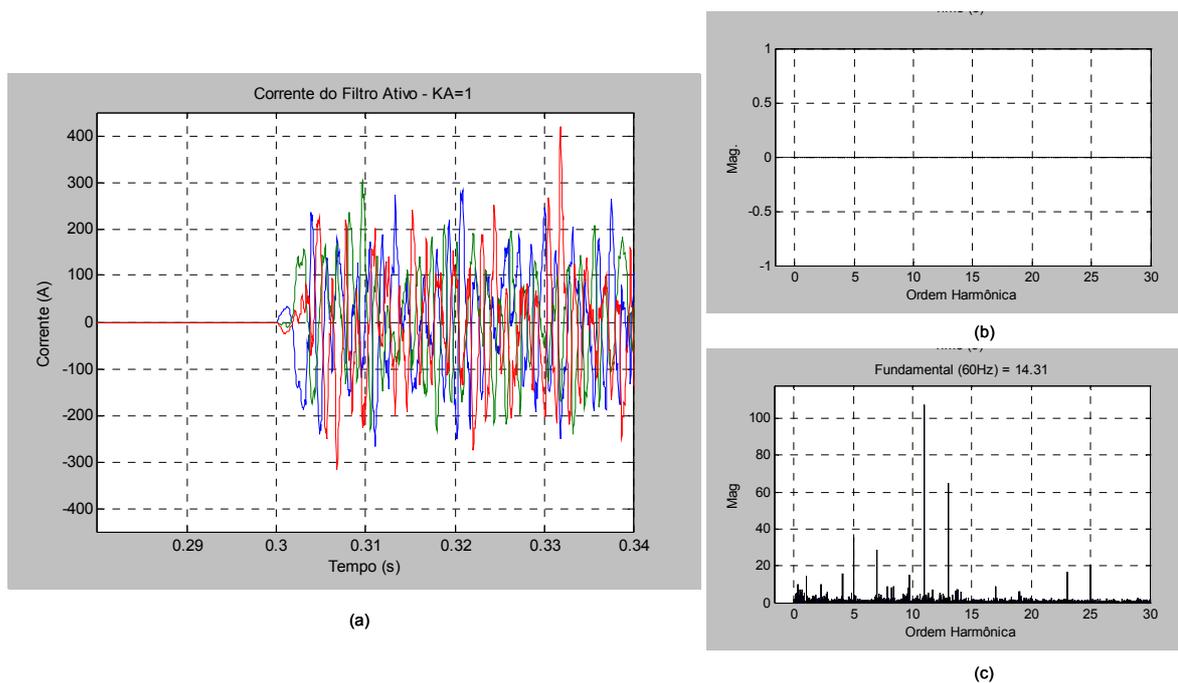


Figura 6.12 – Corrente filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

Para o caso simulado verifica-se um alto índice de compensação harmônica da tensão e também da corrente, 98%, como observado nas figuras 6.9 e 6.10. Estes

índices indicam uma compensação “perfeita” tanto da tensão quanto da corrente, ou seja, as distorções harmônicas praticamente inexistem.

Com o fator de compensação  $k_A=1,0$ , as correntes harmônica produzidas pelos cicloconversores são absorvidas integralmente pelo sistema de filtragem ativa, não havendo correntes harmônicas fluindo pelo sistema de filtragem passiva e também pelo sistema elétrico. Como resultado, o sistema de filtros passivos trabalha somente como fonte de potência reativa fundamental, fornecendo ao sistema somente corrente em sua frequência fundamental, como visto na figura 6.11. Todo o esforço de filtragem harmônica passa a ser do filtro ativo, figura 6.12. As harmônicas de 5ª (quinta), 7ª (sétima), 11ª (décima primeira), 13ª (décima terceira), 23ª (vigésima terceira) e 25ª (vigésima quinta) ordens são mais relevantes na compensação, como era de se esperar e tendo-se em vista os resultados das medições no Capítulo 4, mas outras frequências também são filtradas.

De acordo com Akagi em [8], o dimensionamento do filtro ativo pode ser avaliado pela seguinte formulação (considerando um conversor com chaveamento PWM):

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{AF_{max}}}{\sqrt{2}} \quad (6.5)$$

Onde,  $\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = V_{linha}$  (considerando um chaveamento SVPWM – “Space Vector PWM”)

e  $I_{AF_{max}}$  representa o máximo valor verificado na corrente do filtro ativo.

Para  $k_A=1,0$ , portanto, o filtro deverá ser dimensionado para uma potência maior que:

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times 34,5kV \times \frac{400A}{\sqrt{2}} = 17MVA \quad (6.6)$$

Em uma situação prática, quando o desejado é a filtragem ativa auxiliando sistemas de filtragem passiva na compensação harmônica, este caso mostra-se não aplicável, levando-se em conta principalmente a necessidade de dimensionamento de uma filtragem ativa com elevada potência, o que é indesejado em virtude da configuração proposta.

Esta configuração do controle e do fator de compensação para a topologia de operação paralela dos sistemas de filtragem torna-se interessante, no entanto, nos casos onde o foco baseia-se na compensação de reativos, por exemplo, em sistemas de distribuição de energia não radiais, ponta de linha, etc. Em situações como tais, sistemas de compensação reativa são implementados através da instalação de bancos de capacitores, que visam também ao controle de tensão. Neste panorama, a topologia e a estratégia de controle estudadas podem ser aplicadas caso seja identificado que o banco de capacitores instalado esteja sofrendo distúrbios de componentes harmônicas geradas por fontes externas. A incidência de correntes harmônicas neste banco de capacitores impacta diretamente no seu desempenho, e conseqüentemente na sua capacidade de realizar a compensação reativa, regulação de tensão, etc. do sistema no qual está inserido e foi projetado.

### 6.5.1.2 Fator de Compensação do Filtro Ativo - $k_A = 0,8$

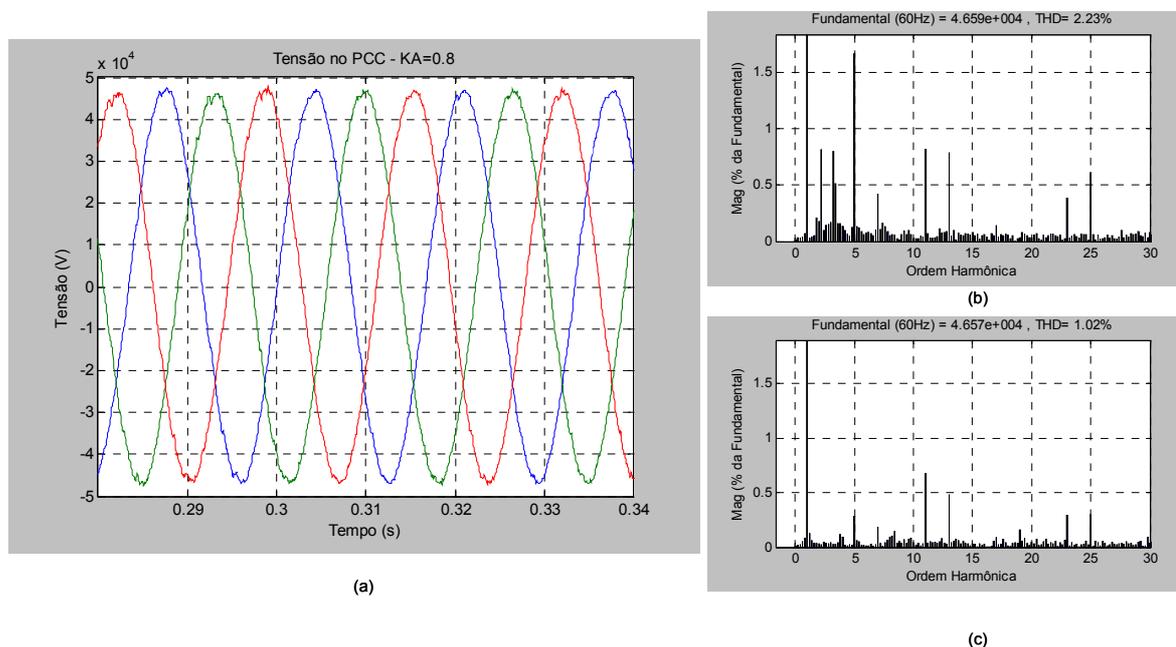


Figura 6.13 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) Após atuação do filtro ativo.

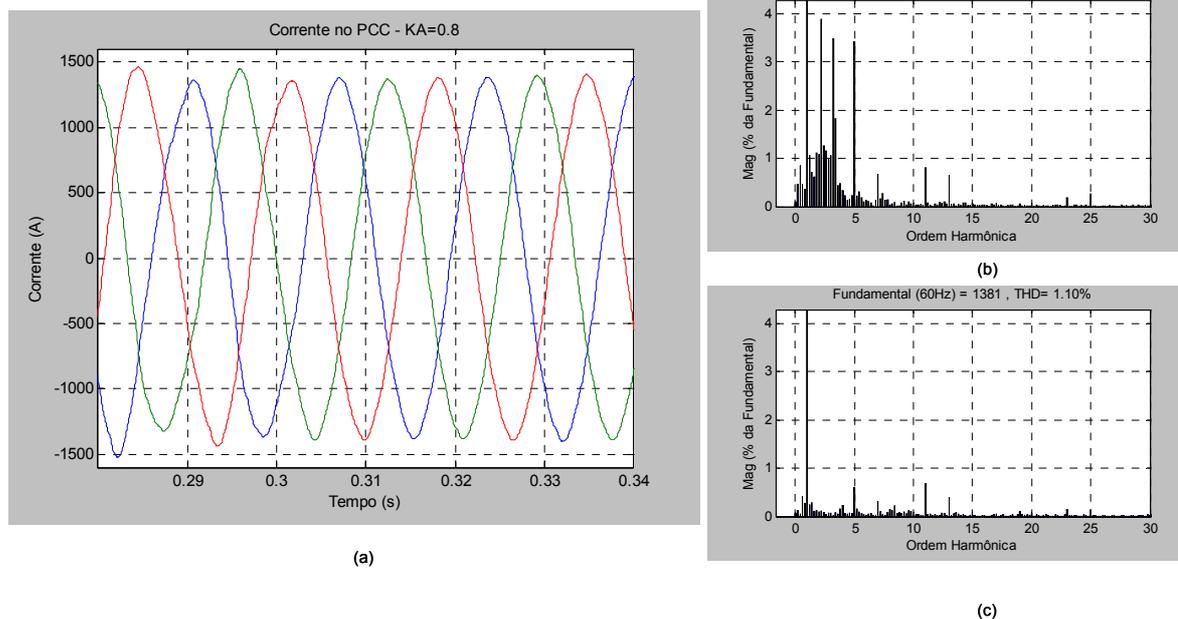


Figura 6.14 – Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

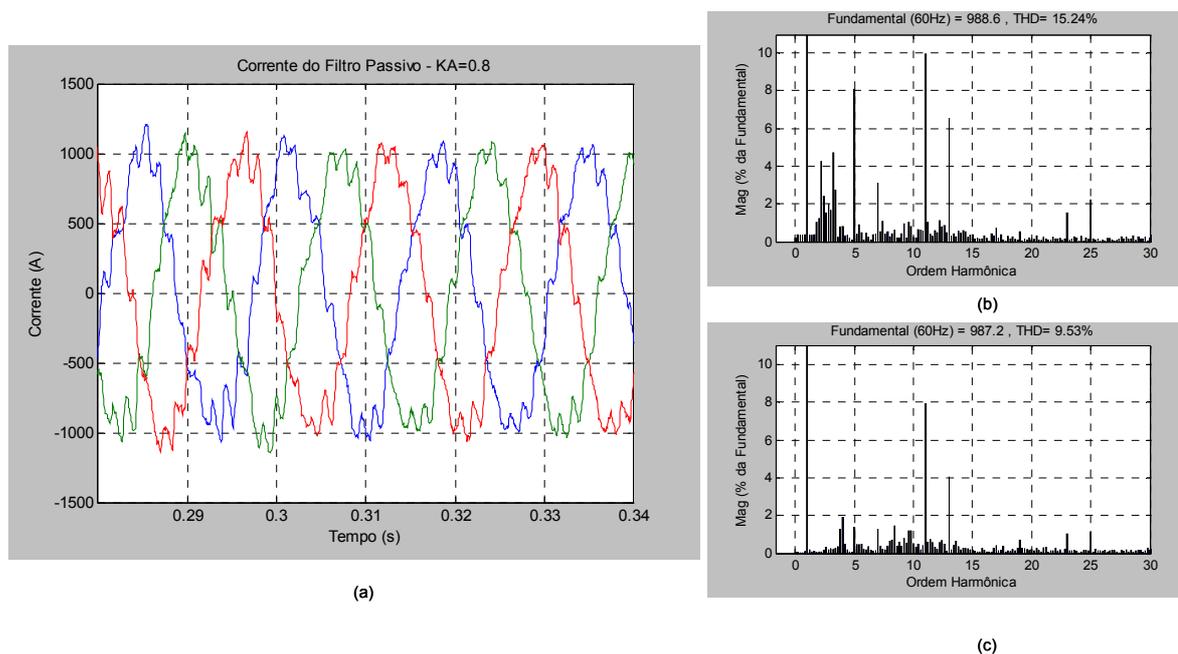


Figura 6.15 - Corrente filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) Após atuação do filtro ativo.

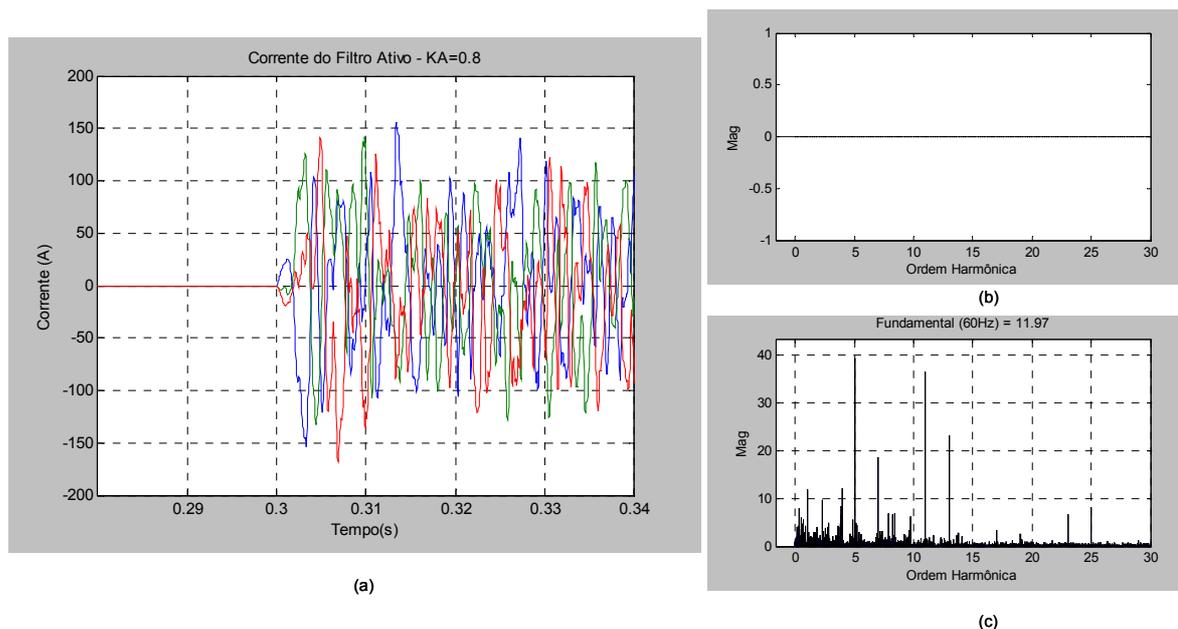


Figura 6.16 - Corrente do filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

As figuras 6.15 e 6.16 mostram que para  $k_A = 0,8$ , as correntes harmônicas sintonizadas no filtro passivo são filtradas por esse, porém agora com uma participação do sistema de filtragem ativa. Existe neste caso, portanto, um esforço conjunto para a compensação harmônica entre os sistemas de filtragem.

O índice de distorção harmônica da tensão é reduzido em cerca de 54%, acarretado pela redução do índice de distorção harmônica da corrente em 69%, como observado nas figuras 6.13 e 6.14. Estas constatações mostram que o esforço de filtragem ativa contribui significativamente com o filtro passivo, contribuindo efetivamente para a redução das distorções harmônicas no sistema.

A compensação das harmônicas de corrente de 3<sup>a</sup> (terceira), 5<sup>a</sup> (quinta), 7<sup>a</sup> (sétima), 11<sup>a</sup> (décima primeira), 13<sup>a</sup> (décima terceira), 23<sup>a</sup> (vigésima terceira) e 25<sup>a</sup> (vigésima quinta) ordens são mais relevantes, como pode ser visto na figura 6.16, mas outras frequências também são filtradas pelo filtro ativo, dentre interharmônicas e subharmônicas, que conhecidamente também são geradas pelo conjunto de cicloconverters.

De acordo com a equação 6.5, para  $k_A=0,8$  o filtro ativo deverá ser dimensionado para uma potência acima de:

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times 34,5kV \times \frac{150A}{\sqrt{2}} = 6,34MVA \quad (6.7)$$

Uma redução significativa nos níveis de potência requeridos para o filtro ativo é observada com a alteração do fator de compensação  $k_A$ . Este valor de dimensionamento pode ser ainda reduzido, considerando que existe uma “folga” considerável nos limites de distorção de corrente e tensão e, principalmente, a redução significativa da corrente do filtro passivo, que deixa efetivamente de operar sob risco de sobrecarga.

### 6.5.1.3 Fator de Compensação do Filtro Ativo - $k_A = 0,6$

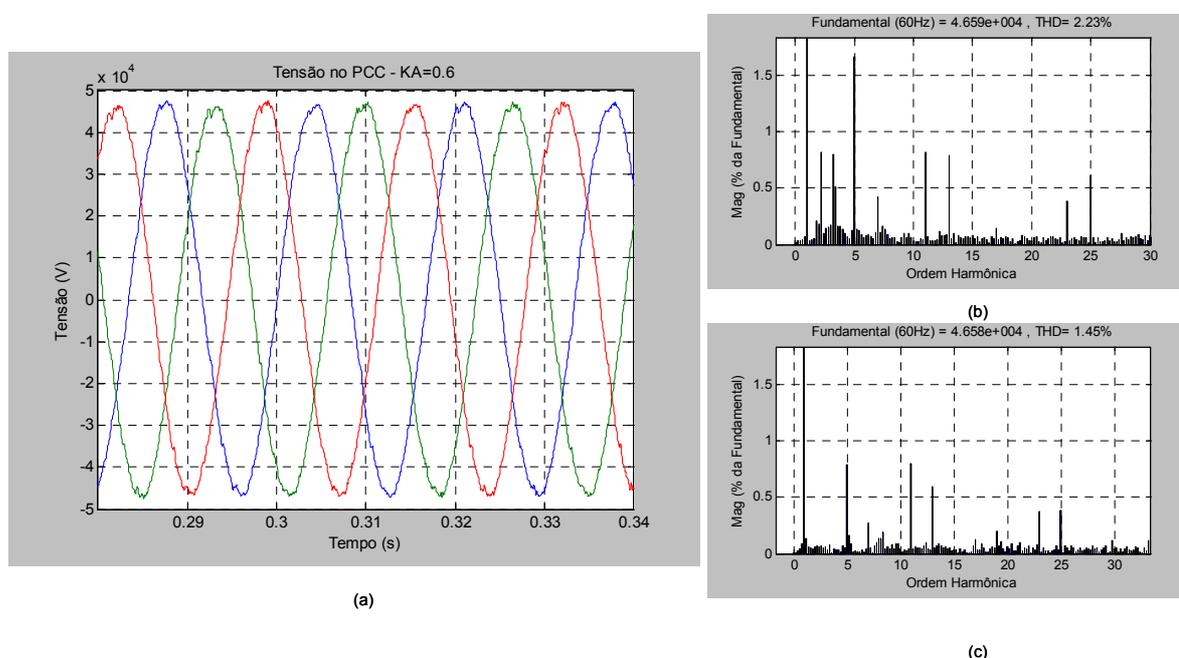


Figura 6.17 - Tensão no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo. (c) após atuação do filtro ativo.

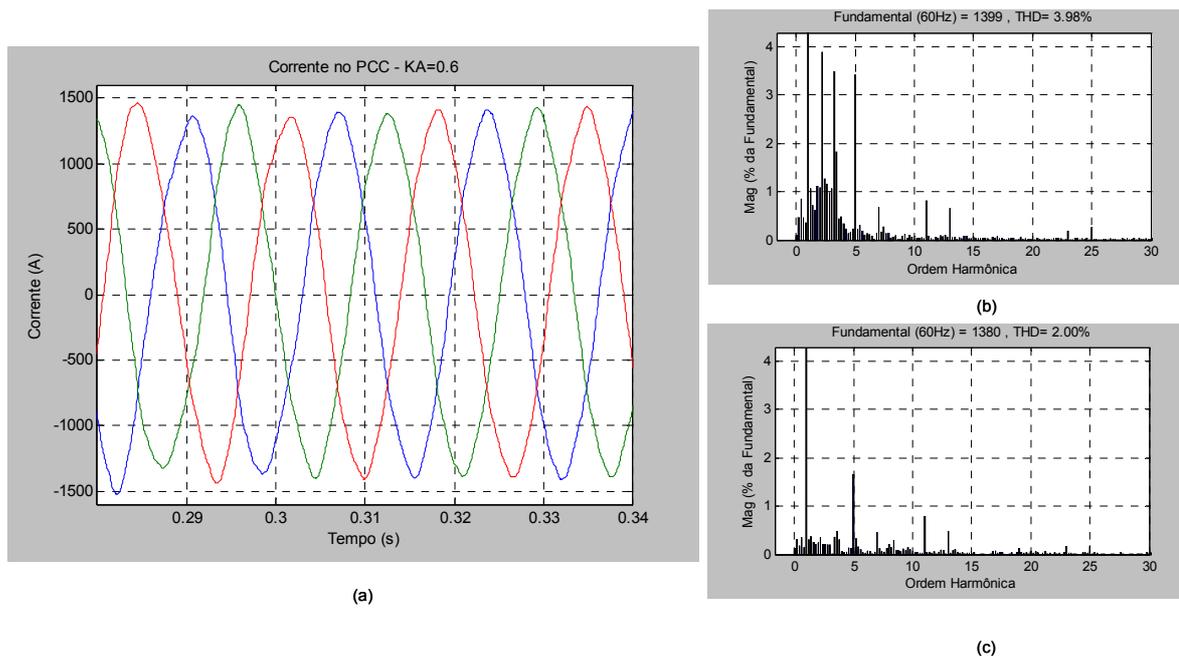


Figura 6.18 - Corrente no barramento de entrada (PCC) – B1: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

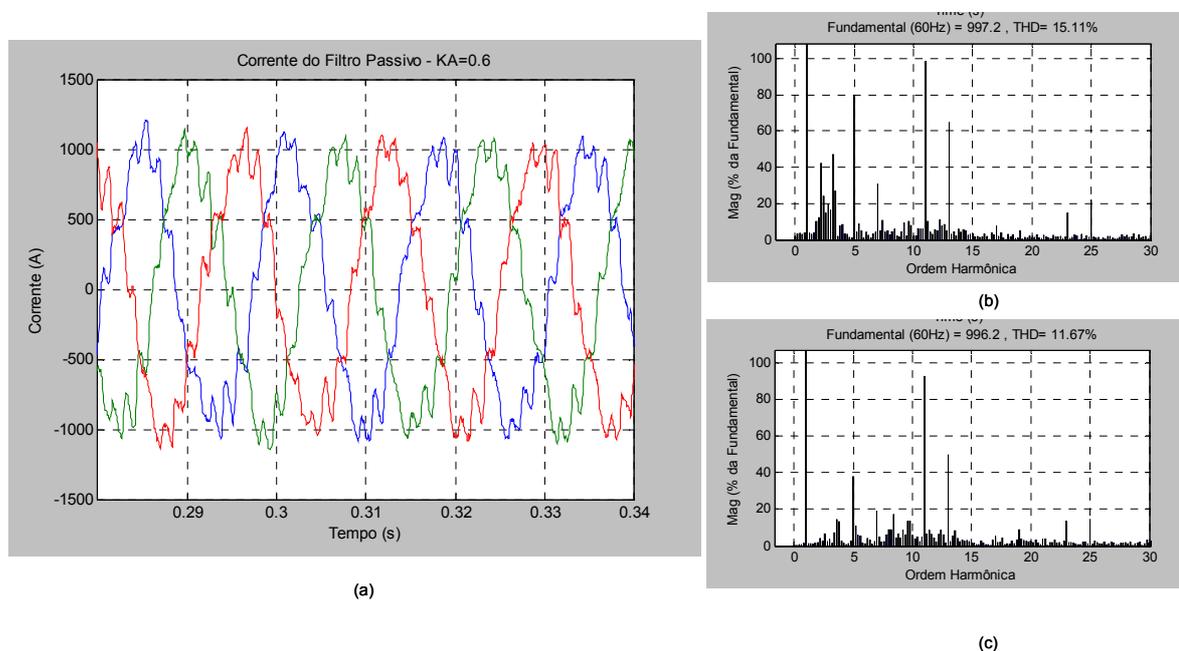


Figura 6.19 - Corrente do filtro passivo: (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

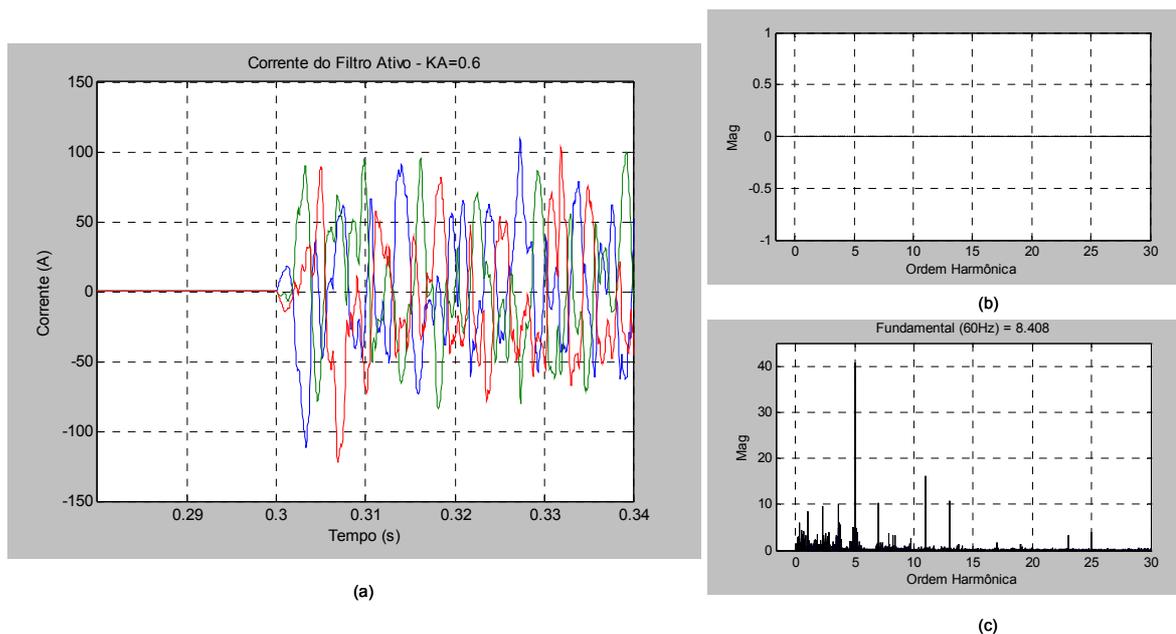


Figura 6.20 – Corrente do filtro ativo: (a) Forma de onda da corrente.

Espectros das harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo.

A discussão dos resultados observados no caso onde  $k_A=0,6$  se assemelham aos verificados e discutidos na simulação anterior, para  $k_A=0,8$ . Neste caso, o índice de distorção harmônica da tensão é reduzido em 33% e a distorção harmônica da corrente registra uma redução de 43,83%, visto nas figuras 6.17 e 6.18. Percebe-se desta forma que o esforço de filtragem ativa contribui efetivamente para a redução das distorções harmônicas no sistema.

A redução do fator de compensação  $k_A$  possibilita que a filtragem passiva atue de forma mais severa sobre as freqüências de sintonia, deixando para o filtro ativo a tarefa de compensar apenas uma parcela das correntes harmônicas geradas pela carga, como visualizado nas figuras 6.19 e 6.20.

O filtro ativo para este caso deverá possuir um dimensionamento de potência da ordem de:

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times 34,5kV \times \frac{100A}{\sqrt{2}} = 4,23MVA \quad (6.8)$$

Este valor, mais realista dentro das práticas de mercado, em termos de compensação ativa aliada a sistemas já dotados de compensação passiva, permite

uma redução considerável nos níveis de potência requeridos, apenas com a alteração do fator de compensação  $k_A=0,6$ .

A Tabela 6.1 a seguir resume os resultados das simulações realizadas para os diferentes valores do fator de compensação  $k_A$ . Com a visão de custo e benefício para a implantação de um sistema como o proposto e frente aos resultados mostrados na tabela 6.1, avalia-se que a topologia que melhor suportar os índices de qualidade do sistema (*THD*, valores nominais de corrente e potência do sistema elétrico em seus vários componentes, etc) e que para tal demandar o dimensionamento do sistema de filtragem ativa em menor potência, deverá ser a opção escolhida.

Tabela 6.1 - Resumo dos resultados de simulação para diferentes valores do fator de compensação -  $k_A$ .

| $K_A$ | <i>Redução da THD de Tensão (%)</i> * | <i>Redução da THD de Corrente (%)</i> * | <i>Potência do Filtro Ativo (MVA)</i> |
|-------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1,0   | 98                                    | 98                                      | 17                                    |
| 0,8   | 54                                    | 69                                      | 6,33                                  |
| 0,6   | 33                                    | 44                                      | 4,23                                  |

\* Percentual de redução com relação à condição com atuação do filtro ativo e sem a atuação desse.

### 6.5.2 Avaliação do efeito da implantação da topologia híbrida nas correntes dos ramos do filtro passivo.

Na seção 5.4.2 estudou-se, através de simulações, os efeitos da expansão da carga do sistema elétrico do laminador para o sistema de filtragem passiva existente. Verificou-se que para o Panorama 2B, carga expandida, tensão e ângulo do barramento ajustados, houve um aumento nas correntes individuais de cada ramo do filtro passivo, além dos demais efeitos já relacionados.

Diante do panorama verificado, sugeriu-se ao final do Capítulo 5 que fossem realizados estudos de alternativas que permitam o sistema de filtragem passiva operar com os valores de corrente (fundamental, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> harmônicas,

etc.) das condições sob as quais opera atualmente, sem expansão do sistema, sendo esta a análise que será conduzida nesta seção.

As tabelas a seguir mostram os resultados de simulação de um Panorama 3, ou seja, sistema parametrizado para a carga 30% maior e operando com um sistema de filtragem híbrida, com o fator de compensação do filtro ativo regulado para  $k_a=0,6$ , comparando-se com o Panorama 1. Pretende-se aqui focar o sistema de filtragem passiva, suas correntes e tensões associadas a esta parametrização da simulação. Outros resultados deste Panorama de simulação já foram apresentados para a simulação do filtro ativo na condição de  $k_a=0,6$  e a discussão dos resultados, portanto, realizada.

As tabelas 6.2 e 6.3 mostram os resultados de simulação para as tensões e correntes do barramento, além das correntes do conjunto de cicloconversores e filtro passivo. Nota-se o acréscimo da corrente total da barra de um caso para o outro, acrescida em função do acréscimo da corrente dos cicloconversores. A corrente do filtro passivo no Panorama 3 é reduzida, já em função da contribuição do filtro híbrido.

Tabela 6.2 – Resultado de Simulação – Panorama 1

| Parâmetro                        | Valores de simulação (rms) |
|----------------------------------|----------------------------|
| <b>Vab</b> (V de linha da Barra) | 33,22kV / 0,96pu           |
| <b>la_B1</b> (Cor. Total Barra)  | 668,9 A                    |
| <b>la_B2</b> (Cor. Ciclo)        | 1148 A                     |
| <b>la_B3</b> (Cor. F.Passivo)    | 733,6 A                    |

Tabela 6.3 – Resultado de simulação – Panorama 3

| Parâmetro                        | Valores de simulação (rms) |
|----------------------------------|----------------------------|
| <b>Vab</b> (V de linha da Barra) | 33,21kV / 0,96pu           |
| <b>la_B1</b> (Cor. Total Barra)  | 960,6 A                    |
| <b>la_B2</b> (Cor. Ciclo)        | 1492,0 A                   |
| <b>la_B3</b> (Cor. F.Passivo)    | 709,7 A                    |

Nas tabelas 6.4 e 6.5 são comparados os valores de corrente por ramo do sistema de filtragem passiva, do Panorama 1 e do Panorama 3 simulados. Note-se que as correntes apresentadas no Panorama 3 tornam-se menores que aquelas verificadas no Panorama 1 e abaixo dos valores de corrente nominal, como era de se esperar.

Tabela 6.4 – Resultados de simulação Panorama 1

| Corrente  | Corrente Nominal (rms) | Corrente Simulada (rms) |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| la_B3     | -                      | 733,6 A                 |
| la_2,6HP  | 167 A                  | 161,9 A                 |
| la_4,08FL | 181 A                  | 174,0 A                 |
| la_6HP    | 209 A                  | 203,4 A                 |
| la_10HP   | 206 A                  | 203,6 A                 |

Tabela 6.5 – Resultados de simulação – Panorama 3

| Corrente  | Corrente Nominal (rms) | Corrente Simulada (rms) |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| la_B3     | -                      | 709,7 A                 |
| la_2,6HP  | 167 A                  | 154,9 A                 |
| la_4,08FL | 181 A                  | 171,2 A                 |
| la_6HP    | 209 A                  | 196,7 A                 |
| la_10HP   | 206 A                  | 199,1 A                 |

Estes resultados mostram a efetividade da combinação dos sistemas de filtragem, formando um filtro híbrido, possibilitando que o sistema de compensação atual trabalhe dentro de suas condições nominais, sem riscos de aumento de sua vulnerabilidade, frente a expansões da planta.

Ressalta-se que o objetivo do estudo neste momento foi a abordagem da influência de um sistema de filtragem híbrido, não sendo portanto, investigadas outras opções que pudessem contribuir com o mesmo efeito ao sistema, tais como ajuste ótimo da tensão da barra, reajustes dos parâmetros de proteção elétrica, expansão do sistema de filtragem passiva, etc.

Assim, para as condições e premissas estudadas, um sistema de filtragem ativa, acoplado ao sistema existente com as configurações gerais a seguir é apresentado. Este filtro supriria as necessidades de compensação harmônica, em conjunto com o filtro passivo, sem prejuízo do desempenho do sistema elétrico diante de expansões da planta.

Tabela 6.6 – Características gerais do filtro ativo.

| Característica          | Valor      |
|-------------------------|------------|
| Tensão                  | 34,5kV rms |
| Corrente de pico máxima | 100A rms   |
| Potência                | 4,23MVA    |
| BW                      | 25th       |

Fornecedores como ABB, Toshiba e Mitsubshi podem ser consultados sobre histórico de fornecimento de equipamentos nesta faixa de potência e tensão.

## **6.6 CONCLUSÕES**

Mostrou-se neste capítulo a operação paralela de conjuntos de filtragem ativa e passiva em uma operação coordenada, no sistema elétrico do laminador em estudo. Realizando-se uma seleção apropriada do fator de compensação do filtro ativo, a topologia proposta permite que o esforço do sistema de filtragem passiva se concentre na filtragem das correntes nas freqüências e magnitudes para as quais foi projetado. Caberá ao sistema de filtragem ativa nestes casos, então, a tarefa de realizar a compensação das componentes harmônicas fora de sintonia ou resíduos das freqüências sintonizadas do sistema de filtragem passiva.

Foram também abordados os efeitos da inserção do sistema de filtragem ativa para o sistema de compensação harmônica, frente a uma expansão da planta com aumento das cargas elétricas do sistema.

## 7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

*No âmbito deste trabalho, buscou-se o conhecimento de uma série de respostas para algumas questões relacionadas a estratégias de compensação harmônica em um ambiente industrial siderúrgico. Entretanto, uma gama de outras questões foi levantada, em razão do contato e exposição com os diversos pontos a serem considerados nos estudos realizados. Este capítulo faz um levantamento do enfoque dado no trabalho, bem como enumera e propõe alguns tópicos, considerados relevantes, para a continuidade dos estudos aqui iniciados.*

Problemas envolvendo a qualidade da energia elétrica em um ambiente industrial podem ocorrer com significativa frequência, em função da sensibilidade dos modernos equipamentos utilizados na automação industrial e necessidade permanente de otimização da produção. Desta forma, inúmeros são os relatos de casos que mostram falhas e operações inadequadas em equipamentos dos mais variados processos industriais, decorrentes de variações nos índices da qualidade do fornecimento de energia elétrica a estas cargas sensíveis, que podem ser causadas pelo fluxo indevido de correntes harmônicas pela rede interna de distribuição.

Uma indústria siderúrgica caracteriza-se pela aplicação de diversas cargas com características não lineares. O acionamento destas cargas pode trazer grandes prejuízos de ordem técnica, além de grandes perdas financeiras, caso os efeitos de sua operação no sistema elétrico local não estejam bem caracterizados, e estratégias de contenção dos distúrbios gerados e manutenção dos índices relacionados aos aspectos da qualidade de energia não sejam bem conhecidas e adotadas, respectivamente.

## 7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho pretendeu realizar uma caracterização das estratégias de compensação harmônica adotadas em ambientes industriais, visando à melhoria dos índices de qualidade de energia associados aos sistemas de distribuição de energia das plantas. Dentro deste contexto, estudou-se a atual situação de operação do sistema elétrico de potência, que alimenta um laminador siderúrgico, acionado por cicloconversores. Buscou-se, através de medições de campo e consulta a normas nacionais e internacionais, identificar os valores, em operação, dos índices de distorção harmônica de tensão e corrente no barramento de alimentação desse laminador. Os valores levantados mostraram que a estratégia de compensação harmônica existente (filtragem passiva) contribui efetivamente para a manutenção dos limites de distorção impostos pela carga e encontram-se controlados, nas diversas modalidades de operação que aqui foram verificadas.

Foi fundamental para a credibilidade técnica do trabalho a aquisição, meticulosa e detalhada, de tensões e correntes no sistema em estudo. As medições obtidas, realizadas a cada  $50\mu\text{s}$  e durante 1s, para 4 (quatro) etapas distintas de operação do laminador siderúrgico, não só dão sustentação ao presente trabalho como também estão disponíveis para trabalhos futuros. As medições diretas de corrente realizadas no processo em operação possibilitaram a caracterização e a modelagem da carga dos cicloconversores.

Visando a aprofundar os estudos nesse sistema elétrico, de forma a caracterizar possíveis alterações das suas atuais condições de operação, abordou-se a implementação de um modelo computacional capaz de simular o sistema de potência em estudo. Foi detalhada a implementação deste modelo, desde os ajustes necessários até a validação das principais variáveis elétricas de interesse. Este mostrou-se, através dos resultados de simulação, confrontados com resultados medidos, ser um modelo robusto e apto a avaliações diversas, como alterações de condições ou formas de operação da planta e do sistema elétrico de potência.

Outro aspecto contemplado, como aprofundamento dos estudos do sistema elétrico baseados no modelo implementado, consistiu na verificação dos efeitos da

expansão da carga elétrica do laminador em 30% do seu valor medido. Esta análise gerou como resultado avaliações com foco no sistema de compensação harmônica existente (filtros passivos), bem como dos índices resultantes de distorções harmônicas individuais e totais de tensão e corrente no *PCC*.

Além disso, com base no modelo implementado, seguiram-se as investigações, com a proposta de utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem acoplado ao sistema de distribuição de energia do laminador. Este estudo permitiu verificar as possíveis melhorias de desempenho do sistema de compensação sob análise, considerando-se a expansão da planta.

Foi proposta uma topologia de compensação harmônica que combinasse as vantagens da atual filtragem passiva com a implantação de filtros ativos, através da operação paralela e coordenada desses conjuntos. Esta topologia, atraente para o sistema em questão, possui como vantagem a manutenção de independência de operação do sistema de filtragem passiva, podendo esse operar com ou sem o filtro ativo. Nesta situação a filtragem ativa deve ser controlada de forma a atuar somente sobre uma parcela das necessidades de filtragem do sistema, permitindo desta forma também, a redução em potência (MVA) no dimensionamento do filtro ativo.

Um dos pontos chave para a implementação do controle do filtro ativo, acoplado ao sistema, foi o uso de métodos eficazes para geração das referências de tensão e corrente. Utilizou-se o método *SRF* (“*Synchronous Reference Frame*”), menos susceptível às distorções de tensão, uma vez que utiliza sinais sincronizados com a fundamental dos barramentos, gerados por um “*Phase Locked Loop*” (*PLL*), além de proporcionar dinâmica e precisão suficientes à aplicação idealizada por este estudo.

Comprovou-se que, na operação paralela de conjuntos de filtragem ativa e passiva em uma operação coordenada, é necessária uma seleção apropriada do fator de compensação ( $k_A$ ) do filtro ativo. O esforço do sistema de filtragem passiva deve se concentrar na filtragem das correntes nas frequências e magnitudes para as quais foi projetado, cabendo ao sistema de filtragem ativa neste contexto, a tarefa de realizar a compensação das componentes harmônicas fora de sintonia ou resíduos das frequências sintonizadas do sistema de filtragem passiva, retirando-o de condições possíveis de sobrecarga.

Por fim, foram discutidos os efeitos positivos da inserção do sistema de filtragem ativa no sistema de compensação harmônica da planta, frente à expansão simulada da planta, com aumento das cargas elétricas do sistema.

## 7.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO ESTUDO

Não foi objetivo do presente trabalho responder a todas as questões, principalmente às relacionadas ao projeto do filtro ativo que forma o sistema híbrido de compensação. Também não foi o objetivo proposto investigar todas as necessidades de adequação e possíveis alternativas que pudessem contornar alterações de desempenho do sistema de compensação harmônica, por conseguinte, modificações nos índices de distorção harmônica presentes no barramento de alimentação do laminador, em virtude de variações nas atuais condições de operação.

No entanto, o que se buscou foi trabalhar no sentido de conhecer e se caminhar em direção a isso, investigando e implementando, através de uma metodologia aplicada em caso prático, uma solução tecnologicamente viável e aplicável no tratamento de harmônicas de tensão e corrente em sistemas elétricos industriais, e de forma independente da fonte causadora do distúrbio.

Sendo assim, tão importantes quanto às perguntas respondidas pelo trabalho, são as questões levantadas pelo mesmo. Algumas dessas questões são tratadas a seguir.

- ✓ Implementar e testar um regulador de corrente no sistema simulado, verificando seu impacto nas respostas do sistema estudado;
- ✓ Avançar nos estudos de simulação, substituindo as fontes ideais utilizadas por uma simulação que contemple a implementação do Conversor CC/CA do filtro ativo. Verificar com isso a resposta do sistema frente a limitações práticas e reais de implementação atualmente vividas.
- ✓ Investigar mais profundamente o projeto do Conversor CC/CA, indicando qual a melhor topologia para o problema em questão, especificando os dispositivos para os conversores estáticos, etc;

- ✓ Implementar novas topologias de filtragem híbrida e verificar a eficácia de cada uma, a aplicabilidade ao sistema e confrontar com a topologia simulada neste trabalho;
- ✓ Realizar estudo específico sobre o equilíbrio reativo fundamental;
- ✓ Investigar demais necessidades de adequação do sistema de alimentação de energia do laminador, frente à expansão da planta;
- ✓ Realizar um estudo de viabilidade técnico-econômica na implantação da topologia como sugerida, em conjunto com possíveis fornecedores de equipamentos do tipo;
- ✓ Investigar novas alternativas técnicas que possam contribuir com efeitos similares aos verificados nos estudos aqui conduzidos, para o sistema de laminação existente.

### **7.3 COMENTÁRIOS FINAIS**

No crescimento de uma indústria siderúrgica é quase inevitável a implantação de uma série de cargas não lineares, o que pode provocar sérios danos aos seus sistemas produtivos, caso aspectos relacionados à qualidade da energia distribuída internamente na planta não sejam bem conhecidos e abordados coerentemente. A capacitação técnica do pessoal de Engenharia em áreas de conhecimento que abordam o assunto é imprescindível para a condução das soluções de problemas diversos, vividos no dia-a-dia da planta. Assim os problemas enfrentados podem ser conduzidos com custo e prazo controlados e, sobretudo, com menor impacto à estabilidade operacional da planta. Nestes termos, a capacitação de pessoal e a criação de metodologias científicas para a condução de investigações de problemas e tendências são importantíssimas, e se tornam ferramentas viáveis a baixo custo e com mínimo transtorno.

Alternativas de filtragem harmônica baseadas na aplicação de filtros ativos despontam cada vez mais como alternativa viável atualmente, para solução definitiva ou minimização de problemas relacionados às distorções harmônicas geradas pela carga. Conhecer bem as possibilidades técnicas e verificar sua aplicabilidade aos

problemas de área é essencial para a adoção de uma tecnologia em detrimento de outras, trazendo para o processo os melhores ganhos, que se refletirão com certeza em melhores desempenho e produtividade.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Aredes, K. Heumann, E.H. Watanabe, "A Universal Active Power Line Conditioner", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 2, April 1998, p. 545-551.
- [2] R.C. Dungan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty, "Electrical Power System Quality", New York, McGraw-Hill, 1996.
- [3] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Standard 519 - 1992. [www.ieee.org](http://www.ieee.org).
- [4] Y. Liu, G.T.H. Heydt, R.F. Chu, "The Power Quality Impact of Cycloconverter Control Strategies", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.20, Abril 2005, p. 1711-1718.
- [5] I.W. Hörger, "Aspects for Filter Design in Case of Cycloconverter Load", Power Quality 97 Conference, Nürembert, Germany, June 10-12, 1997.
- [6] S. Bhattacharya, D. Divan, "Active Filter Solution for Utility Interface", IEEE Internacional Symposion on Industrial Eletronics (ISIE), p. 2531-2540, 1995.
- [7] E.R. Ribeiro, "Filtros Ativos Série para compensação de Harmônicas de Tensão", Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, fevereiro de 2003.
- [8] H. Akagi. "Active Harmonic Filter", Proceedings of the IEEE, Vol.93, no. 12, p. 2128-2138, December 2005.
- [9] L. Gyugyi, E. C. Strycula. "Active AC Power Filter". In: Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, 1976, p. 529-535.
- [10] Tcheou, Michel Pompeu, "Análise e Representação de Sinais de Oscilografia Usando Decomposições Adaptativas Redundantes", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2005.

- [11] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “PRODIST – Procedimentos de Distribuição”, versão 02/07/2007. [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br).
- [12] F.V.Assis, “Aspectos Gerais de Qualidade da Energia na Companhia Siderúrgica de Tubarão”, Monografia do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos, UNIFEI, Maio de 2005.
- [13] L.A. Aguirre, “Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais”, pp.368-438, Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2000.
- [14] J. O’Malley, “Análise de Circuitos”, São Paulo, MacGraw, 1983.
- [15] M. Aredes, “Novos Conceitos de Potência e Aplicações em Filtros Ativos”, M.Sc. Thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro RJ, Nov. 1991.
- [16] N. Mohan, “Power electronics: converters, applications, and design”, Wiley, New York, 1989.
- [17] IEEE Interharmonic Task Force, “Interharmonic in Power Systems”, Cigré 36.05/CIRED 2 CC02, Voltage Quality Working Group.
- [18] I.W. Hörger, “Aspects for Filter Design in Case of Cycloconverter Load”, Power Quality 97 Conference, Nurembert, Germany, June 10-12, 1997.
- [19] C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C Sousa, “Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconvertidores em uma Planta Siderúrgica”, Anais do VII Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia, Santos-SP, Agosto 2007.
- [20] T. Hoevenaars, K. Lé Doux, M. Colosino, “Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications”, IEEE Industry Applications Society , Sept. 2003, p. 145-150.
- [21] T. Blooming, D. Carnevale, “Harmonic Convergence, IEEE STD 519-1992, helps define applications of harmonic limits”, IEEE Industry Applications, Jan/Febr/2007.

- [22] F.Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power systems-A combined system of shunt passive and series active filters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 6, November/December 1990, p. 983-990.
- [23] H. Fujita and H. Akagi. "A practical approach to harmonic compensation in power systems - series connection of passive and active fillers", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, November/December 1991, p.1020-1025.
- [24] S. Bhattacharya, P. T. Cheng, and D. Divan. "Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, May/June, 1997, p. 732-747.
- [25] Z. Chen, F. Blaabjerg and J.K. Perdese, "A study of parallel operation of Active and Passive Filters", IEEE Trans. on Industry Applications, 2002, p. 1021-1026, Vol.2.
- [26] L.Asiminoaei, F. Blaabjerg and S. Hansen, "Detection is key – Harmonic detection methods for active power filter applications", IEEE Industry Applications Magazine, July/Aug 2007, p. 22-33.
- [27] S. Bhattacharya, A. Veltman, D.M Divan, and B. Banerjee, "Active filter system implementation", IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 4, no.5, p. 47-63, 1998.
- [28] F.B. Líbano, D.S.L. Simonetti, J. Uceda, "Filtering Algorithms For Hybrid Active Filters", XI CBA (1996), 1996, Anais do XI CBA, São Paulo – SP, p. 389-394.
- [29] D. Basic, V.S. Ramsden, and P.K. Muttik, "Perfomance of combined power filters in harmonic compensation of high-power Cycloconverter Drives", Power Electronics and Speed Drives ,Sept. 1998, p. 674-679.
- [30] T. Shimamura, R. Kurosawa, M. Hirano and J. Uchino, "Parallel operation of active and passive filters for variable speed Cycloconverter drive systems", IEEE Trans. Ind. Applications, vol.3, 1989, p.186-191.

- [31] W. Freitas, A.M. França, “Modelagem e análise dinâmica de dispositivos DSTATCOM usando o SimPowerSystem para Matlab/Simulink”, Revista Controle&Automação, Vol.16, no. 2, Abril/Maio/ Junho, p. 187-199, 2005.
- [32] Documento ArcelorMittal Tubarão, “B6319JX0515 – HSM Substation. Single line diagram”, Revisão 5, 2001.
- [33] Toshiba do Brasil, “Relatório de ensaios. Transformador de força, 75MVA, 138/34,5kV”, Janeiro de 2001.
- [34] Documento ArcelorMittal Tubarão, “B6300JMO0039 – Manual Técnico da Filosofia de Proteção do Sistema Elétrico da ArcelorMittal Tubarão, Recebimento e Distribuição ”, Revisão 0, Dezembro de 2007.
- [35] Documento ArcelorMittal Tubarão, “Acordo Operativo entre ESCELSA e CST”, Revisão 10, Março de 2007.
- [36] Documento ArcelorMittal Tubarão, “B6319JET5001 – Hot Strip Mills Substation. A.C. Harmonic Filter Equipment. General Specification ”, Revisão 1, Janeiro de 2001.

# APÊNDICE A - DETALHES DE SIMULAÇÃO DO FILTRO ATIVO

O Capítulo 6 ressalta que, dentro das características de topologia de Filtros Ativos, devem ser avaliados com bastante critério os métodos de detecção e controle da corrente ou tensão, uma vez que estes definem diretamente a eficácia de operação dos filtros, principalmente no que concerne à sua precisão, resposta dinâmica e banda de passagem (*“bandwidth”*). [27]

Nesta linha, um dos pontos chave para a implementação do controle do filtro ativo é o uso de métodos eficazes para geração das referências de tensão e corrente. Neste trabalho utilizou-se o método *SRF* (*“Synchronous Reference Frame”*) para a realização da tarefa de extração e geração das referências de controle.

A simulação do sistema de filtragem ativa no circuito estudado, foi implementada conforme figura 6.6 – bloco 4. Este bloco consiste na geração das referências, controle do filtro e injeção de correntes, através de fontes controladas de correntes. A figura A.1 mostra com maiores detalhes a composição do filtro ativo simulado.

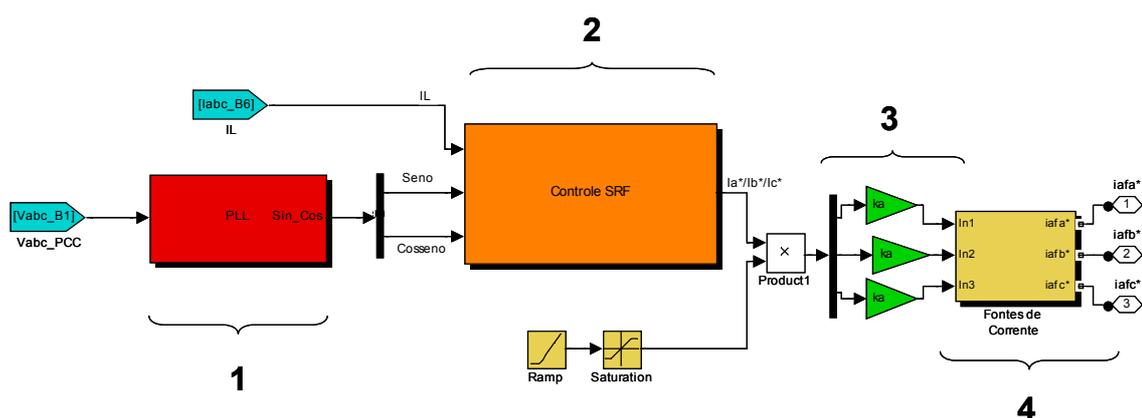


Figura A.1 – Controle principal do Filtro Ativo – *“Synchronous Reference Frame”* – *SRF*.

A numeração apresentada corresponde aos seguintes componentes do sistema de filtragem ativa:

- ✓ 1 → *PLL* (“Phase Locked Loop”);
- ✓ 2 → Controle *SRF*;
- ✓ 3 → Fator de Compensação do Filtro Ativo ( $k_a$ );
- ✓ 4 → Injeção de correntes através de Fontes de Corrente Controladas.

O *PLL* trifásico, simulado através do modelo do *PSB* e representado pela figura A.2, é responsável pela geração dos vetores unitários através das tensões fase-neutro (em pu) do *PCC*.

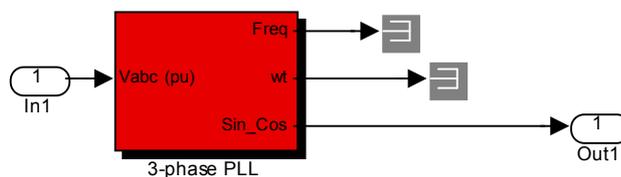


Figura A.2 – Modelo do *PLL* trifásico do *PSB*.

Na figura A.3 é mostrado o detalhamento do controlador *SRF*. Neste controle, a corrente de carga  $i_L$  é medida e as correntes harmônicas desta são extraídas no referencial síncrono  $d-q$ . Os vetores unitários, como mencionado, são gerados pelo *PLL*. No referencial síncrono  $d-q$  a componente fundamental da corrente é transformada em grandeza  $CC$ , em ambos os eixos, e todas as componentes harmônicas são transformadas para grandezas  $CA$ .

As componentes  $CC$  são extraídas pelo filtro passa-baixa (*LPF*) implementado em ambos os eixos  $d-q$ , detectando portanto, somente as quantidades alternadas relativas às harmônicas. Utilizou-se um filtro passa-baixa do tipo Butterworth de 2ª. (segunda) ordem com uma frequência de corte de 30 Hz.

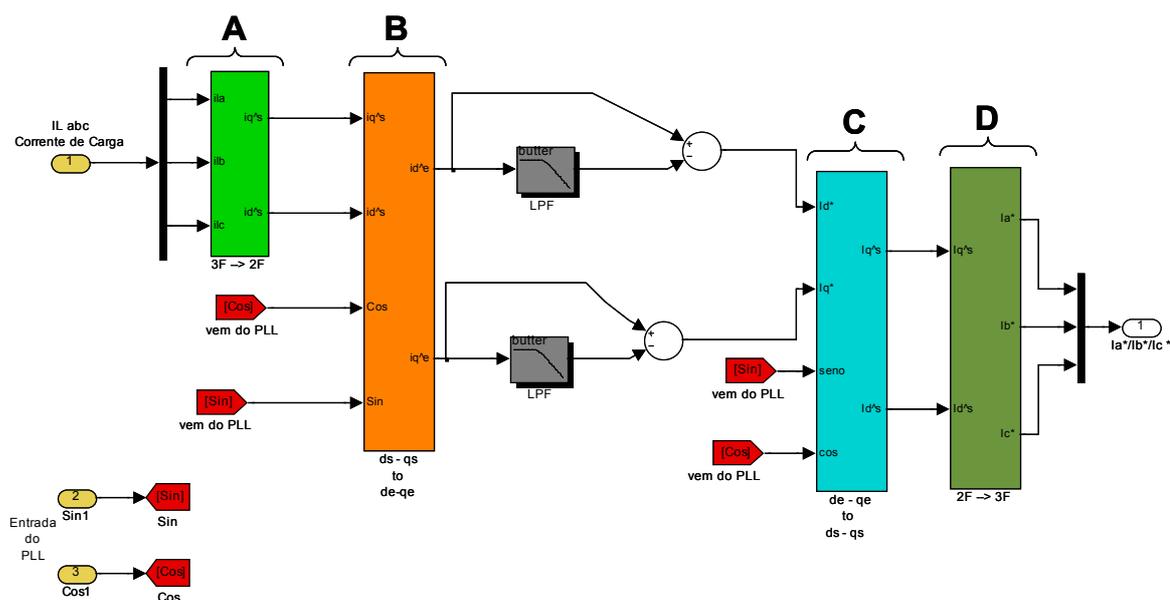


Figura A.3 – Controle SRF simulado.

O bloco A da Figura A.3 realiza a transformação  $ABC \rightarrow \alpha\beta$  a seguir:

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

O bloco B, a transformação  $\alpha\beta \rightarrow d^e-q^e$  da Equação A.2:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

As relações inversas à (A.1) e (A.2) são dadas por (A.3) e (A.4) que são realizadas pelos blocos D e C respectivamente.

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

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

O fator de compensação do filtro ativo -  $k_a$ , bloco 3 da figura A.1, discutido no Capítulo 6, representa a parcela de contribuição do sistema de filtragem ativa na composição híbrida proposta, e é fator importante no dimensionamento em potência do filtro ativo e das estratégias de operação do mesmo, associadas ao sistema de filtragem passiva.

Por fim, o bloco 4 da figura A.1 realiza a simulação da injeção de correntes no sistema, a partir das referências geradas pelo controlador descrito e implementadas por fontes controladas de corrente, diretamente no barramento do *PCC*.

O resultado da simulação do sistema, incorporando-se o sistema de filtragem ativa foi realizado no Capítulo 6.

Esta abordagem permitiu avaliar bem as etapas de detecção e controle, mas é idealizado quanto aos atrasos e outras limitações que um inversor real teria introduzido no sistema.

### A.1 Regulador de Corrente

Não foi o propósito deste trabalho a realização das simulações contemplando o controle de corrente do filtro ativo. Esta tarefa é proposta como continuidade dos estudos iniciados neste trabalho.

Em termos, no entanto, de aplicação em filtros ativos para a compensação de distorções harmônicas, provocadas por cargas não lineares, é importante para o controle de corrente que o conjunto conversor *PWM*/Regulador de Corrente seja capaz de prover um controle da corrente de compensação do filtro ativo,  $i_{af}$ , com uma banda de passagem, “*bandwidth*”, acima de 1,5 KHz. Esta condição permite que a filtragem harmônica seja realizada em um “*range*” até a 25ª harmônica, assim como preconiza padrões inerentes ao assunto, tais como o IEEE 519 e o PRODIST -

ANEEL. É desejável também que a frequência de chaveamento do conversor *PWM* seja acima de 10 KHz [8].

Atualmente, devido a limitações tecnológicas para o nível de potência aqui tratado, estas necessidades para o controle de corrente podem ser ainda difíceis de serem contornadas. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico de novos dispositivos de potência e microcontroladores, a expectativa é que estas limitações sejam superadas e que compensações na ordem da 25<sup>a</sup> harmônica sejam melhor realizadas.

# APÊNDICE B – LISTA DE ROTINAS AUXILIARES

São descritos a seguir as principais rotinas geradas para o desenvolvimento deste trabalho.

## B.1 ExcelTransfer.m

Esta função tem o objetivo de realizar a transferência de dados do *MSExcel* para o *Matlab*, preparando-o para a realização das simulações. Os dados do *MSExcel* são provenientes das medições de tensões e correntes realizadas no barramento, gerados pelo registrador.

*%Realização de leitura, a partir do arquivo xls (dados.xls) e armazenamento diretamente no Matlab*

```
dados=xlsread('dados.xls');
```

*%ajuste de escalas (pontas de prova e tc) e ajuste de "offset"*

*% OFFSET\_X = valor de correção de "offset" de cada medição*

```
dados(1:end,2)=(dados(1:end,2)+ OFFSET_1);
```

```
dados(1:end,3)=(dados(1:end,3)+OFFSET_2);
```

```
dados(1:end,4)=(dados(1:end,4)+OFFSET_3);
```

```
dados(1:end,5)=(dados(1:end,5)+OFFSET_4);
```

```
dados(1:end,6)=(dados(1:end,6));
```

```
dados(1:end,7)=(dados(1:end,7));
```

```
dados(1:end,8)=(dados(1:end,8)+OFFSET_5);
```

```
dados(1:end,9)=(dados(1:end,9)+OFFSET_6);
```

*%Criação de estrutura (nome: est), necessária para entrada de dados nas fontes de corrente*

```
est=struct;
```

```
est.time=[]; %Armazena o valor zero na coluna tempo da estrutura est
```

*%Preenchimento da estrutura com os valores do arquivo dados nas Colunas 2 a 4*  
*est.signals.values=dados(:,2:end);*

## B.2 Calcu\_TensaoFonte\_Impedancia.m

Calcula o módulo e ângulo da tensão a ser considerada para o ajuste da fonte utilizada no modelamento do sistema de distribuição de energia do laminador. Estes valores dependerão da queda de tensão sobre a impedância do cabo ( $Z_s$ ) e também dos valores de tensão encontrados para o caso simulado. Os valores *rms* das variáveis medidas são verificados no modelo *Defasagem\_RMS.mdl*.

Para melhores valores do ângulo e tensão poderão ser realizadas mais de uma interações da simulação, utilizando os valores encontrados em uma interação na próxima, até que o valor encontrado passe a não se alterar significativamente.

```
%Entrada de Dados
teta1 = -31.31*(pi/180); %ângulo da tensao Vrn no pcc, conhecida através do
Defasagem_RMS.mdl
teta2 = -50.34*(pi/180); %ângulo da corrente Ir Trafo no pcc - Conhecida pelo
Defasagem_RMS.mdl
vl = 34.5e3; %tensão de linha - valor inicial da 1a iteração
icc = 11269; %corrente de curto circuito - Anexo 2
vrn_pcc = 19.09e3; % tensão fase-neutro medida no pcc - valor inicial da 1a interação
ipcc = 955.9; %corrente medida do PCC (rms) ou simulada no pcc no caso da expansão
%Condicao inicial (987.7) / 2a simulação (953.2)/ 3a simulação (955.9)já não se
observa variacao relevante no ângulo
%Filtro ativo: 961.3
zcc = j*(vl/sqrt(3))/icc; % Impedância de curto circuito
zcb = 0.34+j*0.9612; %Impedancia do cabo - dados de documentos AMT
zt = zcb+zcc %Impedancia total
vpcc = 19.09e3*(cos(teta1)+j*sin(teta1)); %Tensão do Vrn no pcc (rms) - Medida
no Defasagem_RMS.mdl
itrafo = 961.3*(cos(teta2)+j*sin(teta2)); %Corrente do pcc rms p/ parâmetro 1:
corrente medida e p/ parametro 2:corrente simulada
vth = vpcc+zt*itrafo; %corrente do trafo
vpcc_m = abs(vpcc); %módulo de vpcc
vpcc_a = angle(vpcc);
% Saídas da rotina
vth_m = abs(vth) % módulo de vth
vth_a = angle(vth) % ângulo de vth - rad
vth_ag = vth_a*(180/pi) % ângulo de vth - graus
vth_ml = vth_m*sqrt(3) % tensão de linha
```

### B.3 Defasagem\_RMS.mdl

A rotina permite conhecer os valores *rms* das variáveis **medidas**, após entrada dessas no ambiente *Matlab/Simulink/PSB*, através da utilização de ferramentas disponíveis no próprio *PSB*. Este modelo possibilita verificar também a defasagem angular entre as diferentes variáveis medidas e uma referência “0”.

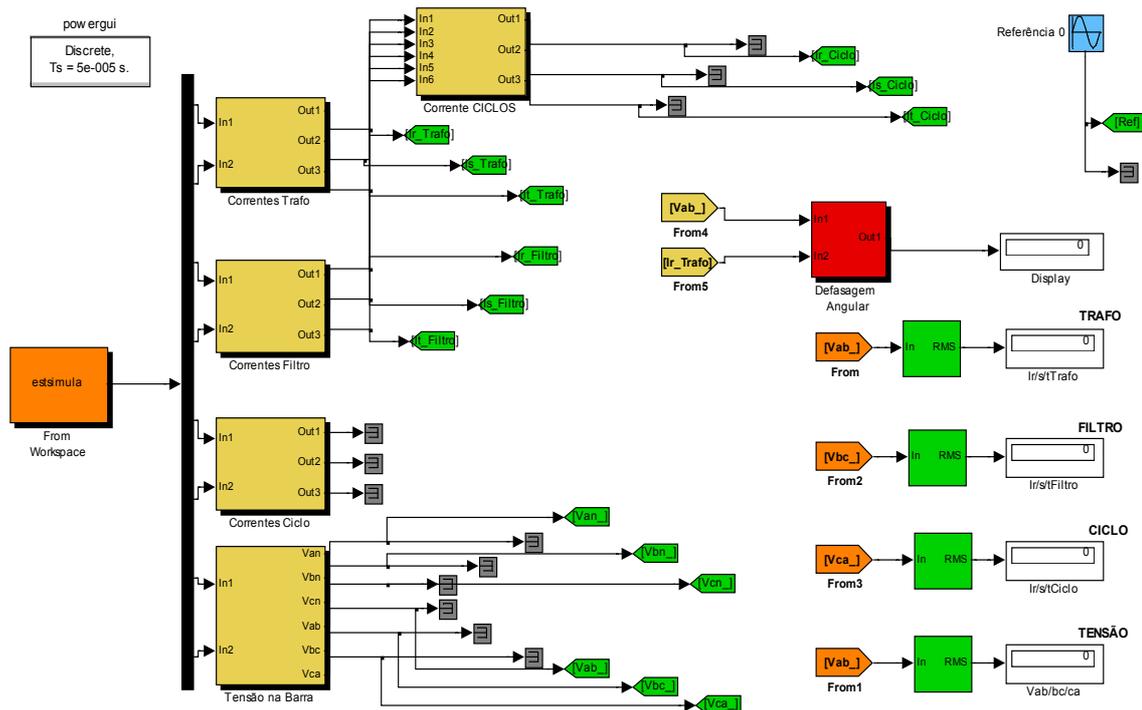


Figura B.1 – Rotina gerada no PSB - Defasagem\_RMS.mdl

# **ANEXO 1 – DADOS DO REGISTRADOR**

Dados gerais de catálogo do equipamento registrador utilizado nas medições de campo.

Registrador Hioki – Modelo 8841.

**HIOKI**

---

---

INSTRUCTION MANUAL

**8841/8842**

**MEMORY HiCORDER**

HIOKI E. E. CORPORATION

---

---

---

# Chapter 1

## Product Overview

---

---

### 1.1 Major Features

#### (1) Waveform recording performance

For the 8841, using the 8946 4ch ANALOG UNIT, waveform recording can be performed in up to 16 channels with 12-bit resolution (8841).

With the 8842, waveform recording can be performed for up to 16 channels at 12-bit resolution, for any combination of input units.

#### (2) Vertical display

The 10.4-inch vertically-mounted TFT color LCD display has a resolution of  $640 \times 480$  dots.

#### (3) Five functions

- Memory recorder with up to  $1 \mu\text{s}$  (all channels simultaneously) sampling period.
- Real-time recording capability to paper in recorder function
- RMS recorder function for recording rms values of AC power supply lines and DC sources.
- Recorder & Memory Recorder function provides combined recorder and memory recorder functions
- FFT function offers 12 types of analysis functions

#### (4) Storage capacity

The 8841/8842 has a standard storage capacity of 8 M words, expandable to 32 M words with memory upgrades.

#### (5) Trigger function

- Digital trigger circuit
- Trigger types: level trigger, window-in trigger, window-out trigger, voltage drop trigger, RMS level trigger, period trigger, logic trigger (pattern trigger)

**(6) Simple function key interface (GUI)**

Thanks to its GUI-inspired design using large function key graphics, the unit is easy to set up and operate.

**(7) On-line help**

On-line help guides the user through operation steps and various functions.

**(8) Scaling function**

By setting the physical amount and the unit to be used for 1 V input, the measurement result can be converted into any desired scale.

**(9) Additional recording function**

When enabled, the memory is regarded as printer paper.

**(10) Input units**

The analog inputs are floating, and so each input can be connected to its own independent potentials.

Select input units suitable for measurements.

**(11) Built-in thermal printer**

- Thermosensitive recording method using a thermal line head  
The built-in printer delivers waveform printouts on the spot.
- The printer can also be used to print screen shots and parameter information.  
Report print (A4 size) can be printed.

**(12) External storage means**

The waveform data and/or setup conditions can be stored on a floppy disk, MO disk, or PC card (SRAM, flash ATA, or HDD card).

**(13) SCSI interfaces**

If a MO drive is connected to the SCSI interface, the waveform data and/or setup conditions can be stored on a MO disk.

**(14) GP-IB, RS-232C, and LAN interface**

Remote control including input unit is possible.

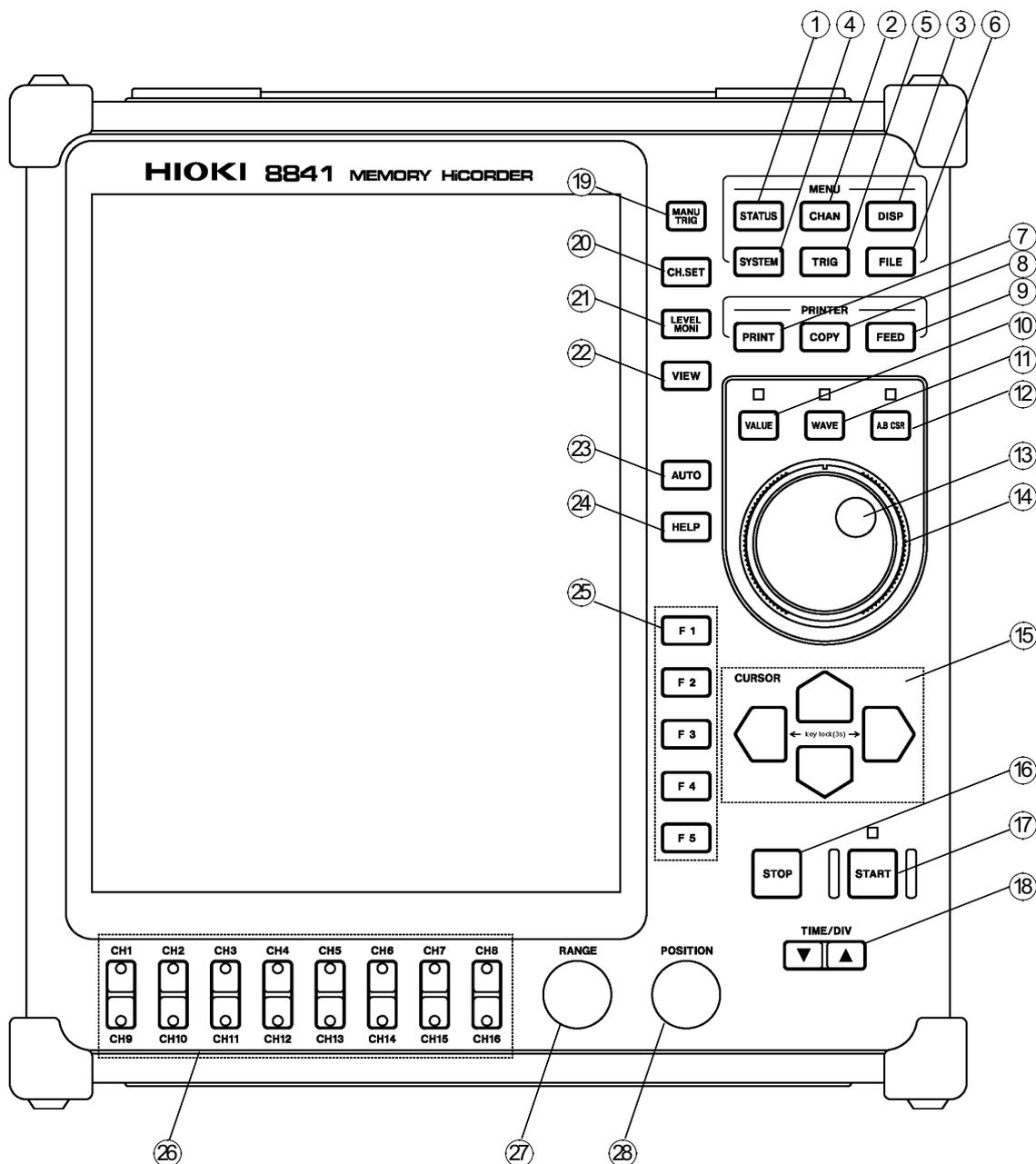
**(15) External print**

If a color printer is connected to the printer card, the data can be printed in color.

**(16) Dual-language capability**

Display language is switchable between Japanese and English.

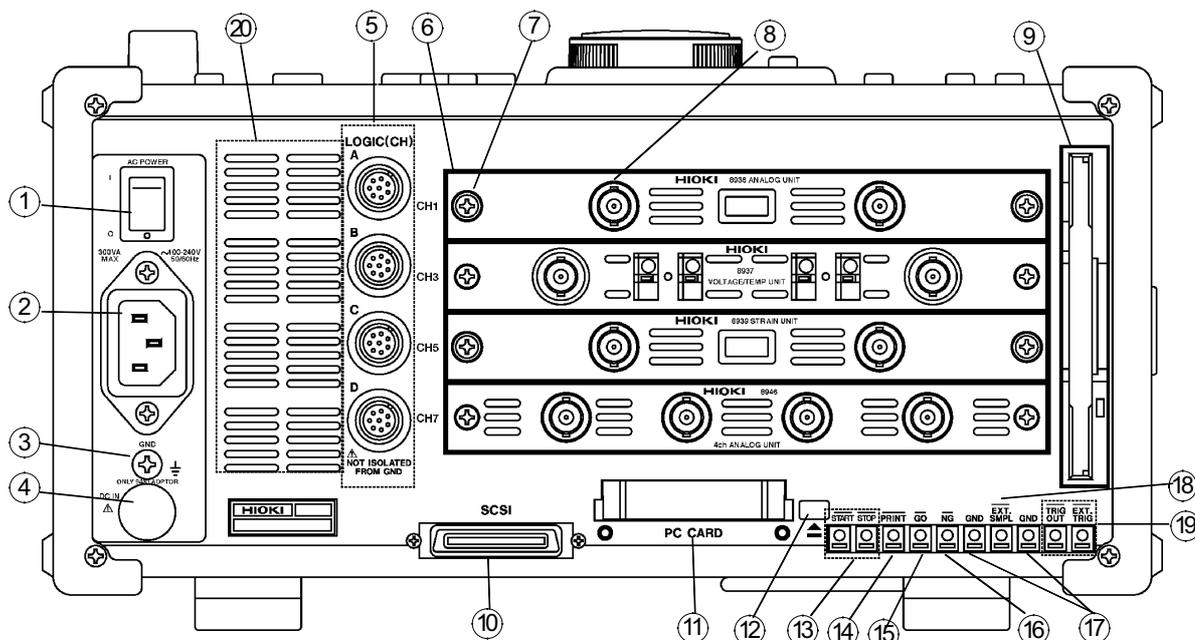
## 1.2 Identification of Controls and Indicators



Front Panel

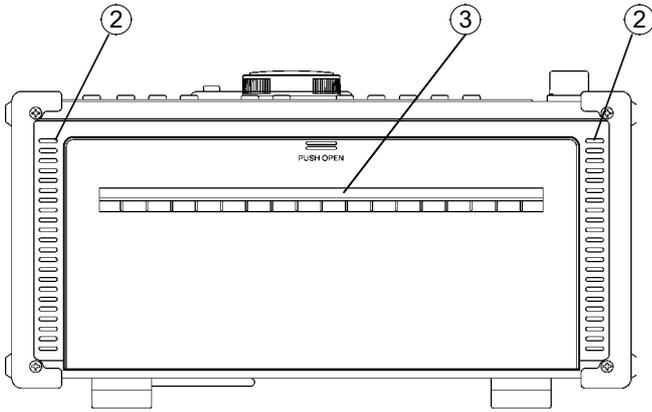
- ① **STATUS** key      Causes the display to show the STATUS screen which serves for setting most measurement parameters.
- ② **CHAN** key      Causes the display to show the CHANNEL or Variable screen which serves for making input channel settings.
- ③ **DISP** key      Causes the display to show measurement and analysis results.
- ④ **SYSTEM** key    Causes the display to show the SYSTEM screen which serves for making system-wide settings such as for the scaling function.
- ⑤ **TRIG** key      Causes the display to show the TRIGGER screen. Setting the trigger functions.

- 
- |   |                                     |  |
|---|-------------------------------------|--|
| ⑥ | <b>FILE</b> key                     | Causes the display to show the FILE screen which serves for reading, storing, etc. the waveform data etc.  |
| ⑦ | <b>PRINT</b> key                    | Serves to print out stored waveforms.<br>Output destination can be set on the SYSTEM4 screen.  |
| ⑧ | <b>COPY</b> key                     | Serves to print out a hard copy of the current screen display.<br>Copy destination can be set on the SYSTEM4 screen  |
| ⑨ | <b>FEED</b> key                     | Causes the printer paper to advance for as long as the key is pressed.   |
| ⑩ | <b>VALUE</b> key                    | Uses to select the numerical values setting.   |
| ⑪ | <b>WAVE</b> key                     | Uses to select the the waveform scrolling.   |
| ⑫ | <b>A•B CSR</b> key                  | Uses to select the the A•B cursor moving.  |
| ⑬ | Jog                                 | Rotary control knob that serves to change values, move the A•B cursors, and scroll the waveform.   |
| ⑭ | Shuttle                             | Concentric ring that serves to change values, move the A•B cursors, and to scroll the waveform. The speed of movement is proportional to the rotation angle.                           |
| ⑮ | <b>CURSOR</b> key                   | These keys serve to move the flashing cursor in the four directions.   |
| ⑯ | <b>STOP</b> key                     | Stops measurement and analysis.<br>Pressing this key twice stops measurement.  |
| ⑰ | <b>START</b> key                    | Initiates the measurement and analysis. During measurement, the LED above the key is lit.  |
| ⑱ | <b>TIME/DIV</b> key                 | Serves to set the speed for inputting and storing the input signal.  |
| ⑲ | <b>MANU TRIG</b> key                | Serves to cause manual triggering.   |
| ⑳ | <b>CH.SET</b> key                   | Sets the input channel on the display screen<br>Toggles the screen among those for analog channels (1 to 16) and logic channels (A to D).  |
| ㉑ | <b>LEVEL MONI</b> key               | Serves to check the input signal level.  |
| ㉒ | <b>VIEW</b> key                     | Serves to indicate the position of the currently displayed screen information in relation to the entire recording length.<br><br>Call up information about the status of memory block. |
| ㉓ | <b>AUTO</b> key                     | Pressing this key activates automatic setting of time axis range and voltage range values of input waveform.   |
| ㉔ | <b>HELP</b> key                     | Provides on-line help.   |
| ㉕ | <b>F1 to F5</b> key                 | Serve to select setting items.   |
| ㉖ | Channel select/<br>input value keys | Selects channel or sets numerical value  |
| ㉗ | <b>RANGE</b> knob                   | Sets the measurement range for the channel.  |
| ㉘ | <b>POSITION</b> knob                | Sets the zero position for the channel.  |

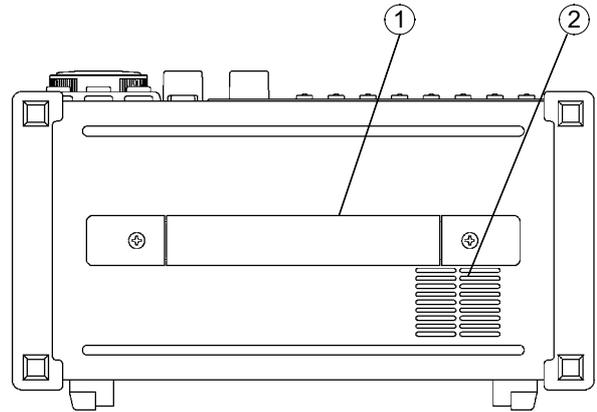


### Right Side Panel

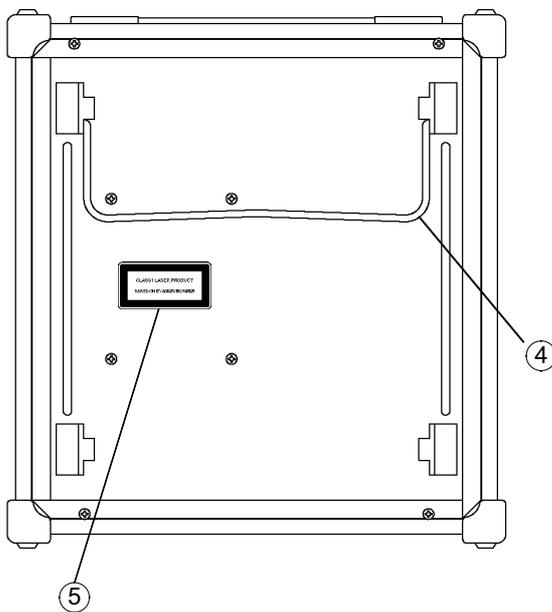
- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| ① AC power switch                | Switches on or off the AC power supply.  |
| ② AC connector                   | The supplied power cord must be plugged in here.   |
| ③ Function ground terminal (GND) | Connects to the earth.   |
| ④ DC connector                   | Connects to the optional 9433 DC POWER ADAPTER.  |
| ⑤ Logic probe connectors         | Input connector for the logic input section, designed for the dedicate logic probes (CH A to D). |
| ⑥ Input unit slots               | These slots accept input units.  |
| ⑦ Fastening screw                | Secures the plug-in unit.  |
| ⑧ Analog input connector         | Unbalanced analog input. (on ANALOG UNIT)  |
| ⑨ FD slot                        | Floppy disk is inserted.   |
| ⑩ SCSI connector                 | An MO drive can be connected.  |
| ⑪ PC card slot                   | Inserts the PC card.   |
| ⑫ Eject button                   | Removes the PC card.   |
| ⑬ External start/stop terminals  | Start and stop operation can be controlled.  |
| ⑭ External print terminal        | Print operation can be controlled.   |
| ⑮ GO evaluation output terminal  | When the waveform evaluation has resulted in GO, a signal is output from this terminal.          |
| ⑯ NG evaluation output terminal  | When the waveform evaluation has resulted in NG, a signal is output from this terminal.          |
| ⑰ Ground terminal (GND)          | Uses with ⑬ to ⑱ (except ⑰) terminals.   |
| ⑱ External sampling terminal     | Allows input of an external sampling signal. (in Memory recorder and FFT functions)              |
| ⑲ Trigger terminals              | Can be used to synchronize multiple units, using the EXT TRIG input and TRIG OUT output.         |
| ⑳ Blowing slot                   |  |



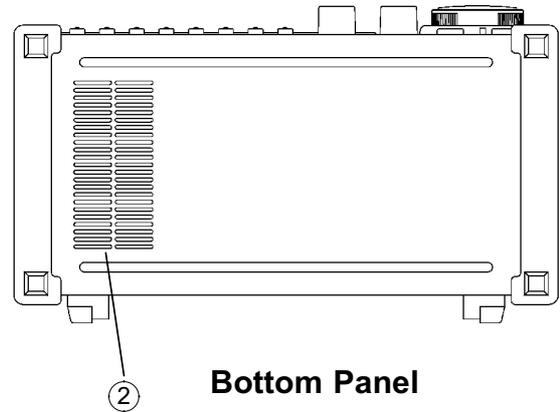
**Left Side Panel**



**Upper Panel**



**Rear Panel**



**Bottom Panel**

- ① Handle                      Serves for transporting the 8841/42.
- ② Ventilation slots
- ③ Printer
- ④ Stand                        The unit can also be propped up at an angle using the stand.
- ⑤ Laser warning label (when the 9607 MO UNIT is installed)

# ANEXO 2 – CURTO CIRCUITO

## SIMULADO DO SISTEMA DE

### DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DO LTQ

Curto circuito simulado no barramento do laminador.  
Programa utilizado: EDSA Version 2.7.2.2

#### ➤ Curto-Circuito 138kV – Trifásico

(Barra de onde sai a LT que alimenta o transformador do LTQ - 75MVA  
138/34,5kV)

Three Phase Bolted Fault

| Bus Ident | Pre-Flt Voltage | 1/2-Cyc AC-Comp | 1/2-Cyc Asym | 3-Cycl AC-Comp | 3-Cycl Asym | 10-Cycl AC-Comp | 10-Cycl Asym | Steady State |
|-----------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|-------------|-----------------|--------------|--------------|
| ER2 - A2  | 138000          | 21282           | 31963        | 21282          | 22547       | 15789           | 15790        | 9882         |

#### ➤ Curto-Circuito 138kV – Monofásico

(Barra de onde sai a LT que alimenta o transformador do LTQ - 75MVA  
138/34,5kV)

Line to Ground Fault

| Bus Ident | Pre-Flt Voltage | SC Current (Amps) at the following Times |              |                |             |                 |              |       | Steady State |
|-----------|-----------------|--|--------------|----------------|-------------|-----------------|--------------|-------|--------------|
|           |                 | 1/2-Cyc AC-Comp                          | 1/2-Cyc Asym | 3-Cycl AC-Comp | 3-Cycl Asym | 10-Cycl AC-Comp | 10-Cycl Asym |       |              |
| ER2 - A2  | 138000          | 25092                                    | 37471        | 25092          | 26415       | 21114           | 21115        | 15821 |              |

#### ➤ Curto-Circuito LTQ 34,5kV – Trifásico

Three Phase Bolted Fault

| Bus Ident | Pre-Flt Voltage | SC Current (Amps) at the following Times |              |                |             |                 |              |       | Steady State |
|-----------|-----------------|--|--------------|----------------|-------------|-----------------|--------------|-------|--------------|
|           |                 | 1/2-Cyc AC-Comp                          | 1/2-Cyc Asym | 3-Cycl AC-Comp | 3-Cycl Asym | 10-Cycl AC-Comp | 10-Cycl Asym |       |              |
| LTQ-105   | 34500           | 13292                                    | 21046        | 13292          | 15536       | 12607           | 12640        | 11269 |              |

#### ➤ Curto-Circuito LTQ 34,5kV – Monofásico

Icc (fase-terra) = 100A (Aterrado por resistor)

## ANEXO 3 – MEDIÇÕES UTILIZADAS

A lista a seguir enumera as medições realizadas no laminador, para registro. As medições são separadas entre as diferentes situações de laminação observadas.

- ✓ **LTQ 3 7 / LTQ 3 9 / LTQ 3 11 / LTQ 3 12 – MT01 e MC01** → Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação rodando sem laminar.
- ✓ **LTQ 3 5 / LTQ 3 8 – MT02 e MC02** → Laminadores desbastadores laminando e cadeiras de laminação rodando sem laminar.
- ✓ **LTQ 3 10 / LTQ 3 13 – MT03 e MC03** → Laminadores desbastadores rodando sem laminar e cadeiras de laminação laminando.
- ✓ **LTQ 3 4 / LTQ 3 6 – MT04 e MC04** → Laminadores desbastadores e cadeiras de laminação laminando. Laminação seqüencial ou simultânea.

As medições encontram-se no formato Excel, utilizado como interface para entrada de dados no *Matlab*. As colunas de cada arquivo correspondem as seguintes medições realizadas:

- ✓ Coluna 1 – Tempo da amostragem.
- ✓ Coluna 2 e Coluna 3 – Correntes  $I_r$  e  $I_s$  do barramento de entrada do laminador.
- ✓ Coluna 4 e Coluna 5 – Correntes  $I_r$  e  $I_s$  do conjunto laminador *Top*. Utilizada apenas como referência neste trabalho.
- ✓ Coluna 6 e Coluna 7 - Correntes  $I_r$  e  $I_s$  do sistema de filtragem passiva.
- ✓ Coluna 8 e Coluna 9 – Tensões  $V_{rs}$  e  $V_{st}$  do barramento de entrada do laminador

## **ANEXO 4 – ARTIGO APRESENTADO**

Artigo apresentado no VII CBQEE – Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica.

C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C Sousa, “Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconvertidores em uma Planta Siderúrgica”, Anais do VII Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia, Santos-SP, Agosto 2007.

# Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconversores em uma Planta Siderúrgica

C. G. Ferreira, *ArcelorMittal Tubarão*, D.S.L. Simonetti e G.D.C. Sousa, *Universidade Federal do Espírito Santo*<sup>1</sup>

**Resumo** – Uma planta siderúrgica caracteriza-se pela intensiva transformação de energia, com a utilização de cargas não lineares de alta potência em seu processo. A aplicação de Cicloconversores em Cadeias de Laminação, largamente utilizadas neste segmento industrial, pode resultar em penalidades para o sistema elétrico, uma vez que geram correntes harmônicas que fluem pelo sistema de distribuição da planta, caso não sejam adequadamente tratadas. Estas correntes harmônicas causam distorção da tensão e aumentam as perdas de potência no sistema, podendo ainda interagir com os sistemas de compensação de fator de potência (bancos de capacitores), causar mau funcionamento de equipamentos, dentre outras inúmeras penalidades.

Este trabalho apresenta um estudo de aspectos relacionados à compensação harmônica em um ambiente siderúrgico, considerando a aplicação de Cicloconversores em um Laminador de Tiras a Quente. O estudo inclui medições de campo, análise harmônica e avaliação do conjunto de Filtros utilizados no sistema, com o objetivo de verificar a desempenho do sistema de compensação existente.

**Palavras Chave** — Qualidade de Energia, Sistemas Elétricos Industriais, Compensação Harmônica, Filtro Harmônico, Cicloconversores.

## I. INTRODUÇÃO

A Qualidade da Energia é cada vez mais uma prioridade no tratamento da energia no segmento industrial, uma vez que pode representar operações da planta sem interrupções, com alto nível de produtividade e conseqüentemente estabilidade operacional. Plantas siderúrgicas caracterizam-se pela intensiva transformação de energia, com a utilização de cargas não lineares de alta potência em seu processo, que podem afetar diretamente a qualidade da energia empregada, caso os problemas não sejam bem caracterizadas e formas de mitigação de seus efeitos adotadas. Entre os problemas de qualidade de energia comumente

encontrados nas operações de indústrias siderúrgicas, estão incluídos: transitórios (impulsivos, oscilatórios), variações de curta duração (interrupções, afundamentos / *sag*, elevação / *swell*), variações de longa duração (interrupção permanente, subtensão, sobretensão), desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação, eventuais níveis cc, interharmônicas), flutuações de tensão e variação de frequência da rede.

Neste trabalho em especial, serão de interesse maior aspectos relacionados à geração e mitigação de correntes harmônicas, caracterizadas principalmente pela aplicação de acionamentos a velocidade variável, baseados na implementação de Cicloconversores em um Laminador de Tiras a Quente.

Medições de campo e análise do espectro harmônico do sistema elétrico do Laminador serão consideradas, principalmente pelas seguintes razões: 1) plano de expansão do Laminador de Tiras a Quente, com possibilidade de inserção de novas cargas, demandando uma avaliação do sistema de compensação existente e 2) estudo e verificação de performance do sistema de compensação harmônica (Sistema de Filtros Passivos) existente, no barramento dos Cicloconversores. Medições de tensão e corrente foram realizadas na barra de alimentação do conjunto de Cicloconversores, estando o Laminador em diferentes estágios de sua Operação. Com base nas medições realizadas, modelos matemáticos computacionais foram desenvolvidos e utilizados, com o intuito de realizar a avaliação de índices de qualidade relacionados às componentes harmônicas da planta.

O estudo resulta desta forma em uma avaliação da condição atual de operação do sistema, baseada em índices de qualidade propostos por normas brasileiras, normas internacionais, além dos índices estabelecidos em contrato entre empresa e concessionária local de distribuição de energia.

## II. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A Figura 1 retrata como se dá a distorção de tensão em um sistema de potência, quando se considera a utilização de cargas não lineares nesse. O sistema possui fonte de tensão senoidal ( $v_s$ ) operando com

<sup>1</sup> C.G.Ferreira é Especialista de Engenharia Elétrica e Eletrônica da ArcelorMittal Tubarão, Serra – ES. (celio.ferreira@arcelormittal.com).

D.S.L.Simonetti é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória - ES. (d.simonetti@ele.ufes.br).

G.D.C.Sousa é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória - ES. (g.sousa@ele.ufes.br)

uma carga linear e uma carga não linear. A carga não linear consome corrente não senoidal ( $i_{L1}$ ) que contém harmônicas. A circulação de harmônicas na corrente de linha ( $i_s$ ) produz uma queda de tensão não linear ( $\Delta v$ ) sob a impedância de linha ( $X_L$ ), que distorce a tensão de carga ( $v_L$ ). Como consequência, a carga linear é também afetada, consumindo corrente distorcida.

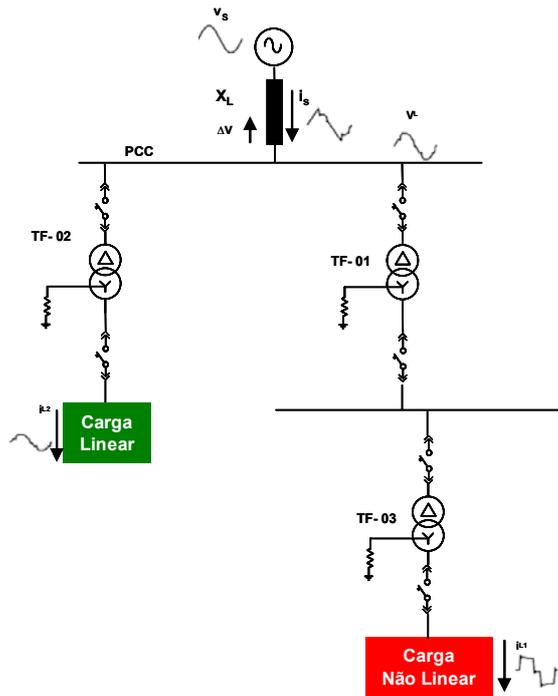


Figura 1 – Distorção de tensão em sistema elétrico constituído de carga não linear

A presença de harmônicas nos sistemas de potência causa diversos danos aos consumidores de energia. Além dos prejuízos ao funcionamento de sistemas, causados pela “poluição” harmônica, os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas elétricos são também muito elevados. Desta forma, a questão da qualidade de energia de um sistema de distribuição de energia em uma planta industrial, aos seus consumidores internos, é objeto de grande preocupação e de investimentos em estudos de formas de mitigação dos problemas de distribuição e qualidade de energia.

Normas internacionais e contratos firmados entre as empresas de distribuição de energia e as indústrias, relativas ao consumo de energia elétrica, tal como IEEE 519 [1], limita os níveis de distorção harmônica da tensão com os quais os sistemas elétricos podem operar. Estas normas impõem também que novos equipamentos não introduzam na rede, harmônicas de corrente com amplitude superior a determinados valores.

Como mencionado, o aumento da aplicação de cargas não lineares nos sistemas elétricos industriais, tais

como, cicloconversores, retificadores para fontes DC, retificadores de entrada de inversores, utilizados no acionamento de cargas em velocidade variável, por exemplo, podem resultar em sérios problemas de geração de harmônicas, fluxo de potência reativa, “flicker”, além de problemas de ressonância. Além da distorção das formas de onda propriamente dita, a presença destes distúrbios harmônicos nas linhas de distribuição de energia originam problemas em equipamentos e componentes do sistema elétrico, tais como: [2]

- ✓ Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibração nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- ✓ Aquecimento, ruído audível e redução da vida útil de máquinas elétricas rotativas;
- ✓ Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- ✓ Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- ✓ Aumento nas perdas dos condutores elétricos;
- ✓ Redução da vida útil de lâmpadas e flutuações da intensidade luminosa (“flicker” – para o caso de ocorrência de subharmônicas);
- ✓ Erros em medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- ✓ Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação;
- ✓ Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrônicos ligados a rede elétrica, tais como Controladores Lógico Programáveis (CLP), sistemas de controle comandados por microcontroladores, etc., muitas vezes responsáveis pelo controle de processos produtivos industriais.

### III. SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

A ArcelorMittal Tubarão é uma empresa ligada ao grupo Arcelor Mittal e líder mundial na produção de semi-acabados de aço. Em 2007 a empresa terá sua capacidade de produção ampliada para 7,5 milhões de toneladas de aço por ano, utilizados na produção de placas e laminados a quente.

A empresa é auto-suficiente em produção de energia, possuindo um sistema de geração formado por quatro Centrais Termoelétricas com uma capacidade de geração total de 304MVA (2 X 72MVA + 2 X 80MVA). A geração é feita no nível de 13,8kV e posteriormente, nas subestações elevadoras, é transformado para o nível de 138kV. Nas Estações Receptoras 1 e 2 (ER-1 e ER-2), além do recebimento das quatro linhas de transmissão referentes aos geradores internos, existem duas linhas de transmissão que interligam a ARCELORMITTAL TUBARÃO à concessionária de distribuição de energia local, sendo a empresa alimentada em 138kV e distribuindo às subestações das principais unidades operacionais da planta, no mesmo nível de tensão. A

Figura 2 mostra o unifilar simplificado do Sistema Elétrico da ARCELORMITTAL TUBARÃO.

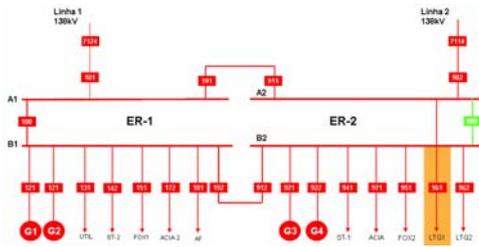


Figura 2 – Unifilar do Sistema Elétrico da ARCELORMITTAL TUBARÃO

A subestação de alimentação do Laminador de Tiras a Quente (LTQ), alimentada pelo circuito em destaque na Figura 2, merece destaque com relação aos aspectos da qualidade de energia elétrica, principalmente quanto à geração e estratégias de compensação harmônica e é, portanto, de maior interesse neste trabalho. A subestação possui uma potência total instalada de transformação de 125MVA e é alimentada por duas linhas de 138kV a partir da Estação receptora (ER2) – Linha 1 e Linha 2.

A Linha 1 é destinada à alimentação do transformador de 138-34,5kV de 75MVA, responsável pela alimentação dos motores principais do Laminador. Estas são as cargas que mais flutuam durante o processo de laminação de uma placa uma vez que, este circuito alimenta os cicloconversores que acionam os motores de 7500kW (2 unidades) do Laminador Desbastador e de 8000kW (6 unidades) do Laminador Acabador. A Linha 1 fica permanentemente ligada ao sistema elétrico da concessionária local.

A Linha 2 é destinada à alimentação, em 138-13,8kV / 50MVA, responsável pela alimentação das cargas auxiliares do Laminador de Tiras a Quente, que são os motores do Laminador Vertical, Tesoura de Pontas e Bobinadeiras, bem como todo o Sistema Hidráulico, o Forno de Reaquecimento de Placas e a Estação de Tratamento de Água. Esta linha fica permanentemente ligada à barra de Geração da empresa.

A Figura 3 mostra o esquema unifilar simplificado da Subestação do Laminador de Tiras a Quente, em estudo.

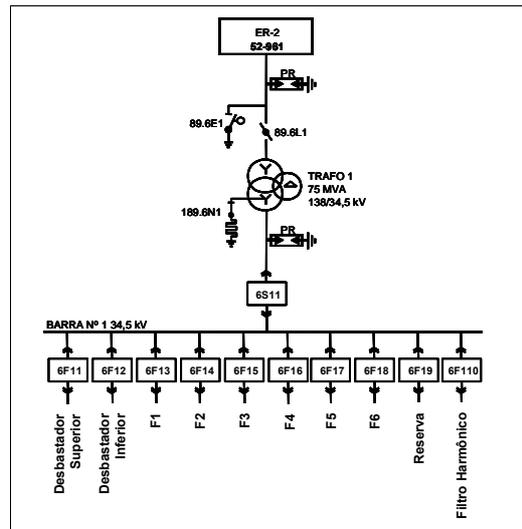
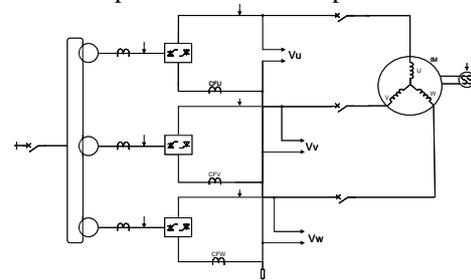


Figura 3 – Unifilar Simplificado da Subestação de 34,5kV dos Conjuntos Laminadores

#### IV. CICLOCONVERSORES

Cicloconversores são conversores estáticos de frequência (SFC) projetados para realizar acionamento a velocidade variável de motores de indução ou síncronos, que não utilizam um *link* DC intermediário em sua estrutura de construção. O desenvolvimento da tecnologia de semicondutores de potência e microprocessadores propiciou a disseminação do uso da tecnologia dos Cicloconversores, sendo esses largamente utilizados na indústria em aplicações como Laminadores, moinhos, além da aplicação em equipamentos de tração elétrica, navios de grande porte, etc. [6].

Um Cicloconversor consiste em um ou mais pares de retificadores controlados, conectados na topologia “back to back”. A Figura 4 mostra as estruturas básicas dos Cicloconversores instalados no Laminador da ArcelorMittal Tubarão. O ângulo de atraso destes retificadores é modulado, de forma a gerar uma tensão CA de saída na frequência e amplitude desejadas. Aplicações de Cicloconversores normalmente são dimensionadas para sistema de alta potência.



(a)

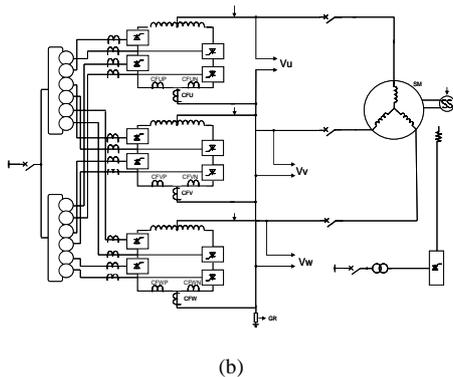


Figura 4 – Esquema do Cicloconversor trifásico utilizado no Laminador. (a) Aplicação com operação por bloqueio de grupo. (b) Aplicação com modo de circulação de corrente

Na indústria siderúrgica, Cicloconversores são normalmente utilizados em Laminadores, comumente chamados de *rolling mills* [4]. A faixa de potência de cada uma das cadeias de laminação é da ordem de 8MVA, resultando em uma potência aparente de cerca de 50MVA para seis cadeias de laminação.

Cargas como Cicloconversores influenciam diretamente a qualidade de energia da rede onde conectada, resultando em baixo fator de potência e distorção de tensão. Para a melhoria do fator de potência, filtros passivos e estratégias de controle dos Cicloconversores (Modo com Corrente de Circulação, por exemplo) podem ser adotados.

A compensação do fator de potência irá depender da topologia e das estratégias de controle a ser adotadas no Cicloconversor, devendo o projeto levar em consideração a correção do fator de potência em um âmbito global, dentro da rede de distribuição de energia da planta. Como mencionado, Filtros Passivos são estratégias de mitigação largamente utilizada para as compensações do fator de potência gerado por este tipo de carga, mas também, como uma segunda característica importante, os circuitos de Filtros Passivos são utilizados para realizar a compensação de correntes harmônicas geradas por aplicação de Cicloconversores.

No caso de conversores que possuem geração harmônica típica, como as encontradas em *drives* DC, os circuitos de filtros podem ser projetados para sintonizar e corrigir frequências harmônicas comuns (exemplo: 5<sup>a</sup>. e 7<sup>a</sup>. harmônica), sendo necessário também se identificar no projeto as características de ressonância do circuito onde aplicado.

Todavia, a corrente de carga dos Cicloconversores possui um espectro de corrente mais complexo [5]. Em adição às características harmônicas típicas dos conversores, correntes interharmônicas também são geradas. Estas correntes interharmônicas irão depender da velocidade e da potência utilizadas nos acionamentos.

#### A. Espectro de Corrente em Cicloconversores

As correntes harmônicas, tipicamente geradas por Cicloconversores são:

$$(6.n \pm 1).f_N, \text{ sendo } n = 1, 2, \dots \text{ para Ciclo a 6-pulsos} \quad (1)$$

$$(12.n \pm 1).f_N, \text{ sendo } n = 1, 2, \dots \text{ para Ciclo a 12-pulsos} \quad (2)$$

$f_N$  é a Frequência da fonte de tensão do sistema (60Hz)

Adicionalmente, outras correntes harmônicas (ex.: 2<sup>a</sup>. e 3<sup>a</sup>. harmônicas) podem ser geradas devido a influência de comportamentos assimétricos de equipamentos elétricos (transformadores, conversores, etc.) assim como por corrente “inrush” de Transformadores.

As correntes interharmônicas geradas dependem da velocidade de trabalho da aplicação, da potência aplicada e da forma de onda de saída do Ciclo. As Frequências das interharmônicas geradas podem ser calculadas a partir das seguintes equações:

$$(6.n \pm 1).f_N \pm 6.k.f_M, \text{ sendo } n=0, 1, 2, \dots; k=1, 2, \dots \text{ para Ciclo a 6-pulsos} \quad (3)$$

$$(12.n \pm 1).f_N \pm 6.k.f_M, \text{ sendo } n=0, 1, 2, \dots; k=1, 2, \dots \text{ para Ciclo a 12-pulsos} \quad (4)$$

$f_M$ : Frequência no lado motor do Cicloconversor.

A magnitude das correntes interharmônicas é proporcional à corrente de carga total.

Frequências interharmônicas são também conhecidas como *sidebands*.

## V. ESTUDO DA COMPENSAÇÃO HARMÔNICA NA APLICAÇÃO DE CICLOCONVERSORES

De forma a regular a conexão do Sistema Elétrico ArcelorMittal Tubarão ao Sistema de Distribuição da concessionária local, estabelecendo direitos e obrigações de ambas as partes em função da interligação no ponto desta conexão, as empresas celebram periodicamente um contrato.

Deste contrato, do ponto de vista da qualidade de energia, algumas definições merecem destaque, iniciando pelas características técnicas da conexão. Este título estabelece que a conexão seja em corrente alternada trifásica equilibrada, na frequência de 60 Hz mais ou menos 1,5% e na tensão de 138KV entre fases mais 5% ou menos 3%.

Especificamente no artigo VIII, referente à qualidade de energia, são definidos limites a serem observados no ponto de conexão. [6]

No âmbito deste trabalho, nos interessa os requisitos relativos aos índices de qualidade de energia referentes às distorções harmônicas.

O controle dos índices de qualidade de energia é realizado em um âmbito global, entre a indústria e a concessionária de distribuição de energia local, sendo feita nos pontos de interligação do sistema elétrico. No entanto, a avaliação de pontos de conexão internos ao sistema elétrico industrial, e de responsabilidade interna da empresa, torna-se relevante para a operação da planta. Os pontos avaliados devem ser aqueles com probabilidade maior de gerar impacto no sistema elétrico interno, com relação aos índices de qualidade de energia durante sua operação. Esta avaliação permite o controle da qualidade de energia distribuída

aos diversos consumidores da planta e evita assim que tais consumidores sofram as conseqüências negativas de distúrbios de energia gerados internamente, mesmo que, de uma forma geral, os requisitos de qualidade firmados entre a concessionária e a empresa estejam atendidos.

Neste trabalho serão considerados os índices de distorção harmônica medidos na Subestação do Laminador de Tiras a Quente, parte integrante do Sistema Elétrico da ARCELORMITTAL TUBARÃO. Medições de campo foram realizadas neste sistema, de forma a permitir o estudos

#### A. Mitigação de efeitos harmônicos no sistema – Aplicação de Filtros Passivos

Existe uma variedade de técnicas que podem ser utilizadas para mitigar efeitos harmônicos em sistemas elétricos industriais. A técnica mais comum técnica utilizada é o uso de Filtros Passivos. A aplicação de Filtros Passivos tem sido utilizada com sucesso para controlar distorções harmônicas e também interharmônicas em projetos que utilizam Cicloconversores [7].

O projeto dos filtros para compensação de cargas de Cicloconversores requer conhecimento da operação dos acionamentos e da geração de harmônicos e interharmônicas destes *drives*. Um cuidado especial deve ser dirigido ao estudo das ressonâncias paralelas, que não devem ser permitidas e que influenciam diretamente o projeto dos filtros.

O projeto do filtro resultante deve ser uma otimização entre os fatores de qualidade de energia requeridos *versus* considerações econômicas, ressaltando a eficiência, custo de capital e espaços físico requerido na instalação.

No circuito em estudo, para filtrar as componentes harmônicas e interharmônicas geradas durante o funcionamento dos Cicloconversores, foi instalado um sistema de Filtro Passivo no barramento de 34,5kV, sendo esse dividido em 4 (quatro) ramos, cada um desses sintonizado numa freqüência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas, dentro do variedade de freqüências geradas na operação deste equipamento. A figura 5 ilustra o Filtro de Harmônicos do Laminador de Tiras a Quente, que contém as seguintes características:

- ✓ Ramo 1 – sintonizado na harmônica “2,6” sendo este um filtro do tipo Passa Alta (#2,6HP);
- ✓ Ramo 2 – sintonizado na harmônica “4,08” sendo este um filtro do tipo Passa Faixa (#4,08FL);
- ✓ Ramo 3 – sintonizado na harmônica “6” sendo este um filtro do tipo Passa Alta (#6HP);
- ✓ Ramo 4 – sintonizado na harmônica “10” sendo este um filtro do tipo Passa Alta (#10HP);

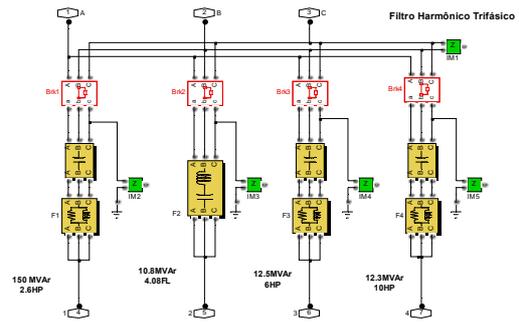


Figura 5 – Esquema representativo do Filtro Harmônico Instalado Modelo simulado

Matlab / Simulink e *Power System Blockset* foram utilizados como ferramenta de simulação do sistema de filtro harmônico. O modelo implementado permite avaliar a resposta em freqüência do sistema instalado, Figura 6, e mostra a correspondência entre as freqüências de projeto e a resposta do filtro.

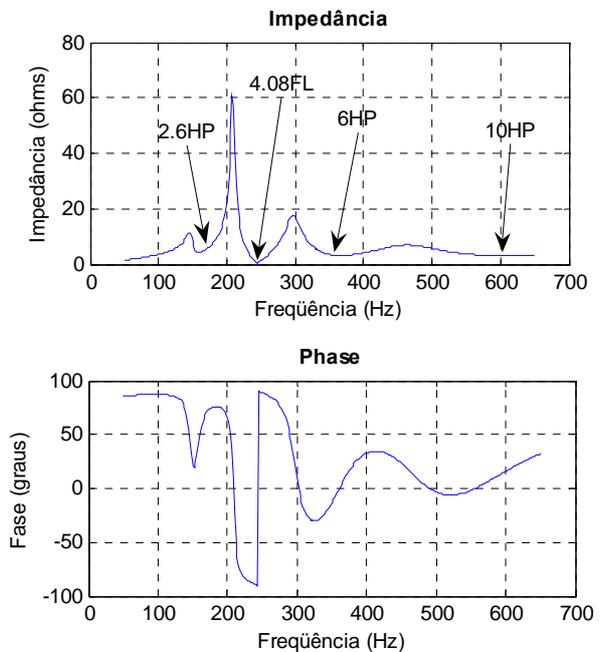
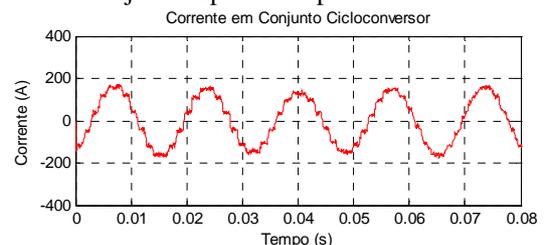


Figura 6 – Resposta em freqüência do Filtro Harmônico instalado

#### B. Correntes no sistema

Na Figura 7 são apresentadas a corrente de entrada de um dos conjuntos Cicloconversores aplicados no sistema e o Espectro Harmônico relativo a esta corrente medida. Este espectro de corrente foi medido estando o conjunto específico operando.



(a)

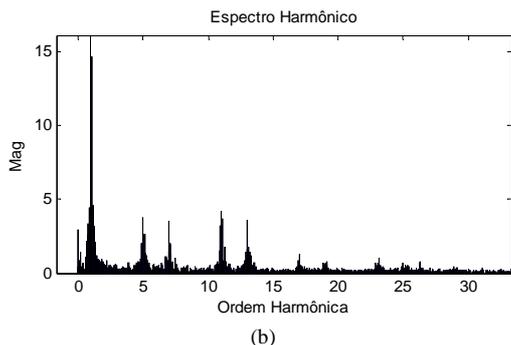


Figura 7 – (a) Corrente de entrada de um Conjunto Cicloconversor (Laminador Desbastador Superior). (b) Espectro da corrente medida.

A corrente de entrada do barramento principal, onde são alimentados todo o conjunto de Cicloconversores (composto de 8 conjuntos de Cicloconversores) e onde o Filtro Harmônico possui sua ação, foi medida e é apresentada na Figura 8a.

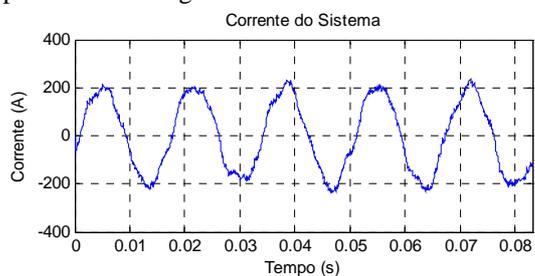


Fig.8a

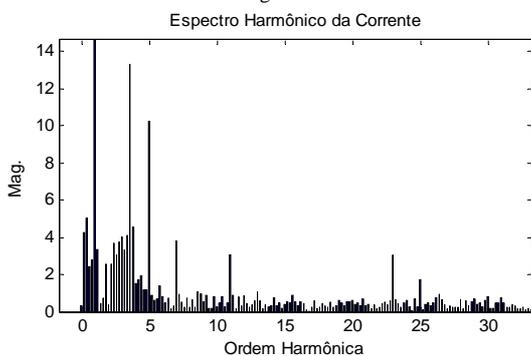


Fig.8b

Figura 8 – (a) Corrente de entrada do barramento de alimentação dos Cicloconversores e Filtro Harmônico. (b) Espectro da corrente medida.

Percebe-se que persiste algum conteúdo harmônico na corrente total do sistema. O esforço de filtragem passiva melhora significativamente a forma da corrente, mas o resultado pode ser melhorado com o emprego de outras técnicas. Estas técnicas permitem a atuação de forma pontual no sistema, evitando que compensações em grande escala e em outras áreas do sistema de distribuição, necessitem ser realizadas e evita ainda a propagação de efeitos indesejados no sistema de distribuição interno de energia da empresa. Presume-se que a utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem, permitirá um melhor desempenho do sistema sob análise, sendo esta avaliação o próximo passo do estudo.

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo sobre o contexto de compensação harmônica, aplicada em um Laminador de uma indústria Siderúrgica. Através de um modelo computacional, foi possível verificar a aderência das frequências projetadas para o filtro. Medições realizadas no sistema mostraram que, apesar de melhoria significativa na forma de onda da corrente, técnicas diferentes podem ser estudadas, que, em conjunto com o sistema existente, possam propor aumento ainda maior da performance de compensação de correntes harmônicas, evitando danos ao sistema de distribuição interno da planta.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE 519 (1992), *IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. .
- [2] S. Bhattacharya; D. Divan, "Active Filter Solution for Utility Interface", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp 2531-2540, 1995.
- [3] Y. Liu; G.T.H. Heydt, e R.F.Chu, "The Power Quality Impact of Cycloconverter Control Strategies", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.20, No2, Abril 2005, pp 1711-1718.
- [4] I . W. Hörger. "Aspects for Filter Design in Case of Cycloconverter Load", Power Quality 97 Conference, Nuremberg, Germany, June 10-12,1997.
- [5] K.H. Krüger, W. Schultz, C. Unger, R. Witzmann. "The Effects of Large Variable Speed Drives on the Quality of Power Distribution Networks". Second International Conference on Power Quality, 1992, Atlanta.
- [6] F.V.Assis. "Aspectos Gerais de Qualidade da Energia na Companhia Siderúrgica de Tubarão". Monografia do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos, UNIFEI, Maio de 2005.
- [7] IEEE Interharmonic Task Force. "Interharmonic in Power Systems". Cigré 36.05/CIRE2 2 CC02, Voltage Quality Working Group.

## VIII. BIOGRAFIA

**Célio Geraldo Ferreira** é Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Minas Gerais (2001) e aluno do Mestrado em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Espírito Santo. Desde 2002 trabalha como Especialista de Engenharia Elétrica e Eletrônica na empresa ArcelorMittal Tubarão. Seus temas de interesse incluem Eletrônica de Potência, Sistemas Elétricos de Potência, Qualidade e Gestão da Energia, Energias Renováveis.

**Domingos Sávio Lyrio Simonetti** é Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Espírito Santo em 01/1984, tendo o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1987 e Doutor Engenheiro Industrial pela Universidade Politécnica de Madri em 1995. Desde 1984 é professor no Dep. Eng. Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo. Foi presidente da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) na gestão 2002-2004. Seus temas de interesse incluem Qualidade de Energia, Eletrônica de

Potência, Energias Renováveis e Aplicações de Supercondutores.

**Gilberto Costa Drumond Sousa**, nascido em 05/10/1958 em Faria Lemos, MG, é engenheiro eletricista (1982) pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Mestre em Engenharia Elétrica (1986) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e Ph.D. em Engenharia Elétrica (1993) pela Universidade do Tennessee, Knoxville, EUA.

Ele é professor titular da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde tem desenvolvido atividades de ensino, pesquisa e administração. É membro da SOBRAEP, e do IEEE – Industry Application Society.

Suas áreas de interesse de pesquisa compreendem controle fuzzy, máquinas e acionamentos elétricos, e qualidade de energia.