

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



**UMA PROPOSTA PARA O  
COMPARTILHAMENTO DAS  
RESPONSABILIDADES SOBRE AS  
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

**Sérgio Ferreira de Paula Silva**

**Uberlândia**  
**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**UMA PROPOSTA PARA O**  
**COMPARTILHAMENTO DAS**  
**RESPONSABILIDADES SOBRE AS**  
**DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Tese apresentada por Sérgio Ferreira de Paula Silva à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Doutor em Ciências aprovada em 31/10/2007 pela Banca Examinadora:

*José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU*

*Gilson Paulillo, Dr. - LACTEC*

*José Maria de Carvalho Filho, Dr. - UNIFEI*

*Antonio Carlos Delaiba, Dr. - UFU*

*Milton Itsuo Samesima, Dr. - UFU*

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S586p Silva, Sérgio Ferreira de Paula, 1973-  
Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as  
distorções harmônicas / Sérgio Ferreira de Paula Silva. - 2007.  
179 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I.  
Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

---

**UMA PROPOSTA PARA O  
COMPARTILHAMENTO DAS  
RESPONSABILIDADES SOBRE AS  
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

**Sérgio Ferreira de Paula Silva**

Tese apresentada por Sérgio Ferreira de Paula Silva à  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Doutor em Ciências.

---

*Prof. José Carlos de Oliveira, PhD*  
(Orientador) – UFU

---

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha esposa Kenia, e a meus pais Valtuir e Maria José, pela compreensão, dedicação e incentivo a mim dispensados, essenciais para o desenvolvimento e conclusão desta tese.*

---

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que através de seus exemplos e ensinamentos, me proporcionou estímulos para superar os momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. **José Carlos de Oliveira** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, colaboração, confiança e orientações dispensadas em todas as etapas constituintes deste trabalho.

Ao amigo **Prof. Antonio Carlos Delaiba** pelo inestimável, importante e constante apoio indispensável à conclusão desta tese.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para a conclusão desta tese.

À **Marli**, pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós-Graduação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

---

## RESUMO

A qualidade da energia elétrica se apresenta como uma área de grande interesse para os consumidores e concessionárias de energia. Buscando meios para regulamentar o assunto, reconhece-se, na atualidade, a existência de recomendações, normas e critérios nacionais e internacionais voltados para a orientação dos valores limites ou de referência para os diversos indicadores que caracterizam o padrão de qualidade desejado. Dentro deste contexto, as distorções harmônicas nos sinais de tensão e corrente surgem como uma das questões mais preocupantes. Almejando, pois a preservação da qualidade do suprimento no que tange às distorções harmônicas, assim como para os demais itens de definição da qualidade, faz-se, muitas vezes necessário, a utilização de técnicas para a identificação da responsabilidade entre fornecedores e consumidores quanto à presença de distorções harmônicas de tensão junto aos pontos de acoplamento comum das redes de suprimento. Focando este tema, esta tese encontra-se direcionada ao estabelecimento e avaliação de desempenho de um procedimento sistematizado para o compartilhamento das responsabilidades entre fornecedores e consumidores, quanto à presença de distorções harmônicas de tensão junto aos pontos de acoplamento comum entre as partes. A metodologia é fundamentada na análise de sinais de tensão e corrente, obtidos dos sistemas, e em informações associadas com as impedâncias harmônicas próprias aos sistemas elétricos envolvidos no processo. A questão da modelagem da carga é ressaltada de modo especial. O método almeja contribuir na direção do estabelecimento de medidas de compensação quando os valores limites das distorções são superiores àqueles previstos pela legislação. Finalmente, objetivando ilustrar a aplicabilidade da proposta, ensaios laboratoriais são realizados a fim de evidenciar sua potencialidade.

Palavras-Chave: Atribuição de responsabilidade, distorções harmônicas, modelagem de carga, normas e indicadores de qualidade, qualidade da energia.

---

# ABSTRACT

The quality of the electric energy emerges as an area of great interest to both consumers and supply authorities. Searching half the subject prescribed, it is recognized, in the present time, the national and international existence of recommendations, norms and criteria directed toward the orientation of the boundary-values or reference for the diverse pointers that characterize the desired standard of quality. Inside of this context, if a measured harmonic voltage distortion exceeds that which is permitted, mitigation procedures must be promptly considered. These procedures can cause great conflict between the supplier and the consumer due to a lack of consensus on who is the mainly responsible for the harmonic distortions. The objective of this study is to establish a just procedure for sharing the responsibility for actual harmonic voltage distortion at a given point of common coupling between the supplier and the consumer. The methodology is based on the analysis of measured voltage and current signals at the PCC and on information related to the harmonic impedances involved in the process. Both the supply and the load impedances are considered and an approach for coupling with consumer representation is presented. The method is applied to a laboratory arrangement which uses a programmable voltage source in combination with a load comprising linear and nonlinear components. The results highlight the consistence of the proposal when identifying the individual contribution of the supplier and the consumer. By finding the supply and load harmonic contributions it is possible to achieve fairer cost sharing when mitigation procedures are needed to reduce voltage distortion to admissible legislation limits.

Keywords: Harmonic distortions, responsibility attribution, load modelling, standards, Power Quality.

---

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XX</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>22</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>22</b>
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....	23
1.3 - ESTADO DA ARTE.....	29
1.4 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE .....	34
1.5 - ESTRUTURA DA TESE.....	35
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>38</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA O COMPARTILHAMENTO .....</b>	<b>38</b>
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	38
2.2 – TÉCNICA DE ANÁLISE .....	39
2.3 – MODELAGEM DO PAC.....	41
2.4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA – IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DEFINIDAS .....	46
a) <i>Caso 01</i> .....	49
b) <i>Caso 02</i> .....	51
c) <i>Caso 03</i> .....	54
2.5 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA – IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS INDEFINIDAS .....	57
a) <i>Caso 04</i> .....	58
b) <i>Caso 05</i> .....	60
c) <i>Caso 06</i> .....	61
2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>65</b>
<b>UMA PROPOSTA PARA A MODELAGEM DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DO CONSUMIDOR ..</b>	<b>65</b>
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65

---

3.2 – FUNDAMENTOS SOBRE A MODELAGEM DA CARGA.....	67
a) <i>Resistor</i> .....	71
b) <i>Capacitor</i> .....	73
c) <i>Indutor</i> .....	75
d) <i>Corrente Residual</i> .....	77
e) <i>Carga Equivalente</i> .....	77
3.3 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROPOSTA DE MODELAGEM DA CARGA.....	78
a) <i>Caso 01</i> .....	79
b) <i>Caso 02</i> .....	81
c) <i>Caso 03</i> .....	82
d) <i>Caso 04</i> .....	83
e) <i>Caso 05</i> .....	84
3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>86</b>
<b>APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA A ATRIBUIÇÃO DAS RESPONSABILIDADES .....</b>	<b>86</b>
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	86
4.2 – ESTRUTURA DO APLICATIVO.....	87
4.3 – MÓDULOS DO APLICATIVO ATRES .....	91
a) <i>Módulo de Importação</i> .....	91
b) <i>Módulo de Tratamento dos Dados</i> .....	93
c) <i>Módulo de Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções</i> .....	96
d) <i>Módulo de Resultados</i> .....	99
4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>106</b>
<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO.....</b>	<b>106</b>
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	106
5.2 – SISTEMA TESTE – MONTAGEM LABORATORIAL .....	107
5.2.1 – <i>Impedância Harmônica do Supridor</i> .....	111
5.2.2 – <i>Distorções Harmônicas Esperadas</i> .....	112
5.3 – ENSAIOS LABORATORIAIS.....	115

---

<i>a) Caso 01</i> .....	116
<i>b) Caso 02</i> .....	120
<i>c) Caso 03</i> .....	126
<i>d) Caso 04</i> .....	133
<i>e) Caso 05</i> .....	139
<i>f) Caso 06</i> .....	144
<i>g) Caso 07</i> .....	147
5.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM UM SISTEMA REAL .....	151
<i>a) Diagrama unifilar simplificado</i> .....	152
<i>b) Impedância Harmônica da Concessionária</i> .....	152
<i>c) Distorções Harmônicas Medidas no PAC</i> .....	154
<i>d) Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas</i> .....	159
<i>Comentários:</i> .....	163
5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	168
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	<b>170</b>
<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>170</b>
<b>CAPÍTULO VII</b> .....	<b>175</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>175</b>

---

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não linear .....	24
Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier .....	25
Figura 1.3 - Tensão distorcida por uma carga não-linear.....	25
Figura 1.4 – O problema da separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas. ....	28
Figura 2.1 – Configuração do PAC do ponto de vista de harmônicos. ....	41
Figura 2.2 – Modelagem nodal do PAC.....	43
Figura 2.3 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da superposição. ....	44
Figura 2.4 – Diagrama unifilar do sistema teste – Caso 03.....	48
Figura 2.5 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 01. ....	50
Figura 2.6 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 02. ....	52
Figura 2.7 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 03. ....	55
Figura 3.1 – Proposta de modelagem utilizada para o consumidor. ....	69
Figura 3.2 – Circuito equivalente reestruturado. ....	70
Figura 3.3 – Diagrama unifilar do sistema teste – Caso 03.....	79
Figura 4.1 – Esquema simplificado da estrutura do aplicativo ATRES.....	88
Figura 4.2 – Exemplo de Arquivo texto exportado por [38]. ....	92
Figura 4.3 – Tela de tratamento dos dados de medição. ....	94
Figura 4.4 – Entrada de dados da impedância da concessionária. ....	96
Figura 4.5 – Fluxograma de cálculo do resistor equivalente do consumidor. ....	97
Figura 4.6 – Fluxograma de cálculo do capacitor equivalente do consumidor.....	98
Figura 4.7 – Tela de registros das tensões medidas - Tabelas. ....	100

---

Figura 4.8 – Tela de registros das tensões medidas - Gráficos.....	100
Figura 4.9 – Tela de registros das tensões – Gráfico de forma de onda.....	101
Figura 4.10 – Tela de registros das tensões – Gráfico de espectro harmônico.....	102
Figura 4.11 – Tela de registros das correntes – Gráfico tendência da distorção harmônica total de corrente.....	102
Figura 4.12 – Tela de registros das potências – Tabela dos valores totais.....	103
Figura 4.13 – Tela de registros das potências – Gráfico de tendência do fator de potência total.....	104
Figura 5.1 – Arranjo físico utilizado para os testes de desempenho.....	107
Figura 5.2 – Fonte de tensão utilizada nos ensaios.....	108
Figura 5.3 – Curva de saturação da indutância da carga.....	109
Figura 5.4 – Foto do indutor representativo da impedância da concessionária e do equipamento de medição.....	110
Figura 5.5 – Foto do retificador com suas cargas (resistiva e capacitiva).....	110
Figura 5.6 – Foto das cargas lineares do consumidor.....	111
Figura 5.7 – Curva impedância x frequência do indutor representativo da concessionária.....	112
Figura 5.8 – Circuito equivalente para cálculo das tensões harmônicas exclusivas do consumidor....	113
Figura 5.9 – Curva impedância x frequência da impedância de barra do PAC.....	114
Figura 5.10 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.....	117
Figura 5.11 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.....	118
Figura 5.12 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 01.....	120
Figura 5.13 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.....	122
Figura 5.14 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.....	123

---

Figura 5.15 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 02.....	124
Figura 5.16 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 02. ....	125
Figura 5.17 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03. ....	128
Figura 5.18 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03.....	129
Figura 5.19 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 03.....	130
Figura 5.20 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 03. ....	131
Figura 5.21 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04. ....	134
Figura 5.22 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04.....	135
Figura 5.23 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 04.....	136
Figura 5.24 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04. ....	137
Figura 5.25 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05. ....	140
Figura 5.26 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05.....	141
Figura 5.27 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 05.....	142
Figura 5.28 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04. ....	143

---

Figura 5.29 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06.....	145
Figura 5.30 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06. ....	146
Figura 5.31 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 06.....	147
Figura 5.32 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07.....	148
Figura 5.33 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07. ....	149
Figura 5.34 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 07.....	150
Figura 5.35 – Diagrama unifilar simplificado do complexo elétrico escolhido.....	152
Figura 5.36 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Módulo.....	153
Figura 5.37 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Ângulo. ....	153
Figura 5.38 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão.....	154
Figura 5.39 – Perfil das distorções harmônicas totais de corrente. ....	155
Figura 5.40 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem .....	156
Figura 5.41 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem .....	156
Figura 5.42 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem .....	156
Figura 5.43 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 3ª ordem.....	158
Figura 5.44 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 5ª ordem.....	158
Figura 5.45 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 7ª ordem.....	158
Figura 5.46 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Consumidor.....	160
Figura 5.47 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Concessionária. ....	160
Figura 5.48 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Consumidor.....	161
Figura 5.49 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Concessionária. ....	161
Figura 5.50 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Consumidor.....	162
Figura 5.51 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Concessionária. ....	162
Figura 5.52 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Consumidor.....	163
Figura 5.53 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Concessionária. ....	163

---

Figura 5.54 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 3 resultantes para o consumidor e para a concessionária. ....	164
Figura 5.55 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 5 resultantes para o consumidor e para a concessionária. ....	165
Figura 5.56 – Perfil das distorções harmônicas individuais de 7ª ordem no barramento de 88 [kV]. .	166
Figura 5.57 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 7 resultantes para o consumidor e para a concessionária. ....	166
Figura 5.58 – Comparação entre as distorções harmônicas totais resultantes para o consumidor e para a concessionária. ....	167

---

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental [3]. .....	49
Tabela 2.2 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 01.....	50
Tabela 2.3 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Caso 01 .....	51
Tabela 2.4 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 02.....	53
Tabela 2.5 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Caso 02. ....	53
Tabela 2.6 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 03.....	55
Tabela 2.7 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Condição 3.....	56
Tabela 2.8 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 04.....	58
Tabela 2.9 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 05.....	60
Tabela 2.10 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 06.....	61
Tabela 3.1 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 01 .....	79
Tabela 3.2 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Condição 1 .....	80
Tabela 3.3 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 02 .....	81
Tabela 3.4 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Caso 02.....	81
Tabela 3.5 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 03 .....	82
Tabela 3.6 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Caso 03.....	82
Tabela 3.7 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 04 .....	83

---

Tabela 3.8 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 05 .....	84
Tabela 5.1 – Descrição dos casos selecionados. ....	115
Tabela 5.2 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 01.....	119
Tabela 5.3 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 02.....	124
Tabela 5.4 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 03.....	130
Tabela 5.5 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 04.....	136
Tabela 5.6 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 05.....	142
Tabela 5.7 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 06.....	146
Tabela 5.8 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 07.....	149
Tabela 5.9 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões.....	155
Tabela 5.10 – Valores estatísticos das distorções totais das correntes. ....	155
Tabela 5.11 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem.....	157
Tabela 5.12 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem.....	157
Tabela 5.13 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem.....	157
Tabela 5.14 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 3ª ordem.....	158
Tabela 5.15 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 5ª ordem.....	158
Tabela 5.16 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 7ª ordem.....	159
Tabela 5.17 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Consumidor. ....	160
Tabela 5.18 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Concessionária.....	160
Tabela 5.19 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Consumidor.	161
Tabela 5.20 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Concessionária. .....	161
Tabela 5.21 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Consumidor.	162
Tabela 5.22 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Concessionária. .....	162
Tabela 5.23 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem - Consumidor.	163

---

Tabela 5.24 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7<sup>a</sup> ordem - Concessionária.

.....163



# LISTA DE SÍMBOLOS

C	- elemento capacitivo equivalente
DIHT	- distorção de corrente harmônica total [%]
DTHT	- distorção de tensão harmônica total [%]
$i_c(t)$	- corrente conforme
$i_h$	- corrente harmônica de ordem h [A]
$i_{nc}(t)$	- corrente não-conforme
$i_m(t)$	- corrente medida
$i_l$	- corrente fundamental [A]
$i(t)$	- corrente elétrica [A]
$i_{cap}(t)$	- corrente no componente capacitivo
$i_{ind}(t)$	- corrente no componente indutivo
$i_k(t)$	- corrente residual ou corrente representativa do conjunto de cargas não lineares
$i_{lk}(t)$	- composição das correntes no indutor e residual
$i_{lck}(t)$	- composição das correntes no indutor, capacitor e residual
$i_r(t)$	- corrente no componente resistivo
$\dot{I}_h^r$	- corrente harmônica de ordem h calculada para o resistor
$I_h$	- corrente harmônica de ordem h
$I_l$	- amplitude de onda da corrente fundamental
$\dot{I}_h$	- fasor corrente harmônica de ordem h
$\dot{I}_h^c$	- corrente harmônica resultante das cargas não-lineares do consumidor
$\dot{I}_h^{c-pac}$	- contribuição do consumidor para a corrente medida
$\dot{I}_h^m$	- corrente harmônica medida no PAC
$\dot{I}_h^s$	- corrente harmônica de ordem h, proveniente do sistema supridor
$\dot{I}_h^{s-pac}$	- contribuição da concessionária para a corrente medida no PAC
L	- elemento indutivo equivalente
$L_S$	- indutância do sistema de suprimento [mH]
$N$	- ordem harmônica máxima
PAC	- ponto de acoplamento comum entre concessionária e consumidor
$P_h$	- potência harmônica ativa de ordem h
R	- resistência representativa do consumo de potência ativa do consumidor, envolvendo as cargas lineares e não-lineares
$R_S$	- resistência do sistema de suprimento [ $\Omega$ ]
$v_h$	- tensão harmônica de ordem h [V]

---

$v(t)$	- tensão aplicada [V]
$v_1$	- tensão fundamental [V]
$V_h$	- amplitude de onda da tensão de ordem harmônica $h$
$V_1$	- amplitude de onda da tensão fundamental
$\dot{V}_h$	- fasor tensão harmônica de ordem $h$
$\dot{V}_h^c$	- tensão harmônica de ordem $h$ , devida ao consumidor
$\dot{V}_h^m$	- tensão harmônica de ordem $h$ , medida no PAC
$\dot{V}_h^s$	- tensão harmônica de ordem $h$ , devida ao supridor (concessionária)
$V_h$	- tensão eficaz de ordem $h$
$\dot{Z}_h^s$	- impedância harmônica equivalente da concessionária
$\dot{Z}_h^c$	- impedância harmônica equivalente do consumidor
$\Theta$	- defasagem angular de tensão
$\emptyset$	- defasagem angular da corrente
$\theta_h$	- defasagem angular entre a tensão e corrente de ordem $h$
$\Re$	- representa a parte real do complexo
*	- representa o conjugado do complexo.

---

---

# CAPÍTULO I

---

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

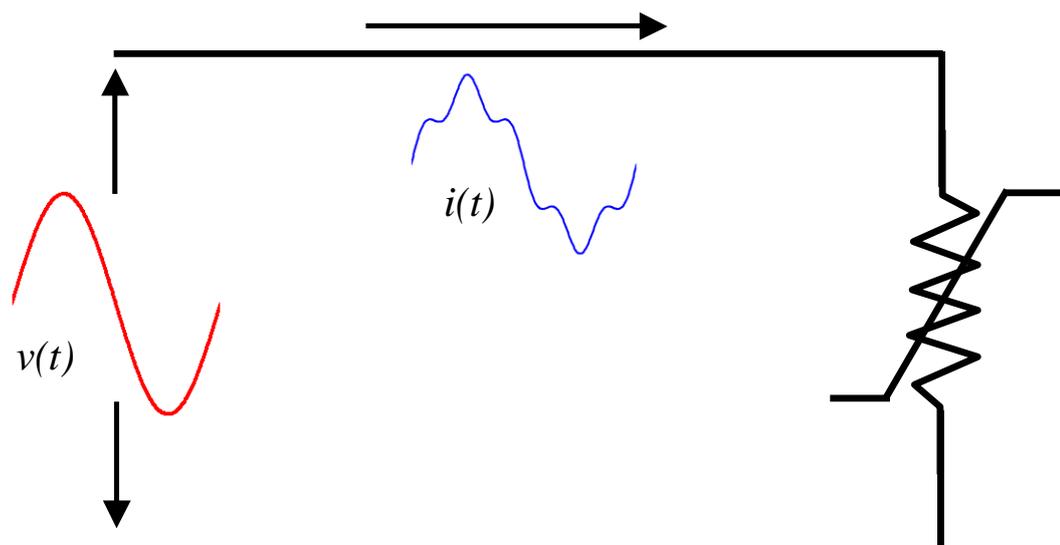
O tema “Qualidade da Energia Elétrica” está pautado em uma gama de indicadores relacionados às características do suprimento elétrico oferecido aos consumidores. De fato, os distintos fenômenos atrelados à área [1] e que determinam desvios ou perda da qualidade da energia podem acarretar grandes transtornos com conseqüentes prejuízos aos diversos grupos de consumidores sujeitos a tais condições, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais. Estes, devido principalmente às questões financeiras decorrentes deste fornecimento não condizente com os padrões esperados de operação e, atualmente, antenados com os direitos inerentes a todos os consumidores, já não ignoram que a energia elétrica ofertada pelas concessionárias deva atender aos requisitos mínimos estabelecidos pela legislação vigente ou mesmo pelo contrato de fornecimento firmado entre as partes. O assunto, todavia, não fica restrito ao mercado consumidor visto que, as concessionárias de eletricidade também têm se preocupado com os problemas relacionados à qualidade da energia. Não obstante às regras e padrões estabelecidos em legislação, atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança é de fundamental importância em um mercado competitivo, exigente e em crescente expansão.

Preocupados com a possibilidade de queda na produção de seus insumos por falha ou operação indevida de seus equipamentos elétricos, os problemas de qualidade da energia tornaram-se abundantes no vocabulário dos consumidores. Associada a esta apreensão está o crescente interesse por normas ou documentos orientativos que estabeleçam, através de legislação própria, os padrões mínimos de suprimento e as sanções aplicáveis quando os valores de referência não forem obedecidos.

Dentro do contexto da qualidade da energia elétrica encontram-se os fenômenos pertinentes às distorções harmônicas e o impacto das mesmas sobre os padrões de fornecimento de energia elétrica. Esta questão, aliada à polêmica identificação de suas fontes geradoras, constitui-se objeto da presente tese de doutorado.

## **1.2 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA**

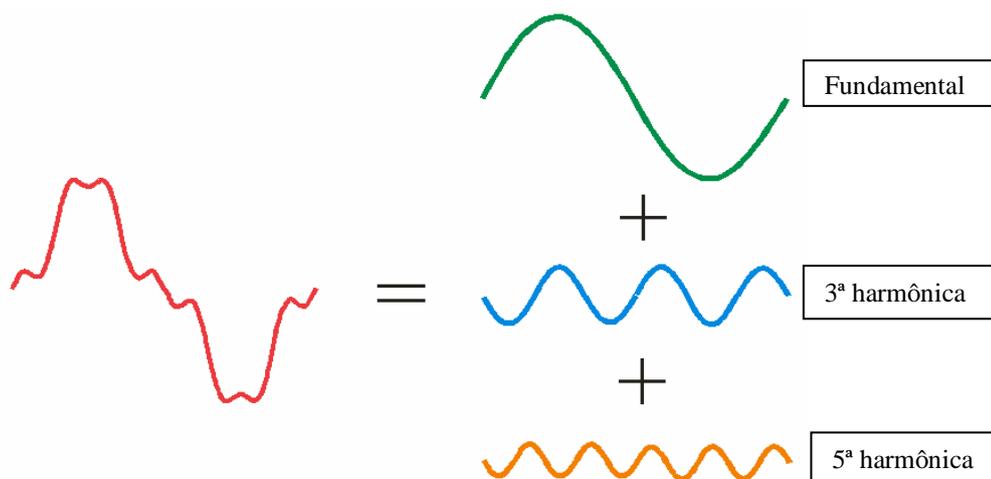
Dentre os distúrbios e a qualificação de um padrão de qualidade da energia, a subárea **DISTORÇÕES HARMÔNICAS** encontra-se numa posição de destaque. As tensões de suprimento das instalações consumidoras devem, em tese, ser perfeitamente senoidais. No entanto, esta condição ideal jamais será encontrada na prática, visto que, o emprego de dispositivos com características “não-lineares” nos sistemas elétricos de potência é um processo crescente e de caráter irreversível. A designação de “não-linear”, sob o ponto de vista de harmônicos em sistemas elétricos de potência, deve ser entendida como toda e qualquer carga para qual a correlação entre a tensão e a corrente não obedece a formas de onda similares. A figura 1.1 apresenta o caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não-linear. Como se vê, muito embora a forma de onda da tensão seja senoidal, a respectiva corrente não atende ao mesmo padrão.



*Figura 1.1 - Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não linear*

Normalmente, esta propriedade é característica dos dispositivos eletrônicos, mas não restrita aos mesmos. Assim, além de cargas tipicamente eletrônicas, como acionamentos de velocidade variável, retificadores e lâmpadas compactas, também possuem formas de onda de tensão e correntes distintas, os fornos e soldas a arco, reatores saturados, dentre outros.

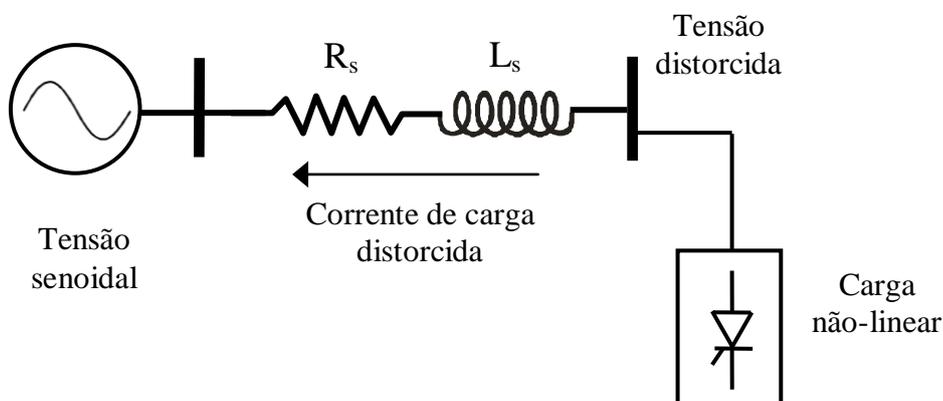
Classicamente, é sabido que uma onda não-senoidal pode ser representada como um somatório de ondas puramente senoidais de frequências múltiplas inteiras da onda original. Esta decomposição é realizada por meio da Serie de Fourier [2], resultando em uma componente com a mesma frequência da tensão aplicada, comumente denominada de “componente fundamental”, sendo as demais conhecidas por “componentes harmônicas” ou simplesmente, harmônicas. A título de visualização, a essência desta base matemática é ilustrada pela figura 1.2.



*Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier*

A grande vantagem da utilização desta técnica matemática é que, em sistemas lineares, cada componente harmônica pode ser considerada separadamente e a distorção final determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

A conexão de uma carga não-linear à rede elétrica proporciona a circulação de uma corrente, que se apresentará sob uma forma de onda não-senoidal, ou seja, contendo componentes harmônicas. Deste modo, normalmente, a distorção harmônica de tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância do sistema elétrico. Para cada frequência harmônica da corrente, há uma tensão de mesma frequência, resultando, desta forma, na distorção da forma de onda da tensão. A figura 1.3 ilustra esta situação.



*Figura 1.3 - Tensão distorcida por uma carga não-linear.*

A magnitude da distorção da tensão depende, basicamente, da impedância equivalente vista pela carga não-linear e da corrente harmônica gerada pela mesma. Deve-se reconhecer que a carga não exerce controle sobre os níveis de distorção de tensão. Conseqüentemente, uma mesma carga poderá resultar em distorções de tensão diferentes, dependendo da sua localização no sistema elétrico.

Definições amplamente empregadas na área de qualidade da energia são utilizadas como forma de quantificar a presença de distorções harmônicas nos sinais de tensões e/ou correntes. Uma delas é a denominada “distorção harmônica total”, sendo esta uma das designações mais utilizadas no meio técnico/científico. Utilizando convenções adotadas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro) [3] têm-se as equações (1.1) e (1.2) sintetizando tais definições:

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h>2}^{hmáx} V_h^2} \quad (1.1)$$

$$DIHT = \sqrt{\sum_{h>2}^{hmáx} I_h^2} \quad (1.2)$$

- Onde: DTHT – distorção de tensão harmônica total [%];  
DIHT – distorção de corrente harmônica total [%];  
 $V_h = \frac{v_h}{v_1} \cdot 100$  – tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];  
 $v_h$  – tensão harmônica de ordem h [V];  
 $v_1$  – tensão fundamental, nominal ou de referência[V];  
 $I_h = \frac{i_h}{i_1} \cdot 100$  – corrente harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];  
 $i_h$  – corrente harmônica de ordem h [A];  
 $i_1$  – corrente fundamental, nominal ou de referência [A].

As grandezas  $V_h$  e  $I_h$  da maneira como foram apresentadas também são conhecidas, respectivamente, como índices ou identificadores individuais de tensão e corrente harmônica.

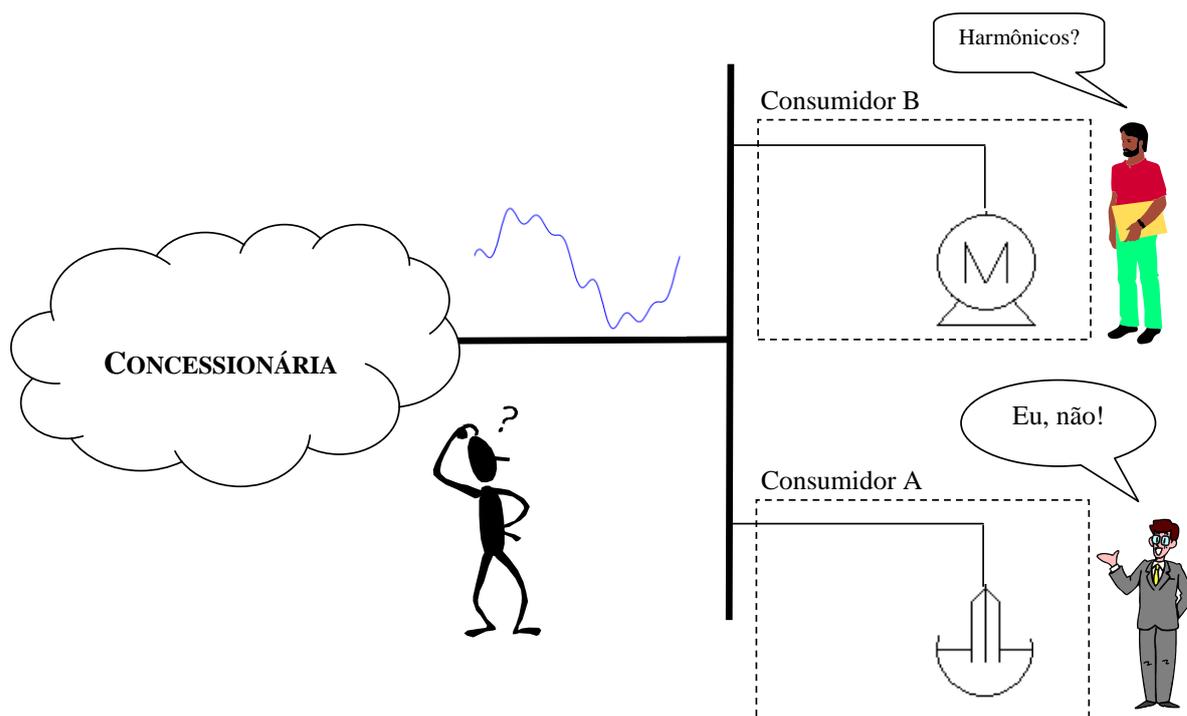
Tendo em vista os efeitos negativos causados pelas distorções harmônicas de tensão e/ou corrente nos sistemas elétricos de potência, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [4], que se encontra em fase de discussão e aprimoramento, vêm definindo valores máximos para as distorções harmônicas de tensão na rede de distribuição. Somado a este documento, há de se reconhecer também, no contexto da rede básica nacional, a existência das diretrizes estabelecidas no Procedimento de Rede – Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica [3]. Existem também normas e recomendações internacionais, dentre elas destacam-se a IEC 61000-3-6 [5] e a IEEE 519 [6]. Estes documentos e outros não destacados no texto, de um modo global, primam pela definição de valores de referência para os indicadores das distorções totais e individuais, sem, todavia, entrar no mérito da origem das mesmas. Nestes termos, uma vez constatada uma violação dos limites estabelecidos e definida a necessidade de implementação de uma sistemática de mitigação dos efeitos, surge a questão vinculada com a responsabilidade financeira associada ao processo de adequação a ser implementado em campo. Inserido neste contexto situa-se o tema “compartilhamento de responsabilidade”, o qual consiste no cerne desta tese.

Neste particular, é importante destacar que várias pesquisas e publicações têm sido realizadas com vistas à identificação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas. Estas, de um modo geral, procuram identificar a principal fonte das distorções, não se preocupando, de forma direta, em estabelecer procedimentos para a separação das parcelas de contribuição referentes ao consumidor e a concessionária.

Diante desta conjuntura e devido à ausência de consenso sobre o tema, há margem para conflitos entre a concessionária e o consumidor. Dentro deste contexto, a presente tese tem

por intuito propor um primeiro encaminhamento para a solução da questão da atribuição de responsabilidade pelas distorções harmônicas de tensão entre as partes aqui consideradas.

A figura 1.4 ilustra uma situação típica de um sistema elétrico composto por diferentes tipos de cargas e consumidores e destaca os questionamentos feitos pelas partes envolvidas no processo.



*Figura 1.4 – O problema da separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.*

Considerando que a concessionária está suprindo somente os consumidores A e B, ao identificar uma violação dos limites de distorções harmônicas de tensão no barramento de alimentação de ambos: qual consumidor é responsável pela deteriorização da qualidade da energia? Este caso evidencia a necessidade de procedimentos sistematizados de identificação e atribuição de responsabilidade sobre as distorções, culminando na correta aplicação da legislação e, se for o caso, da penalização cabível.

### **1.3 - ESTADO DA ARTE**

O tema “compartilhamento de responsabilidade sobre harmônicos” não encontra citações diretas nos levantamentos bibliográficos executados. No entanto, várias pesquisas e publicações examinadas têm como escopo assuntos passíveis de relacionamento a esta questão.

O princípio do fluxo da potência, além de presente na literatura internacional [7], [8] e [9], é utilizado por diversos fabricantes de equipamentos de medição de harmônicos, como, por exemplo, em [10]. Esta metodologia está alicerçada na análise da direcionalidade do fluxo de potência harmônica ativa na rede e sua correlação com o fluxo da potência fundamental. A equação (1.3) destaca o procedimento utilizado para o cálculo da potência harmônica ativa para uma determinada ordem harmônica  $h$ .

$$P_h = \Re \left( \dot{V}_h \cdot \dot{I}_h^* \right) \quad (1.3)$$

Sendo:  $P_h$  – potência harmônica ativa de ordem  $h$ ;

$\Re$  – representa a parte real do complexo;

$\dot{V}_h$  – fasor tensão harmônica de ordem  $h$ ;

$\dot{I}_h$  – fasor corrente harmônica de ordem  $h$ ;

\*

De acordo com [7], a qual apresenta os princípios do método da potência harmônica, constata-se que, uma vez obtida a tensão e a corrente do sistema junto ao ponto de acoplamento comum entre a concessionária e o consumidor (PAC), as mesmas podem ser decompostas através da série de Fourier. A partir do conhecimento das componentes harmônicas individuais, o procedimento para se determinar o fluxo da potência harmônica e a

característica da carga (geradora ou receptora) para uma determinada ordem harmônica é o que segue:

- Primeiramente, calcula-se a potência harmônica fundamental observando o seu sinal, o qual é adotado como positivo, na ausência de geração interna do consumidor;
- No que tange às componentes harmônicas de tensão e de corrente de mesma ordem, deve-se determinar a respectiva diferença angular ou de fases ( $\alpha_h$ ). Esta grandeza é essencial para a atribuição da direcionalidade do fluxo harmônico e consiste num dos pilares do método;
- A partir da referência tomada como sendo o sinal da potência fundamental, através de princípios da teoria de circuitos tem-se que se:

$\alpha_h < 90^\circ$ : o consumidor estaria predominantemente atuando como receptor da ordem harmônica sob consideração. Nestas circunstâncias a potência harmônica calculada será também positiva;

$\alpha_h > 90^\circ$ : o consumidor atua, predominantemente, como gerador da ordem harmônica sob enfoque e a potência harmônica assim calculada receberia um sinal contrário ao da fundamental.

Apesar de o presente método ser o mais simples e difundido procedimento para a atribuição da fonte dominante no processo das distorções harmônicas, existem várias críticas levantadas contra a sua aplicação. Em [7] e outras fontes são destacados os seguintes pontos:

- A precisão na investigação do fluxo da potência harmônica ativa é dificultada quando  $\alpha_h \approx 90^\circ$ ;
- Os baixos níveis de distorções, em particular das tensões harmônicas podem dificultar as medições e precisões dos resultados;

- Erros advindos dos sensores de medição (transformadores de corrente e tensão) podem comprometer os resultados de forma decisiva.

Observa-se que esta metodologia não separa as parcelas de responsabilidade, simplesmente indica o sentido do fluxo de potência harmônica ativa. Aliada a esta dificuldade, a referência [9] aponta fragilidades no método.

Não obstante às observações anteriores, vale ressaltar que na atualidade ainda se encontram trabalhos que têm por meta resgatar a metodologia da potência harmônica [11]. Em sua maioria, os artigos relacionados a este tema geralmente propõem procedimentos alternativos, tal como já referenciado em [7], que sugere o cálculo instantâneo da potência ativa. Em [12], sugere-se a substituição dos cálculos das potências ativas pelas potências reativas.

Uma segunda metodologia definida por “corrente conforme e não-conforme” [13], [14], [15] e [16], fundamenta-se num princípio físico em que a corrente total que se estabelece entre a fonte de suprimento e a carga pode ser subdividida em duas parcelas. Uma denominada por “corrente conforme”, que está em total consonância com as condições impostas pela tensão de suprimento, e outra, convencionada por “corrente não-conforme”, que está associada com a natureza da carga suprida. Estas publicações, em sua essência, consideram que as cargas do consumidor podem ser divididas em duas categorias:

**Grupo I** - que não produzem distorções adicionais àquelas já presentes na fonte de tensão de suprimento e;

**Grupo II** - que produzem distorções adicionais àquelas originalmente presentes na tensão de suprimento.

Ainda como hipótese simplificadora, a mencionada referência destaca que as cargas do Grupo I possuem a mesma impedância para todas as frequências sob avaliação. Esta condição se mostra bastante conflitante com os fundamentos elétricos quando a carga se apresenta com

elementos indutivos e capacitivos. Nestes termos e através da análise de circuitos elétricos, o autor propõe as seguintes equações referentes às correntes conforme e não-conforme:

$$i_c(t) = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \frac{I_1}{V_1} \cdot V_h \cdot \text{sen} [\omega_1 \cdot h \cdot t + \theta_h + h \cdot (\phi_1 - \theta_1)] \quad (1.4)$$

$$i_{nc}(t) = i(t) - i_c(t) \quad (1.5)$$

Sendo:  $i_c(t)$  – corrente conforme;

$i_{nc}(t)$  – corrente não-conforme;

$i(t)$  – corrente medida;

$V_h$  – amplitude de onda da tensão de ordem harmônica h;

$V_1$  – amplitude de onda da tensão fundamental;

$I_1$  – amplitude de onda da corrente fundamental;

$\Theta$  – defasagem angular de tensão;

$\emptyset$  – defasagem angular da corrente.

Nota-se que as componentes harmônicas da corrente conforme possuem a mesma proporção da razão da corrente fundamental pela tensão fundamental.

A fragilidade do método já se faz sentir no momento em que se estabelece que, para qualquer frequência, a correlação entre as denominadas grandezas harmônicas conformes é definida através de uma grandeza complexa constante. Ora, é amplamente sabido que tal hipótese é inconsistente com os princípios que regem o funcionamento dos circuitos elétricos em seus princípios.

A análise de circuitos elétricos lineares através do critério da superposição consiste na base teórica das publicações [17], [18], [19] e [20]. Esta abordagem, comum ao engenheiro eletricitista, também é utilizada no presente trabalho. Desta forma, todo o detalhamento, fundamentação matemática, análise computacional e de desempenho é objeto do próximo capítulo desta tese, motivo pelo qual o assunto não é pormenorizado nesta etapa.

Em adição às metodologias mencionadas, existem também outros estudos embasados, dentre eles:

- Modelagem de cargas [21] e [22];
- Redes neurais [23] e [24];
- Estimação de estado com filtro de Kalman [25] e [26].

De um modo geral, estas publicações procuram identificar tão somente a origem da principal fonte de distorções, não se preocupando, de forma direta, em estabelecer procedimentos para a determinação das distorções harmônicas de tensão provenientes da concessionária daquelas resultantes da atuação das cargas não-lineares presentes no complexo elétrico do consumidor.

Na literatura nacional, até o momento, muito pouco foi produzido neste sentido. Os trabalhos [27],[28] e [29] são decorrentes da presente tese, enquanto que [30] utiliza técnicas de estimação de estado com filtro de Kalman.

Buscando, pois, alternativas para as metodologias apresentadas, surge esta tese, a qual, através de medições da tensão e corrente no ponto de acoplamento e, em complemento aos trabalhos realizados em [31], procura estabelecer procedimentos de cálculo fundamentados na modelagem de cargas em condições não senoidais e nas técnicas de superposição para análise de circuitos elétricos. Em decorrência dos procedimentos e análises emanam propostas de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão entre a concessionária e o consumidor.

## **1.4 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE**

Uma vez contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e os desenvolvimentos da presente pesquisa, vale ressaltar que os trabalhos aqui focados oferecem as seguintes contribuições direcionadas ao estudo dos métodos de atribuição de responsabilidade na questão das distorções harmônicas:

- Modelagem da carga equivalente do consumidor em condições não senoidais através de sinais de tensão e corrente oriundos de medições em campo;
- Estabelecimento de um procedimento de separação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas, fundamentado em medições de tensão e corrente;
- Determinação da impedância equivalente do consumidor e do sistema supridor para fins de utilização na atribuição de responsabilidade sobre as distorções através do chaveamento de uma carga conhecida;
- Validação experimental através de montagens laboratoriais utilizando combinações de elementos lineares e não-lineares, focando o funcionamento e a eficácia das propostas sob diferentes condições operacionais;
- Aplicação da metodologia de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas em um sistema real;
- Caracterização dos fatores de influência que determinam a eficácia das metodologias propostas, destacando seus aspectos positivos e negativos.

## **1.5 - ESTRUTURA DA TESE**

Diante das propostas anteriormente mencionadas, além do presente capítulo introdutório, a tese será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

### **Capítulo II – Fundamentação do procedimento para o compartilhamento**

Este capítulo encontra-se direcionado à avaliação do ponto de acoplamento comum entre a concessionária e o consumidor através da modelagem dos equivalentes de ambas as partes no domínio da frequência e a utilização de técnicas de análise de circuitos elétricos, além de simulações computacionais para validação dos desenvolvimentos.

### **Capítulo III – Modelagem da carga equivalente do consumidor**

Tendo em vista a necessidade de conhecimento da carga equivalente do consumidor, neste capítulo é apresentado um modelo matemático para cálculo da impedância equivalente do consumidor, permitindo a utilização das formulações indicadas no capítulo anterior. Novamente, avaliações computacionais são executadas de forma a validar o procedimento proposto.

### **Capítulo IV – Aplicativo Computacional para a Atribuição das Responsabilidades**

A integração da metodologia proposta nos capítulos anteriores com os dados advindos de um instrumento de medição de harmônicos constitui o foco principal deste capítulo. Para tanto, é apresentada uma estrutura

computacional direcionada ao tratamento dos dados de campo, entrada de dados externos e publicação dos resultados, sistematizando o processo de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

## **Capítulo V – Aplicação da Metodologia e Análise de Desempenho**

Este capítulo contempla investigações laboratoriais das propostas de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Através de um sistema teste, contendo cargas lineares e não-lineares, são realizados ensaios com diferentes valores de distorções harmônicas provenientes do sistema supridor. A tensão e a corrente no PAC são monitoradas por um instrumento de medição comercial e os dados obtidos são tratados e utilizados na determinação das parcelas de responsabilidade. Em complemento aos experimentos laboratoriais, a metodologia também é aplicada em um sistema real, sendo a separação das distorções harmônicas calculadas pela ferramenta computacional desenvolvida no capítulo anterior.

## **Capítulo VI – Conclusões finais**

Este capítulo sintetiza as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais, bem como aponta para as fragilidades e adequabilidades dos processos de cálculo desenvolvidos e avaliados. Além disso, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros para fins de se obter, com base em critérios técnicos e científicos, as parcelas de responsabilidade de supridores e consumidores no que tange à questão das distorções harmônicas.

## **Capítulo VII – Referências bibliográficas**

Por fim, este capítulo condensa o material bibliográfico utilizado no desenvolvimento da tese.

---

## CAPÍTULO II

---

# FUNDAMENTAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA O COMPARTILHAMENTO

### 2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A aplicação de qualquer procedimento de identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, implica, necessariamente, na definição de um ponto limite de atuação da concessionária e do consumidor, ou seja, o divisor entre os sistemas elétricos das referidas partes.

Segundo a CEMIG [32], o ponto até o qual a concessionária se obriga a fornecer energia elétrica de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ANEEL, com participação nos investimentos necessários, bem como responsabilizando-se pela execução dos serviços de operação e manutenção do sistema, é definido por Ponto de Entrega. Todavia, o local da instalação dos medidores ou sensores de tensão e de corrente pode ser distinto. Assim, para efeito do presente trabalho, o ponto de instalação dos sistemas de medição corresponde ao ponto de acoplamento comum (PAC) entre a concessionária e o consumidor, sendo, portanto, utilizado como ponto de partida para todas as análises e ponderações a respeito da procedência das distorções harmônicas.

A partir deste conceito, os desenvolvimentos deste capítulo encontram-se centrados nos procedimentos matemáticos próprios ao estabelecimento dos princípios fundamentais para a separação das contribuições advindas do supridor e do consumidor. Vale, todavia, ressaltar que, no presente estágio dos trabalhos, admitir-se-ão conhecidas as impedâncias das partes, as quais serão merecedoras de maiores considerações nos capítulos posteriores.

Nestes termos, os temas tratados nesta unidade da tese compreenderão:

- Estabelecimento da técnica de análise adequada à avaliação das distorções harmônicas;
- Modelagem matemática do PAC;
- Avaliação computacional de desempenho da metodologia.

## **2.2 – TÉCNICA DE ANÁLISE**

Muito embora, por natureza, os sistemas elétricos de potência apresentam características fortemente dinâmicas, estes podem ser subdivididos em intervalos bem definidos de tempo, para os quais suas características de regime são praticamente inalteradas. Para cada uma destas regiões, as equações diferenciais representativas desta dinâmica são transformadas em expressões algébricas em função do operador  $\omega$ . Desta forma, os circuitos elétricos podem ser analisados em função dos fasores de tensão e corrente para uma determinada frequência. Nestas circunstâncias, o tema em questão pode ser tratado do domínio da frequência conforme preconizado em [33].

Além da ferramenta de análise supra caracterizada, os estudos focados necessitam de informações, as quais são extraídas de medições de campo junto ao PAC. Para tanto, são necessárias monitorações das correntes e tensões ao longo do tempo, as quais permitirão a formação de um banco de dados contendo as bases para a aplicação da metodologia.

Reconhecendo a natureza dinâmica dos sistemas, é importante ressaltar que as informações coletadas devem primar por dados que expressem a operação do complexo elétrico para os menores intervalos de tempo possíveis. Desta forma, sendo factível a extração de dados a cada ciclo, estes caracterizarão as bases para a aplicação do procedimento de cálculo no domínio da frequência e, conseqüentemente, a determinação dos possíveis responsáveis pelas distorções.

Uma vez que muitos dos medidores modernos de qualidade da energia são capazes de realizar registros ciclo a ciclo, ou com um protocolo compatível à legislação pertinente, entende-se que o cumprimento destas premissas é plenamente satisfeito nos termos exigidos pelo processo.

Observadas as propriedades dos registros feitos e as informações extraídas nos curtos intervalos de tempo, estes podem ser considerados como uma discretização de sucessivos regimes permanentes, para os quais as técnicas do domínio da frequência podem ser utilizadas. Dentre as vantagens advindas desta discretização, destaca-se a linearização do processo nos intervalos sob estudo e, por conseguinte, a factibilidade do uso dos princípios da superposição [33]. Este estabelece que: em um circuito linear contendo várias fontes independentes, a corrente ou tensão de um elemento do circuito é igual à soma algébrica das correntes ou tensões dos componentes produzidas por cada fonte independente, operando isoladamente. Esta é a base dos procedimentos a serem descritos e empregados nesta tese.

Vale observar que procedimentos desta natureza não são exclusividade do tema focado nesta pesquisa. De fato, desde 1960 até os dias atuais, estas técnicas de solução de circuitos são amplamente utilizadas em estudos e simulações computacionais de fluxo harmônico. Também, a grande maioria dos estudos de penetração harmônica, objetivando o projeto de filtros passivos, utiliza ferramentas baseadas na solução linear da matriz de admitâncias harmônicas, onde, para cada frequência, o simulador calcula o fluxo das diferentes ordens,

fornecendo como resultados as distorções harmônicas de tensão e corrente nas diversas barras e linhas do sistema em estudo.

## 2.3 – MODELAGEM DO PAC

A figura 2.1 destaca que uma eventual medição das distorções harmônicas no PAC é indicativa do resultado final advindo dos efeitos individuais das partes que formam o complexo elétrico caracterizado pela rede de suprimento e pelo consumidor. A figura evidencia que ambos os segmentos contribuem para a distorção medida, as quais irão se compor segundo as leis que regem a operação dos circuitos elétricos.

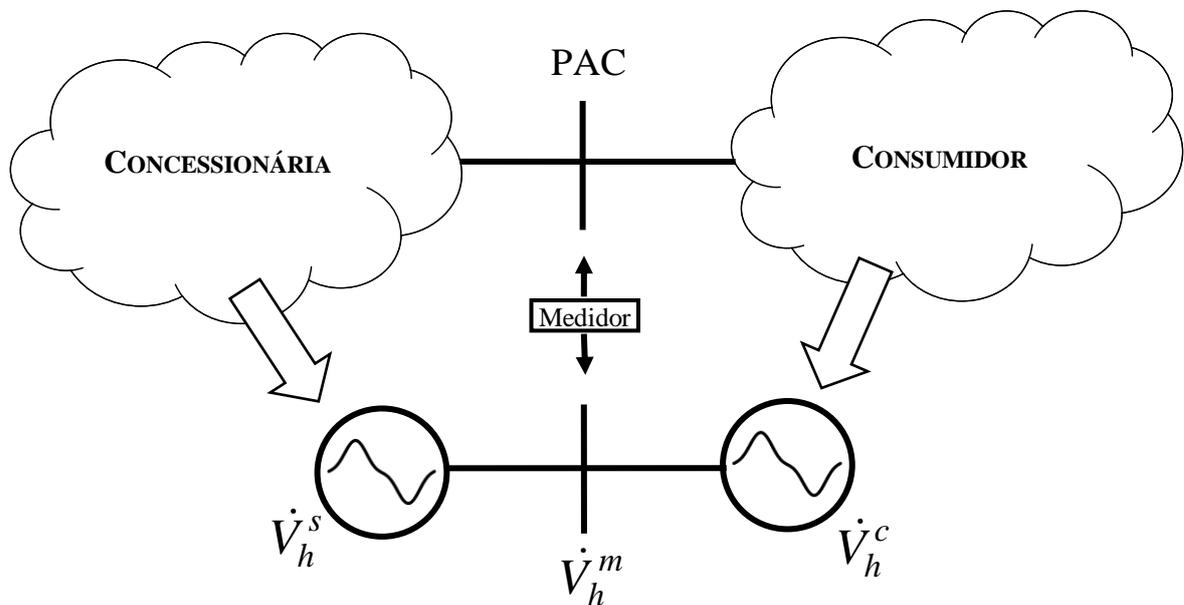


Figura 2.1 – Configuração do PAC do ponto de vista de harmônicos.

De acordo com a figura, para uma ordem harmônica específica definida por “h”, tem-se a seguinte relação entre as distorções: final, do supridor e do consumidor:

$$\dot{V}_h^m = \dot{V}_h^s + \dot{V}_h^c \quad (2.1)$$

Sendo:  $\dot{V}_h^s$  – Tensão harmônica de ordem  $h$ , devida ao supridor (concessionária);

$\dot{V}_h^c$  – Tensão harmônica de ordem  $h$ , devida ao consumidor;

$\dot{V}_h^m$  – Tensão harmônica de ordem  $h$ , medida no PAC.

Muito embora o efeito final das cargas não-lineares seja a distorção das tensões, estas, em sua maioria, são decorrentes das correntes distorcidas injetadas por estas cargas. Assim, pode-se modificar a ilustração anterior de forma a incluir tais fontes de correntes, permitindo assim uma análise nodal do PAC. Naturalmente, uma vez que o processo de análise é direcionado à consideração das correntes harmônicas, surge a necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas atreladas com as partes envolvidas. Nestes termos, as impedâncias equivalentes para a rede de suprimento e para o consumidor assumem grande importância no processo e, por tal motivo, necessitam ser identificadas e modeladas.

Partindo do fato que as impedâncias harmônicas individuais sejam conhecidas, como indicado na figura 2.2, torna-se factível o estabelecimento de expressões baseadas em princípios de circuitos e que conduzem ao desejado compartilhamento das responsabilidades. Nestes termos, a figura subsequente contempla esta composição de correntes e de impedâncias, sendo que, por motivos de maior clareza didática, introduziu-se, também, uma linha fictícia de impedância nula, para melhor caracterizar as partes envolvidas no processo de cálculo.

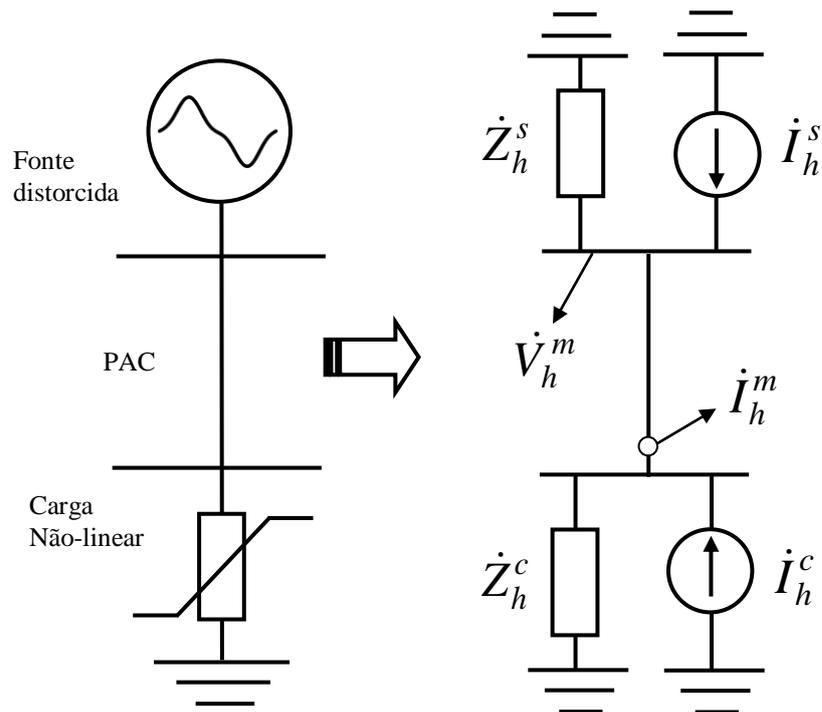


Figura 2.2 – Modelagem nodal do PAC.

Na figura:

- $i_h^s$  – corrente harmônica de ordem  $h$ , proveniente do sistema supridor;
- $i_h^c$  – corrente harmônica de ordem  $h$ , resultante das cargas não-lineares do consumidor;
- $i_h^m$  – corrente harmônica de ordem  $h$ , medida no PAC;
- $Z_h^s$  – impedância harmônica equivalente da concessionária;
- $Z_h^c$  – impedância harmônica equivalente do consumidor.

Do circuito anterior, e de acordo com [20], obtêm-se as equações (2.2) e (2.3), que fornecem as correntes harmônicas advindas da fonte e da carga. Vale lembrar que todas as equações aqui referidas são aplicadas a cada uma das componentes harmônicas consideradas no processo.

$$i_h^s = \frac{V_h^m}{Z_h^s} + i_h^m \quad (2.2)$$

$$\dot{I}_h^c = \frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^c} - \dot{I}_h^m \quad (2.3)$$

Novamente, a formulação acima é válida, de forma independente, para todas as ordens harmônicas presentes nos espectros da tensão e da corrente medidos no PAC. Assim, de acordo com a figura 2.3, o circuito original é decomposto em dois circuitos distintos que interagem entre si através dos princípios da superposição. Um dos arranjos é representativo do efeito do supridor e outro associado ao consumidor.

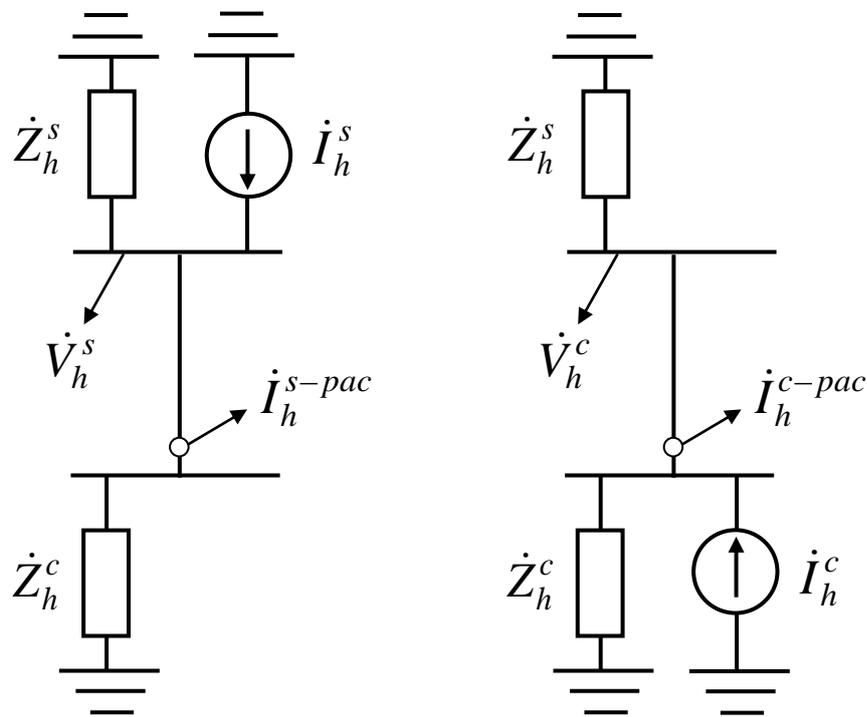


Figura 2.3 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da superposição.

Na figura:

$\dot{I}_h^{s-pac}$  – contribuição da concessionária para a corrente medida no PAC;

$\dot{I}_h^{c-pac}$  – contribuição do consumidor para a corrente medida.

A partir dos circuitos individuais anteriores é possível estabelecer as seguintes relações matemáticas:

$$\dot{I}_h^{s-pac} = \frac{\dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \dot{I}_h^s \quad (2.4)$$

$$\dot{I}_h^{c-pac} = \frac{\dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \dot{I}_h^c \quad (2.5)$$

Através da composição das duas parcelas de corrente anteriores pode-se obter a corrente total medida no PAC, a qual é dada por:

$$\dot{I}_h^m = \dot{I}_h^{s-pac} + \dot{I}_h^{c-pac} \quad (2.6)$$

Nas normas e recomendações sobre distorções harmônicas há uma predominância no estabelecimento de limites para as distorções de tensão, pois esta, normalmente, é decorrente das correntes injetadas e das características das impedâncias do local. Assim a avaliação da tensão é mais prática, visto que a limitação das correntes implicaria em verificações da impedância do sistema supridor naquele ponto. Com exceção do Padrão IEEE 519 [6], todas as demais normas e recomendações sobre limites globais de distorções harmônicas são expressas em função da tensão.

Nestes termos, a tensão harmônica associada exclusivamente ao efeito não-linear do consumidor, pode ser determinada por:

$$\dot{V}_h^c = \dot{I}_h^{c-pac} \cdot \dot{Z}_h^s \quad (2.7)$$

Substituído (2.3) em (2.5) e inserindo o resultado em (2.7), tem-se que a tensão harmônica de ordem  $h$ , decorrente exclusivamente da atuação das cargas não-lineares do consumidor, pode ser expressa por:

$$\dot{V}_h^c = \frac{\dot{V}_h^m - \dot{I}_h^m \cdot \dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^c + \dot{Z}_h^s} \cdot \dot{Z}_h^s \quad (2.8)$$

De forma análoga, a contribuição referente à concessionária é determinada por:

$$\dot{V}_h^s = \frac{\dot{V}_h^m + \dot{I}_h^m \cdot \dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^c + \dot{Z}_h^s} \cdot \dot{Z}_h^c \quad (2.9)$$

As equações (2.8) e (2.9) representam, pois as distorções harmônicas resultantes da atuação isolada do consumidor e da concessionária, respectivamente. Os valores obtidos podem então ser comparados com os limites impostos pela regulamentação vigente de forma a caracterizar o principal responsável ou promover a divisão das responsabilidades sobre as distorções harmônicas medidas no PAC.

É relevante observar que o procedimento descrito, devido ao banco de dados obtidos, pode ser aplicado sucessivamente, ciclo a ciclo, ou intervalo a intervalo, e procedimentos adicionais envolvendo recursos estatísticos poderiam ser utilizados para os fins aqui almejados.

## **2.4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA – IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DEFINIDAS**

Objetivando avaliar o desempenho da metodologia descrita, esta seção é direcionada a utilização do método através de avaliações computacionais com vistas à ilustração da potencialidade do processo quanto a identificação das parcelas de responsabilidade sobre uma distorção total obtida junto a um determinado PAC.

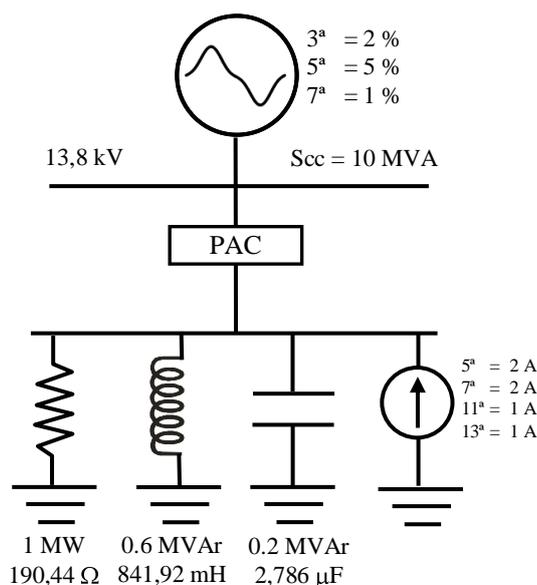
O processo de validação encontra-se apoiado num programa computacional [34] que emprega técnicas de simulação no domínio da frequência para a solução do fluxo harmônico em sistemas elétricos. Nesta base computacional é simulado um arranjo simplificado que

consiste, fundamentalmente, de uma rede de alimentação definida por sua impedância de curto-circuito e um consumo caracterizado por um conjunto de cargas resistivas (lâmpadas incandescentes, aquecedores, etc.), cargas capacitivas (banco de capacitores), cargas indutivas (motores) e cargas não-lineares.

O processo de avaliação de desempenho da metodologia, baseada no critério da superposição, compreende três condições operacionais ideais e distintas para o sistema teste, a saber:

- **Caso 01:** sistema supridor com tensão senoidal, alimentando as cargas lineares e não-lineares do consumidor;
- **Caso 02:** sistema supridor contendo tensões distorcidas, alimentando somente as cargas lineares do consumidor;
- **Caso 03:** sistema supridor com tensões distorcidas, alimentando as cargas lineares e não-lineares do consumidor.

Tomando por base a última condição operacional acima, a figura 2.4 apresenta os parâmetros elétricos do sistema teste adotado na avaliação da presente metodologia.



*Figura 2.4 – Diagrama unifilar do sistema teste – Caso 03.*

Para a utilização das equações (2.8) e (2.9) faz-se necessário o conhecimento dos valores medidos de tensão e corrente no PAC. Na ausência de uma montagem experimental, as distorções harmônicas das tensões e correntes são advindas dos trabalhos de simulação computacional. Portanto, em substituição a valores medidos, são empregados aqueles fornecidos pelo mencionado simulador. Objetivando maior identidade com eventuais registros de campo, os valores das distorções são sempre aproximados, de modo a contemplar precisões normalmente observadas nos equipamentos comerciais de medição. Questões outras, associadas com as monitorações em campo, a exemplo das respostas dos TPs e TCs [35], não serão consideradas face a natureza dos trabalhos feitos e pelo fato que o assunto foge aos objetivos desta pesquisa.

No que tange aos parâmetros de definição das impedâncias, a concessionária foi caracterizada através de um nível de curto-circuito trifásico de 10 MVA, com ângulo de 90°. O consumidor, conforme ilustrado pela figura anterior, apresenta elementos lineares (R, L e C) e uma fonte de correntes harmônicas indicativa das cargas não-lineares. Todas as potências indicadas são trifásicas, no entanto, para efeito do presente trabalho, não obstante a natureza

trifásica do sistema, os resultados indicados e discutidos estão associados tão apenas a uma das fases, qual seja a A.

Para fins de comparação dos resultados obtidos com os limites previstos pela regulamentação do ONS, apresenta-se, na tabela 2.1, os valores das distorções harmônicas aceitáveis.

*Tabela 2.1 – Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental [3].*

<b>V &lt; 69 kV</b>				<b>V ≥ 69 kV</b>			
<b>Ímpares</b>		<b>Pares</b>		<b>Ímpares</b>		<b>Pares</b>	
<b>Ordem</b>	<b>Limite</b>	<b>Ordem</b>	<b>Limite</b>	<b>Ordem</b>	<b>Limite</b>	<b>Ordem</b>	<b>Limite</b>
<b>3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup></b>	5%	<b>2<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup></b>	2%	<b>3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup></b>	2%	<b>2<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup></b>	1%
<b>9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup></b>	3%			<b>9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup></b>	1,5%		
<b>15<sup>a</sup> a 25<sup>a</sup></b>	2%			<b>15<sup>a</sup> a 25<sup>a</sup></b>	1%		
<b>≥ 27<sup>a</sup></b>	1%	<b>≥ 8<sup>a</sup></b>	1%	<b>≥ 8<sup>a</sup></b>	0,5%		
<b>DHTT = 6%</b>				<b>DHTT = 3%</b>			

### **a) Caso 01**

A simulação desta condição, como esclarecido, considera a concessionária sem distorções harmônicas suprimindo cargas lineares e não-lineares. Conseqüentemente, as únicas harmônicas passíveis de avaliação correspondem à 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens, presentes na fonte de corrente.

A figura 2.5 apresenta, respectivamente, as formas de onda e espectros harmônicos para a tensão e corrente obtidos junto ao PAC.

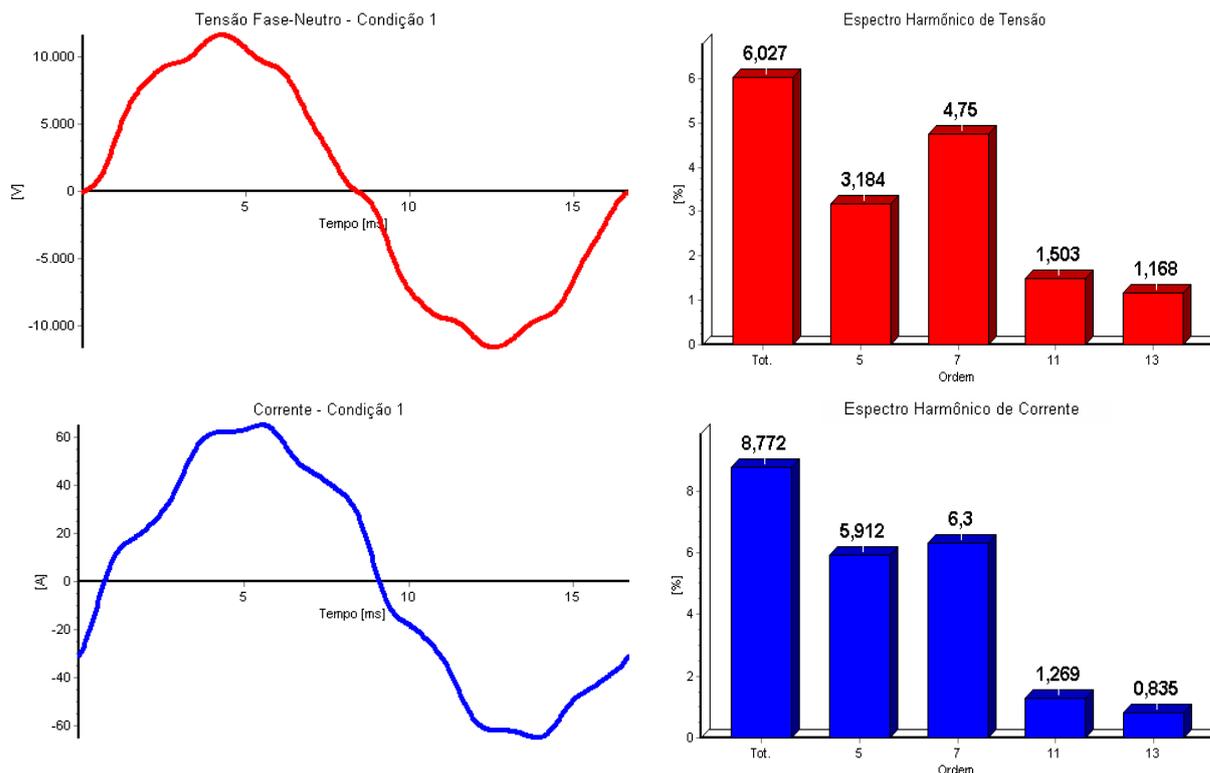


Figura 2.5 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 01.

A tabela 2.2 sintetiza os principais resultados obtidos. Sob a designação: “esperado” entende-se as expectativas teóricas (como apenas o consumidor contribui, as parcelas sob responsabilidade do supridor seriam nulas) e; sob o título “calculado” os valores resultantes da aplicação da metodologia apresentada. Todas as tensões estão referenciadas ao valor fundamental de 7.967 [V], que corresponde à tensão eficaz nominal fase-neutro.

Tabela 2.2 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 01

<i>h</i>	Distorções de tensão						
	PAC	Concessionária			Consumidor		
		Esperado	Calculado	Erro	Esperado	Calculado	Erro
5 <sup>a</sup>	3,18 %	-	0,01 %	ND	3,18 %	3,19 %	0,31 %
7 <sup>a</sup>	4,75 %	-	0,01 %	ND	4,75 %	4,74 %	-0,21 %
11 <sup>a</sup>	1,50 %	-	0,01 %	ND	1,50 %	1,51 %	0,67 %
13 <sup>a</sup>	1,17 %	-	0,01 %	ND	1,17 %	1,17 %	0,00 %
<b>DTHT</b>	6,03 %	-	0,02 %	ND	6,03 %	6,03 %	0,00 %

ND – divisão por zero, valor não definido.

Conforme seria esperado, os erros observados nos cálculos são mínimos, visto que a metodologia é fundamentada no critério da superposição, o qual originou o programa utilizado e as formulações estabelecidas. Como os dados empregados não foram extraídos de medições, mas sim das simulações computacionais, não há motivos para divergências.

Os valores apresentados pela tabela 2.2 determinam que o consumidor é totalmente responsável pelas distorções harmônicas. Ainda, de acordo com a tabela 2.1, os valores calculados somente resultam em violação dos limites recomendados quando se observa a distorção total.

Para maiores esclarecimentos, a tabela 2.3 explicita os valores obtidos para as correntes, tensões e impedâncias associadas com o sistema supridor e a carga para a Condição 1. Tais informações foram extraídas dos parâmetros, distorções aplicadas e cálculos.

*Tabela 2.3 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Caso 01*

<i>h</i>	<b>Tensão [V]</b>	<b>Corrente [A]</b>	<b>Z<sub>s</sub> [Ω]</b>	<b>Z<sub>c</sub> [Ω]</b>
<b>5<sup>a</sup></b>	253,67 ∠ -131,76°	2,66 ∠ -41,65°	95,22 ∠ 90°	142,97 ∠ -41,35°
<b>7<sup>a</sup></b>	378,42 ∠ -173,48°	2,84 ∠ -83,53°	133,31 ∠ 90°	115,32 ∠ -52,73°
<b>11<sup>a</sup></b>	119,76 ∠ 128,96°	0,57 ∠ -141,71°	209,48 ∠ 90°	80,45 ∠ -65,01°
<b>13<sup>a</sup></b>	93,09 ∠ 119,27°	0,38 ∠ -151,39°	247,57 ∠ 90°	69,44 ∠ -68,62°

## **b) Caso 02**

A figura 2.6 expressa os resultados para a tensão e corrente junto ao PAC para a segunda avaliação da metodologia, desta vez admitindo que as distorções harmônicas, por princípio, estejam totalmente vinculadas com a fonte de suprimento. Para atender às premissas estabelecidas, a fonte de corrente associada com a injeção harmônica da carga é retirada, e, portanto, fica estabelecido que as distorções presentes, correspondentes às ordens 3, 5 e 7, estão totalmente relacionadas com o sistema supridor.

As formas de onda e espectros harmônicos resultantes no PAC para esta nova condição operacional são mostradas na seqüência.

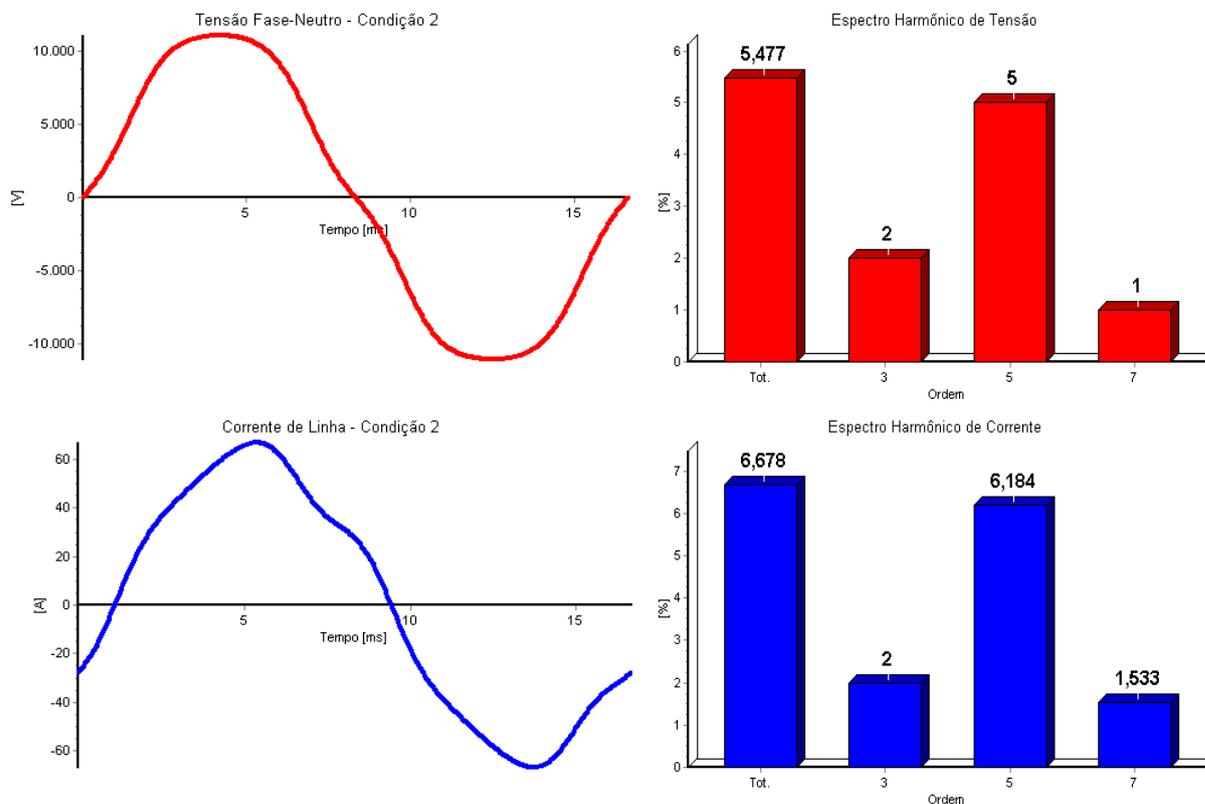


Figura 2.6 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 02.

Seguindo o mesmo procedimento adotado para a condição anterior, a tabela 2.4 sintetiza os resultados obtidos para esta nova situação operacional. As colunas onde figuram os valores “esperados” e “calculados” obedecem ao que foi esclarecido anteriormente. Mais uma vez, diante da hipótese utilizada, seriam esperadas apenas contribuições por parte da concessionária. Os valores indicados refletem esta expectativa, evidenciando, novamente, a consistência do método de cálculo.

*Tabela 2.4 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 02.*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,00 %	0,00 %	-	0,01 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	5,00 %	5,00 %	5,00 %	0,00 %	-	-	-
<b>7<sup>a</sup></b>	1,00 %	1,00 %	1,00 %	0,00 %	-	-	-
<b>DTHT</b>	5,48 %	5,48 %	5,48 %	0,00 %	-	0,01 %	ND

Complementarmente, seguindo a mesma linha de pensamento já apresentada, a tabela 2.5 fornece detalhes do processo de cálculo obedecido para a obtenção das distorções finais.

*Tabela 2.5 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Caso 02.*

<i>h</i>	<b>Tensão [V]</b>	<b>Corrente [A]</b>	<b>Z<sub>s</sub> [Ω]</b>	<b>Z<sub>c</sub> [Ω]</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	159,35 ∠ 180°	0,90 ∠ -158,55°	57,13 ∠ 90°	176,82 ∠ -21,80°
<b>5<sup>a</sup></b>	398,37 ∠ 180°	2,79 ∠ -138,64°	95,22 ∠ 90°	142,97 ∠ -41,35°
<b>7<sup>a</sup></b>	79,67 ∠ 180°	0,69 ∠ -127,37°	133,31 ∠ 90°	115,32 ∠ -52,73°

Para o presente caso, avaliando a questão em termos dos valores de referência constantes nas recomendações do ONS, não se constata qualquer violação dos valores sugeridos. No entanto, a distorção de 5<sup>a</sup> ordem se apresenta nas imediações do limite máximo recomendado, fato este que implica que, qualquer acréscimo advindo das cargas do consumidor poderá acarretar a violação desta fronteira.

### **c) Caso 03**

A generalização do processo e, por conseguinte, a avaliação da consistência do processo, exigiria, necessariamente, uma condição de funcionamento que retratasse a contribuição conjunta das duas partes envolvidas. Nestes termos, este último caso reflete uma operação tal que o consumidor e a concessionária possuem características determinantes sobre a distorção total de tensão. Mais uma vez, à luz do critério da superposição, como as fontes são tratadas de forma independente, a tensão no PAC, naturalmente, será dada pela composição destes efeitos. Vale lembrar que estas tensões correspondem a fasores, assim, dependendo da defasagem angular entre as parcelas referentes ao consumidor e à concessionária, pode haver desde uma adição até um cancelamento dos valores individuais.

Diante do exposto, para o caso selecionado para apresentação e discussão, os valores adotados para a distorção pré-existente no barramento da concessionária e as injeções por parte do consumidor (adotadas como constantes) são aquelas indicadas na figura 2.4. Nestas circunstâncias, as ordens harmônicas presentes nesta condição operacional correspondem à 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>. É importante destacar que a componente de ordem 3 é proveniente somente da concessionária, enquanto que aquelas de ordem 11 e 13 são de responsabilidade exclusiva do consumidor. Quanto as harmônicas de ordem 5 e 7, tendo em vista que estas se fazem presente tanto no supridor como no consumidor, as distorções finais correspondentes expressam a combinação de ambas as partes. As formas de onda para a tensão e para a corrente, assim como seus respectivos espectros de frequência, são indicadas na figura 2.7.

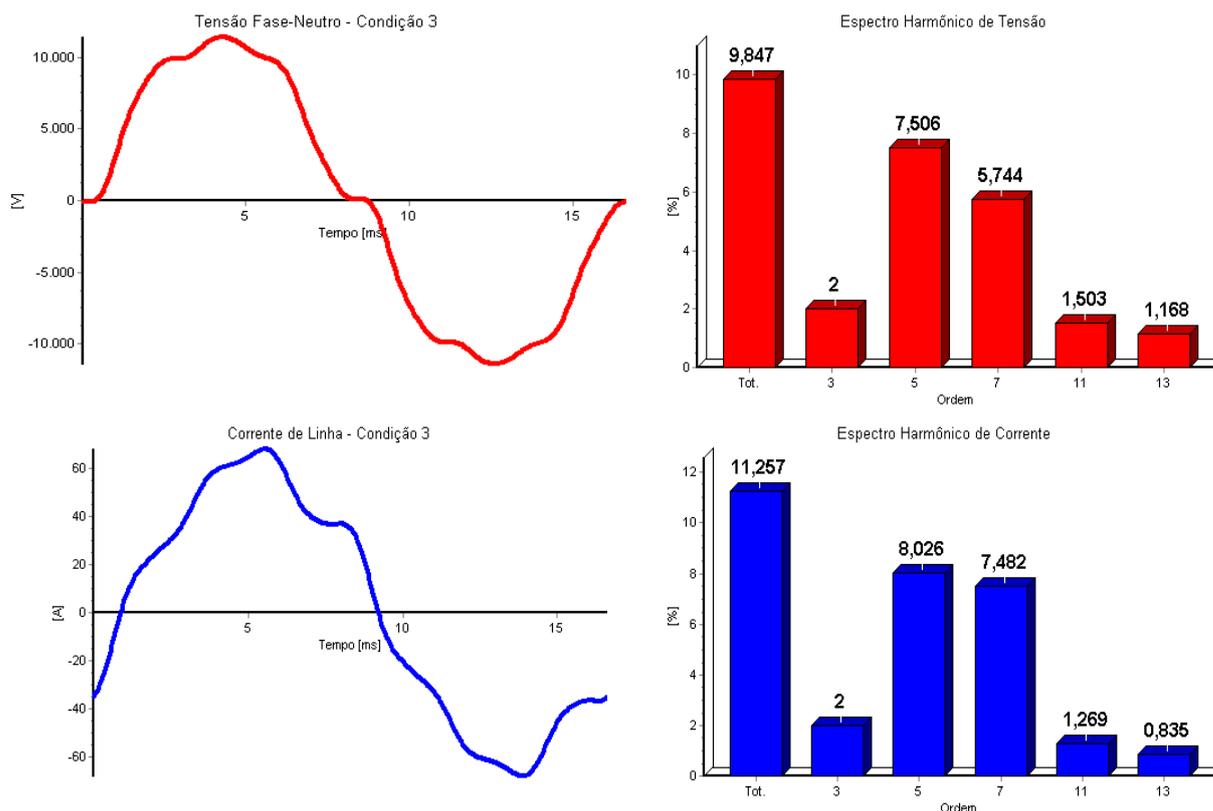


Figura 2.7 – Formas de onda e espectros harmônicos da tensão e corrente – Resultados computacionais para o Caso 03.

Tal como ocorrido para os casos anteriores, a tabela 2.6 evidencia os resultados do processo do compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções resultantes. Os resultados se mostram consistentes com as premissas utilizadas.

Tabela 2.6 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 03

<i>h</i>	Distorções de tensão						
	PAC	Concessionária			Consumidor		
		Esperado	Calculado	Erro	Esperado	Calculado	Erro
3 <sup>a</sup>	2,00 %	2,00 %	2,00 %	0,00 %	-	0,01 %	ND
5 <sup>a</sup>	7,51 %	5,00 %	4,99 %	-0,20 %	3,18 %	3,19 %	0,31 %
7 <sup>a</sup>	5,74 %	1,00 %	1,01 %	1,00 %	4,75 %	4,74 %	-0,21 %
11 <sup>a</sup>	1,50 %	-	0,01 %	ND	1,50 %	1,51 %	0,67 %
13 <sup>a</sup>	1,17 %	-	0,01 %	ND	1,17 %	1,17 %	0,00 %
<b>DTHT</b>	<b>9,85 %</b>	<b>5,48 %</b>	<b>5,47 %</b>	<b>-0,18 %</b>	<b>6,03 %</b>	<b>6,02 %</b>	<b>-0,17 %</b>

Informações mais detalhadas sobre as etapas do processo de cálculo e dados empregados encontram-se anexados na tabela 2.7.

*Tabela 2.7 – Tensão e corrente no PAC e impedâncias equivalentes da concessionária e carga – Condição 3*

<b><i>h</i></b>	<b>Tensão [V]</b>	<b>Corrente [A]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Zc [<math>\Omega</math>]</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	159,35 $\angle$ 180,00°	0,90 $\angle$ -158,55°	57,13 $\angle$ 90°	176,82 $\angle$ -21,80°
<b>5<sup>a</sup></b>	598,05 $\angle$ -161,55°	3,62 $\angle$ -91,58°	95,22 $\angle$ 90°	142,97 $\angle$ -41,35°
<b>7<sup>a</sup></b>	457,66 $\angle$ -174,61°	3,37 $\angle$ -91,70°	133,31 $\angle$ 90°	115,32 $\angle$ -52,73°
<b>11<sup>a</sup></b>	119,76 $\angle$ 128,96°	0,57 $\angle$ -140,71°	209,48 $\angle$ 90°	80,45 $\angle$ -65,01°
<b>13<sup>a</sup></b>	93,09 $\angle$ 119,27°	0,38 $\angle$ -151,39°	247,57 $\angle$ 90°	69,44 $\angle$ -68,62°

No que tange aos termos comparativos entre os resultados e os valores de referência destacados na tabela 2.1, verifica-se que a distorção harmônica total, assim como as individuais de ordem 5 e 7 ultrapassam os limites indicados. Para o caso da 5<sup>a</sup> ordem, a responsabilidade é maior da concessionária, enquanto que, para a 7<sup>a</sup>, é evidente a predominância do consumidor. Quanto à distorção total, esta também apresenta uma maior parcela de responsabilidade advinda das cargas não-lineares do consumidor. Todavia, há de se reconhecer que a concessionária também tem responsabilidade no processo de mitigação dos efeitos.

## **2.5 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA – IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS INDEFINIDAS**

Para as situações reais, as impedâncias harmônicas da rede de suprimento são conhecidas, mas com imprecisões. Tendo em vista que o processo de cálculo apresentado possui forte dependência para com tal parâmetro, isto pode, inevitavelmente, ocasionar expressivas imprecisões no processo avaliativo. Na verdade, o assunto diz respeito tanto às informações do supridor como do consumidor, sendo que, para este último, o nível de desinformação é ainda mais crítico. Somado a este aspecto, há ainda a se considerar que as dinâmicas operacionais impostas a ambas as partes determinam expressivas variações dos seus parâmetros equivalentes, fato este que dificulta ainda mais a utilização de dados pré-definidos para uma ou outra situação de funcionamento da rede.

Diante do exposto, em complemento às avaliações realizadas sob condições tais que, tanto as distorções como os parâmetros são pré-definidos e constantes, torna-se necessário investigar e esclarecer sobre a aplicação da metodologia sob condições adversas a estas. Em vista do fato que a dinâmica operacional, no que se refere aos níveis de distorções, pode ser contemplada através dos já mencionados registros sucessivos ao longo do tempo, fica então como maior fragilidade a questão da correta estimativa das impedâncias harmônicas para ambas as partes. Inserido, pois, neste cenário, procede-se, na seqüência, a um conjunto de avaliações de desempenho do processo, com foco nas imprecisões inerentes às estimativas das impedâncias harmônicas.

De um conjunto de situações consideradas, optou-se pela apresentação de três casos básicos. Estes estão relacionados com as mesmas condições impostas para o anterior Caso 03, ao qual são adicionados desvios nas impedâncias. Seguindo a numeração anterior, as novas condições operacionais são identificadas como:

- **Caso 04:** Impedância do sistema supridor com -10% de desvio em seu módulo;
- **Caso 05:** Impedância do consumidor com -30% de desvio em seu módulo;
- **Caso 06:** Impedâncias do supridor com -10% de desvio e do consumidor com -30% de desvio em seus módulos.

O erro maior para impedância do consumidor é justificado pelo maior desconhecimento desta em relação à impedância do supridor. Vale ainda observar que os percentuais informados são válidos para todas as ordens harmônicas.

#### a) Caso 04

A tabela 2.8 apresenta os resultados esperados, calculados e os erros obtidos quando da consideração de imprecisões nas impedâncias envolvidas no processo de cálculo. Sob a designação “distorção esperada” subtendem-se aqueles valores determinados para o Caso 03, os quais correspondem as distorções corretas. As “distorções calculadas” são advindas do processo de cálculo, inserindo-se os “erros” adotados para as respectivas impedâncias.

*Tabela 2.8 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 04*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,00 %	0,00 %	-	0,01 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	7,51 %	5,00 %	5,41 %	8,20 %	3,18 %	2,86 %	-10,1 %
<b>7<sup>a</sup></b>	5,74 %	1,00 %	1,45 %	45,0 %	4,75 %	4,60 %	-3,16 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	-	-	1,50 %	1,59 %	6,00 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	-	-	1,17 %	1,21 %	3,42 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	5,94 %	8,39 %	6,03 %	5,78 %	-4,15 %

A tabela evidencia fortes discrepâncias entre os resultados obtidos em condições conhecidas. Entretanto, é relevante observar que os altos valores para os erros estão

associados com comparações entre valores de distorções bastante baixos, fato este que amplifica os percentuais comparativos.

Os resultados obtidos evidenciam que:

- A alteração na impedância da concessionária não afetou as distorções de 3ª ordem. Vale lembrar que esta ordem é exclusiva do próprio supridor. Assim, imprecisões no cálculo da impedância da concessionária sugerem que este fator não traz grandes impactos na estimativa das distorções harmônicas em que sua responsabilidade é dominante;
- As distorções de ordem 5 e 7, advindas de ambas as partes, foram significativamente afetadas, fato este que denota a importância do conhecimento das impedâncias harmônicas envolvidas no processo de cálculo. No entanto, apesar dos erros observados, a predominância do consumidor para a 7ª ordem e da concessionária para a 5ª foram mantidas, em consonância com a origem dos fenômenos;
- Quanto à distorção total, os erros encontrados para as contribuições associadas com o supridor e consumidor não são significativamente afetadas. Desta forma, estes primeiros resultados evidenciam que a faixa de imprecisão adotada para a impedância da concessionária não foi decisiva para inviabilizar a identificação das responsabilidades. Não obstante a este fato, considera-se que o assunto seja ainda merecedor de maiores investigações.

## b) Caso 05

A presente situação considera, agora, que a impedância do supridor seja utilizada em seu valor correto e que a do consumidor se apresente com uma imprecisão de 30% (em módulo) do valor originalmente empregado. O desempenho final obtido sob tais circunstâncias encontra-se sumarizado na tabela 2.9.

*Tabela 2.9 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 05*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,00 %	0,00 %	-	0,30 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	7,51 %	5,00 %	4,65 %	-7,00 %	3,18 %	4,89 %	53,8 %
<b>7<sup>a</sup></b>	5,74 %	1,00 %	0,68 %	-32,0 %	4,75 %	5,16 %	8,63 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	-	-	1,50 %	1,51 %	0,67 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	-	-	1,17 %	1,17 %	0,00 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	5,11 %	-6,75 %	6,03 %	7,37 %	22,2 %

Comparando-se os novos resultados com aqueles esperados, fica evidenciado que:

- A imprecisão do valor utilizado para a impedância do consumidor não afetou as distorções de ordem 11 e 13. Estas, como esclarecido, foram oriundas tão somente do consumidor. Deste modo, mais uma vez ficou constatado que, erros na impedância de uma das partes não trazem maiores conseqüências sobre a determinação das responsabilidades quando as componentes em questão estão vinculadas de modo dominante com este segmento;
- Para as distorções advindas da combinação de ambos os lados (5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens), observa-se que, enquanto que aquelas referentes ao consumidor foram majoradas, as demais, concernentes à concessionária foram reduzidas. Este fato

conduziu à inversão da principal responsabilidade para a 5ª ordem, atribuindo um maior valor para o consumidor;

- A identificação da 3ª ordem, totalmente proveniente da concessionária, praticamente não foi alterada;
- A diferença entre as distorções totais esperadas e aquelas calculadas também sofreram um acréscimo significativo, pelo mesmo motivo verificado para a 5ª e 7ª ordens.

### c) Caso 06

Este último caso contempla uma situação em que ocorrem imprecisões tanto na impedância do supridor como também do consumidor. As discrepâncias empregadas são as mesmas anteriormente informadas e os resultados da análise do compartilhamento associada com esta condição são indicados na tabela 2.10.

*Tabela 2.10 – Avaliação computacional do critério da superposição – Caso 06.*

<i>h</i>	Distorções de tensão						
	PAC	Concessionária			Consumidor		
		Esperado	Calculado	Erro	Esperado	Calculado	Erro
<b>3ª</b>	2,00 %	2,00 %	2,01 %	0,50 %	-	0,27 %	ND
<b>5ª</b>	7,51 %	5,00 %	5,25 %	5,00 %	3,18 %	4,56 %	43,4 %
<b>7ª</b>	5,74 %	1,00 %	1,03 %	3,00 %	4,75 %	5,30 %	11,6 %
<b>11ª</b>	1,50 %	-	0,06 %	ND	1,50 %	1,56 %	4,00 %
<b>13ª</b>	1,17 %	-	0,03 %	ND	1,17 %	1,20 %	2,56 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	5,71 %	4,20 %	6,03 %	7,27 %	20,6 %

Dentre as principais constatações feitas quanto ao caso em pauta, ressaltam-se os seguintes pontos:

- Novamente, a alteração na impedância de uma determinada parte do sistema não afeta, de forma significativa, as distorções provenientes da mesma, como observado para a 3<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens.
- As distorções partilhadas, por sua vez, são alteradas de forma significativa e podem, inclusive, indicar uma incorreta responsabilidade entre as partes, conforme verificado para as distorções harmônicas de 5<sup>a</sup> ordem;
- As distorções totais seguem o comportamento das maiores distorções individuais, apresentando uma diferença entre as parcelas de responsabilidade igual a 1,56%, enquanto que o valor esperado corresponde a 0,55%.

## **2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O capítulo em epígrafe foi centrado na questão da fundamentação do processo do compartilhamento da responsabilidade das distorções harmônicas identificadas junto aos pontos de acoplamento entre supridores e consumidores. A técnica utilizada empregou princípios bem estabelecidos na área de circuitos elétricos e a superposição de efeitos. Não obstante, os esclarecimentos prestados durante os desenvolvimentos, o emprego do princípio da superposição, classicamente conhecido no campo de sistemas lineares, para os fins aqui almejados, sugere, numa primeira instância, uma inconsistência metodológica. Tal assertiva se prende ao fato que o contexto das distorções harmônicas, intimamente associado com dispositivos não-lineares, encontra-se identificado com uma área em que a superposição não deve ser usada. Todavia, de acordo com os termos estabelecidos, a viabilidade da técnica encontra respaldo quando o assunto for considerado dentro da ótica da discretização dos fenômenos e respectivos sinais, em intervalos de tempo suficientemente pequenos para validar a utilização dos princípios da superposição. Como destacado no texto, são várias as áreas de conhecimento que realizam seus estudos fundamentados em técnicas similares.

De fato, a partir de registros instantâneos das correntes e tensões, e do conhecimento dos parâmetros equivalentes que regem a operação dos sistemas envolvidos, torna-se factível o emprego da metodologia aqui proposta e avaliada.

Objetivando esclarecer sobre o mecanismo de uso e tecer comentários sobre a adequação e limitação do processo, utilizando um arranjo hipotético, foram realizadas diversas investigações computacionais. Os trabalhos primaram pelo uso de um programa computacional que utiliza técnicas de modelagem e estudo no domínio da frequência e que se mostrou apropriado aos fins aqui delineados. Dentre os diversos casos avaliados, foram

apresentados e discutidos dois conjuntos de situações e, para ambas, o desempenho da metodologia se mostrou consistente com os objetivos.

---

## CAPÍTULO III

---

# UMA PROPOSTA PARA A MODELAGEM DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DO CONSUMIDOR

### 3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na bibliografia nacional e internacional, transformadores, capacitores, motores de indução, geradores, linhas, cabos, entre outros, são, frequentemente, objeto de estudos por pesquisadores ávidos pela obtenção de modelos que atendam aos mais distintos requisitos das áreas de estudo da engenharia elétrica. Dentre elas, ressalta-se aquela de interesse para os fins desta pesquisa, qual seja, da propagação das componentes harmônicas e temas correlatos.

Não obstante os avanços atingidos, estes trabalhos, em sua maioria, estão direcionados a um componente específico, avaliando diversos aspectos relacionados com o funcionamento destes dispositivos sob a ação de sinais distorcidos. Todavia, quando o assunto envolve um conjunto de cargas, frequentemente caracterizada pela associação de elementos lineares e não-lineares, o processo da modelagem requer procedimentos distintos que a representação individual de um ou outro dispositivo. O tema consiste na essência das pesquisas voltadas para a obtenção dos equivalentes de cargas agregadas.

Focando o tema desta tese, como ressaltado no capítulo anterior, a separação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas, depende, basicamente, de informações extraídas de medições das tensões e das correntes, assim como do conhecimento das impedâncias envolvidas no processo. Apesar das dificuldades próprias à matéria, a impedância equivalente do sistema supridor, para algumas situações, se apresenta como razoavelmente conhecida. Um dos fatores que contribui para tal afirmativa está no fato que a composição do sistema elétrico nas imediações do PAC é de domínio da empresa supridora e, nestas condições, a obtenção da clássica impedância  $Z(\omega)$  torna-se passível de obtenção. Contribuindo ainda nesta direção, torna-se importante lembrar que, muitas vezes, a impedância do supridor encontra-se influenciada por equipamentos terminais, como transformadores abaixadores e, nestas condições, estes equipamentos exercem grande domínio sobre a mencionada impedância harmônica equivalente. Estes fatos, de modo isolado ou em conjunto, contribuem, com muito esforço, para razoáveis indicadores sobre as impedâncias harmônicas dos sistemas de suprimento. Todavia, no que tange à representação da impedância harmônica do consumidor, o tema consiste em grandes desafios. De fato, o desconhecimento detalhado da constituição interna das cargas que formam o complexo consumidor, assim como da forte dinâmica que determina a operação de qualquer carga, são fatores que evidenciam as dificuldades inerentes à obtenção de seu correspondente  $Z(\omega)$ . Isto posto, fica reconhecido que o processo do compartilhamento da responsabilidade apresenta-se com uma forte limitação pela ausência de maiores dados sobre a modelagem da carga.

Inserido, pois, no contexto supra identificado, este capítulo encontra-se direcionado a investigar os seguintes aspectos:

- Apresentar a modelagem de cargas agregadas, considerando a presença de elementos lineares e não-lineares;

- Adequar a formulação matemática ao propósito da separação das responsabilidades sobre harmônicos;
- Promover estudos avaliativos sobre a eficácia da modelagem.

### **3.2 – FUNDAMENTOS SOBRE A MODELAGEM DA CARGA**

Uma modelagem genérica de cargas elétricas deve contemplar uma combinação apropriada de elementos lineares e não-lineares. No que tange aos primeiros, a busca fica centrada na determinação dos componentes resistivos, indutivos e capacitivos, visto serem estes presentes em qualquer seguimento de consumo de energia elétrica. Complementarmente, objetivando a inserção das não-linearidades e, em especial, as suas contribuições quanto à injeção de correntes distintas da fundamental, há ainda a se considerar a inserção de fontes de correntes representativas às frequências harmônicas em pauta.

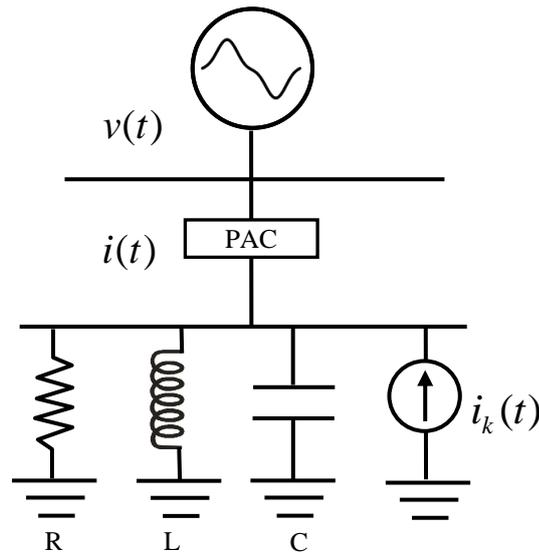
Dentro deste contexto, são poucas as publicações que são imbuídas do propósito da modelagem agregada de cargas para estudos envolvendo distintas frequências. A referência [22] tem por objetivo a identificação da principal fonte de harmônicos, consumidor ou concessionária e, para tanto, define um indicador de não-linearidade da carga equivalente do consumidor. Este índice, de acordo com os autores, permite a separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, pois indica o grau de não-linearidade das formas de onda medidas junto ao PAC. Este fator é determinado através da modelagem de uma carga equivalente do consumidor para cada ponto da forma de onda da tensão e da corrente, sendo a associação série de um resistor com um indutor utilizada para representar a carga. Apesar do título do artigo sugerir a separação das distorções entre o consumidor e o supridor, a metodologia não permite tal procedimento, indicando somente a parcela da carga que é composta por elementos não-lineares. A modelagem da carga, apresentada por este autor, não

considera a existência dos elementos capacitivos comuns à maioria dos sistemas elétricos industriais.

A referência [36] propõe um modelo matemático genérico para cargas não-lineares agregadas a cargas lineares, fundamentado na associação paralela de um resistor, um indutor e um capacitor. Todos os desenvolvimentos utilizam técnicas no domínio do tempo para a determinação dos elementos lineares (R, L e C), estimando também as correntes harmônicas injetadas por estas cargas no sistema supridor. Também neste caso, todas as análises são conduzidas a partir de registros das formas de onda de tensão e corrente no PAC. A publicação [22], utilizando uma associação de elementos passivos (R, L e C), é similar à [36]. A mesma propõe a utilização de técnicas de elementos finitos em conjunto com algoritmos de estimação através dos mínimos erros quadrados para a obtenção destes parâmetros. Para tanto, no mínimo, seis amostras da tensão e corrente são necessárias no processo de cálculo. No entanto, é recomendado um maior número de amostras de forma a evitar estimações imprecisas. As referências [25], [26] e [30] seguem procedimentos semelhantes.

Seguindo a mesma linha de pesquisa acima descrita, a referência [37] complementa a modelagem proposta por [36], através da separação das correntes circulantes pelo resistor, indutor e capacitor. Desta forma, após o cálculo de R, a corrente sobre o mesmo não é considerada no cálculo dos demais componentes. Este procedimento é repetido para o C e L, culminando em uma corrente residual atribuída às cargas não-lineares. Apesar de também utilizar técnicas no domínio do tempo, formulações equivalentes no domínio da frequência também são apresentadas, permitindo a utilização direta das tensões e correntes harmônicas registradas por equipamentos de medição de qualidade da energia.

Fundamentando, pois, nesta última referência, surge a proposta de modelagem da carga sintetizada na figura 3.1.



*Figura 3.1 – Proposta de modelagem utilizada para o consumidor.*

Na figura, além das grandezas passíveis de medição e já destacadas no texto, ressaltam-se:

- R - resistência representativa do consumo de potência ativa do consumidor, envolvendo as cargas lineares e não-lineares;
- L - elemento indutivo equivalente;
- C - elemento capacitivo equivalente;
- $i_k(t)$  - representando o equivalente das fontes harmônicas presentes no consumidor.

As tensões e correntes harmônicas medidas junto ao PAC, no domínio do tempo, podem ser expressas pelas equações (3.1) e (3.2).

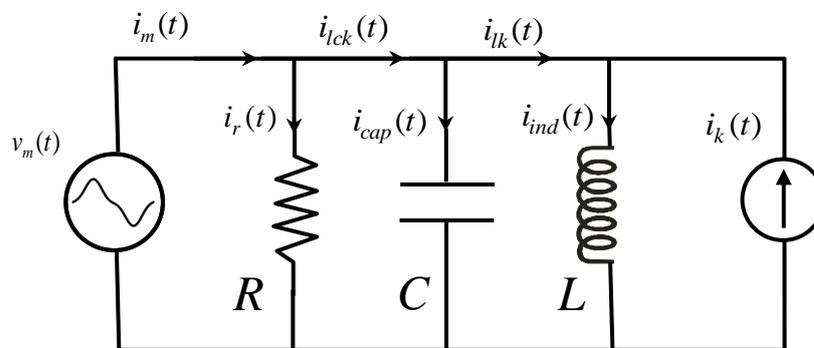
$$v(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{h=1}^N V_h \cdot \cos(\omega t \cdot h) \quad [\text{V}] \quad (3.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{h=1}^N I_h \cdot \cos(\omega t \cdot h \pm \theta_h) \quad [\text{A}] \quad (3.2)$$

Onde:

- $V_h$  – tensão eficaz de ordem  $h$ ;
- $I_h$  – corrente eficaz de ordem  $h$ ;
- $\theta_h$  – defasagem angular entre a tensão e corrente de ordem  $h$ .
- $N$  – ordem harmônica máxima.

Reestruturando o diagrama unificar da figura anterior e destacando-se as correntes atreladas aos componentes lineares, tem-se a figura 3.2.



*Figura 3.2 – Circuito equivalente reestruturado.*

As correntes indicadas são:

- $i_r(t)$  – corrente no componente resistivo;
- $i_{ind}(t)$  – corrente no componente indutivo;
- $i_{cap}(t)$  – corrente no componente capacitivo;
- $i_k(t)$  – corrente residual ou corrente representativa do conjunto de cargas não lineares;
- $i_{lck}(t)$  – composição das correntes no indutor, capacitor e residual;
- $i_{lk}(t)$  – composição das correntes no indutor e residual.

Nota-se, pela nomenclatura, que o domínio do tempo corresponde à técnica utilizada pelas referências que contemplam a modelagem de cargas agregadas e que serviram de base

para o presente trabalho. Todavia, em vista da técnica de análise já ressaltada anteriormente, ao final, os modelos utilizados nesta pesquisa estarão centrados em formulações que empregam o domínio da frequência como método de análise.

Na sequência são apresentadas as formulações destinadas ao cálculo dos componentes R, L e C.

### **a) Resistor**

O cálculo da resistência equivalente da carga, mantida inalterada para todas as ordens harmônicas, considera que este parâmetro é responsável pela potência ativa total absorvida pelo consumidor. Nestes termos, o primeiro passo consiste na determinação da potência ativa total  $P$  fornecida à carga. A partir da tensão e corrente medidas junto ao PAC tem-se a equação (3.3).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (3.3)$$

Utilizando conceitos básicos de circuitos elétricos tem-se que:

$$R = \frac{(V^m)^2}{P} \quad (3.4)$$

Sendo:

$V^m$  – Tensão eficaz medida no PAC.

Uma vez conhecida a resistência, torna-se possível a determinação das correntes harmônicas individuais que se estabelecem por este elemento. Estas podem ser determinadas através da expressão (3.5):

$$i_r(t) = \frac{v(t)}{R} = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m}{R} \cos(\omega t \cdot h) \quad (3.5)$$

As equações (3.4) e (3.5), convertidas para o domínio da frequência, resultam nas seguintes formulações:

$$R = \frac{(V^m)^2}{\sum_{h=1}^N V_h^m \cdot I_h^m \cdot \cos(\theta_h)} \quad (3.6)$$

$$I_h^r = \frac{V_h^m}{R} \quad (3.7)$$

Sendo:

$I_h^r$  – corrente harmônica de ordem  $h$  calculada para o resistor;

$V_h^m$  – tensão harmônica eficaz de ordem  $h$  medida no PAC;

$I_h^m$  – corrente harmônica eficaz de ordem  $h$  medida no PAC, excluída as ordens harmônicas não presentes na tensão;

Na expressão (3.6), de acordo com o defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica, valores negativos podem ocorrer para a potência ativa harmônica. Nesta condição, de fluxo de potência ativa no sentido carga-supridor, o resistor responsável por esta potência corresponde à componente resistiva da impedância do sistema supridor. Portanto, a expressão (3.6) não deve considerar estas ordens harmônicas, tanto para o cálculo da potência ativa quanto para o cálculo da tensão eficaz.

## b) Capacitor

Analisando o circuito apresentado na figura 3.2, e em consonância com a referência [37], a corrente equivalente aos elementos elemento indutivo e capacitivo, adicionada da componente residual, pode ser determinada através da equação (3.8).

$$i_{lck}(t) = i_m(t) - i_r(t) \quad (3.8)$$

Considerando que a corrente acima seja, à princípio, totalmente capacitiva, sua correlação com o pressuposto capacitor equivalente pode ser expressa como abaixo:

$$i_{lck}(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.9)$$

Multiplicando ambos os lados da equação (3.9) por  $(dv(t)/dt)$ , integrando o resultado ao longo de um período da frequência fundamental, e ainda, isolando a capacitância:

$$C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_{lck}(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} \cdot dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{dv(t)}{dt}^2 \cdot dt} \quad (3.10)$$

Como:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N h\omega \cdot V_h^m \cos(\omega t \cdot h + \frac{\pi}{2}) \quad (3.11)$$

A corrente no capacitor pode então ser determinada como a seguir:

$$i_{cap}(t) = \omega \cdot C \cdot \sqrt{2} \sum_{h=1}^N h \cdot V_h^m \cos(\omega t \cdot h + \frac{\pi}{2}) \quad (3.12)$$

As equações (3.10) e (3.12) transformadas para o domínio da frequência [37], resultam em:

$$C = \frac{\sum_{h=1}^N h \cdot V_h^m \cdot I_h^{lck} \cdot \text{sen}(-\theta_h)}{\omega \cdot \sum_{h=1}^N h^2 \cdot (V_h^m)^2} \quad (3.13)$$

$$\dot{I}_h^{cap} = j \cdot \dot{V}_h^m \cdot \omega \cdot h \cdot C \quad (3.14)$$

De forma a contornar eventuais sinais negativos para o valor da capacitância equivalente, a equação (3.14) deve considerar apenas os termos associados a um deslocamento angular harmônico que resulte numa potência harmônica reativa negativa (capacitor). Esta consideração não é utilizada pelas referências consultadas, fato este que pode, para algumas situações, produzir capacitâncias equivalentes negativas, o que traz grandes dificuldades no processo da interpretação do circuito equivalente almejado.

Não obstante à questão do sinal da potência harmônica reativa, o valor da potência ativa também deve ser observado, pois dependendo do sentido deste fluxo de potência (carga-supridor ou supridor-carga), uma potência harmônica reativa negativa não necessariamente corresponde a um elemento capacitivo. Portanto, potência harmônica reativa capacitiva corresponde àquela cujo sinal seja oposto ao sinal da potência harmônica ativa correspondente.

Uma observação pertinente ao tema acima discutido refere-se à situação que envolve sinais com distorções harmônicas individuais de tensão típicas (menores que 10%). Sob tais circunstâncias a componente fundamental é dominante no somatório e, em vista do fato que a frequência de 60 [Hz] a carga é normalmente indutiva, a parcela referente a esta componente seria negativa no numerador (caso a mesma fosse incorporada nos cálculos). Diante disto, as parcelas positivas das ordens harmônicas não seriam suficientes para compensar o valor

negativo e isto ocasionaria uma capacitância negativa. Esta condição não foi destacada nas referências estudadas, visto que estas sempre utilizaram níveis de distorções de tensão bastante superiores aos padrões encontrados em sistemas reais.

### **c) Indutor**

Uma vez conhecida a resistência e o capacitor equivalentes, a seqüência dos trabalhos é direcionada ao cálculo da indutância representativa da carga. Para tanto, seguindo o mesmo procedimento anteriormente empregado, subtraindo-se da expressão (3.8) a corrente associada com o funcionamento do capacitor, obtém-se a corrente remanescente associada com o indutor e a geração harmônica mostrada na figura 3.2. Esta corrente é expressa por:

$$i_{lk}(t) = i_{lck}(t) - i_{cap}(t) \quad (3.15)$$

Mais uma vez, admitindo que a corrente remanescente, numa primeira hipótese, esteja totalmente relacionada com a operação do indutor, pode-se escrever:

$$i_{lk}(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t v(t) dt \quad (3.16)$$

Fazendo:

$$y(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (3.17)$$

Multiplicando ambos os lados de (3.16) por (3.17), integrando e isolando a indutância e isolando a indutância desejada, chega-se a:

$$L = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i_k(t) \cdot y(t) dt} \quad (3.18)$$

A corrente no indutor pode também ser expressa por:

$$i_l(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m}{\omega \cdot h \cdot L} \cos(\omega t \cdot h - \frac{\pi}{2}) \quad (3.19)$$

Utilizando o domínio da frequência [37], as formulações anteriores são transformadas nas expressões a seguir:

$$L = \frac{\sum_{h=1}^N \frac{V_h^{m2}}{h^2}}{\omega \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m \cdot I_h^{lk} \cdot \text{sen}(\theta_h)}{h}} \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_h^{ind} = \frac{\dot{V}_h^m}{j \cdot \omega \cdot h \cdot L} \quad (3.21)$$

Da mesma forma que para o capacitor, diante das possibilidades para o ângulo de deslocamento para as componentes harmônicas, há a possibilidade de se obter termos negativos para os componentes que perfazem o denominador da equação (3.20). Diante desta conjuntura torna-se relevante, como já discutido para o capacitor equivalente, que apenas as parcelas positivas de potências harmônicas reativas sejam inseridas no processo de cálculo.

#### **d) Corrente Residual**

Naturalmente, a corrente remanescente ou residual corresponde à subtração da componente  $i_{lk}$  da corrente resultante no ramo do indutor, conforme expresso em 3.22.

$$i_k(t) = i_{lk}(t) - i_l(t) \quad (3.22)$$

#### **e) Carga Equivalente**

De posse dos valores de R, L e C, a carga equivalente do consumidor é então caracterizada pelo arranjo paralelo destes componentes. Isto determina a expressão para a impedância harmônica equivalente à carga conforme determina a equação (3.22).

$$\dot{Z}_h^c = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot h \cdot L} + j \cdot \omega \cdot h \cdot C \right)^{-1} \quad (3.23)$$

A impedância acima, em conjunto com a impedância harmônica representativa do sistema supridor, adicionando as informações advindas das medições da tensão e corrente no PAC, perfazem os dados necessários à aplicação da metodologia da superposição para os fins aqui delineados.

### **3.3 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROPOSTA DE MODELAGEM DA CARGA**

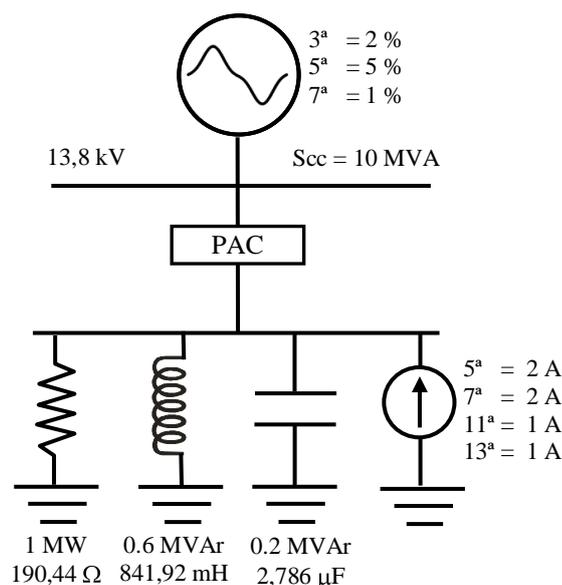
Objetivando avaliar o desempenho da metodologia de modelagem proposta, estudos computacionais no domínio da frequência foram executados valendo-se do mesmo sistema teste utilizado no capítulo anterior. Os estudos, como esclarecido na seqüência, consideram uma mistura entre as situações denominadas por ideais e não-ideais. O termo ideal refere-se ao uso da impedância admitida como correta para o supridor, enquanto que a designação não ideal está atrelada com desvios aleatórios para os módulos e ângulos deste parâmetro.

O processo avaliativo compreende cinco situações distintas, a saber:

- **Caso 01:** sistema supridor puramente senoidal, suprindo as cargas lineares e não-lineares do sistema teste;
- **Caso 02:** sistema supridor contendo distorções, suprindo somente os componentes lineares;
- **Caso 03:** sistema supridor com distorções, alimentando cargas lineares e não-lineares.
- **Caso 04:** Idem ao Caso 03, com desvio de 10% na impedância da concessionária;
- **Caso 05:** Idem ao Caso 04, com desvio de  $-10^\circ$  no ângulo da impedância de curto-circuito.

No que se refere ao consumidor, este foi modelado nos termos estabelecidos neste capítulo, ou seja, através da combinação paralela dos componentes equivalentes R, L e C, adicionados ainda da injeção harmônica residual.

Para melhor clareza das informações, o diagrama unifilar do sistema teste é transcrito na figura 3.3.



*Figura 3.3 – Diagrama unifilar do sistema teste – Caso 03.*

### **a) Caso 01**

A investigação em pauta considera a concessionária sem distorções harmônicas, suprindo cargas lineares e não-lineares, ou seja, para esta condição, os valores das tensões harmônicas resultantes da simulação são pré-definidos como de inteira responsabilidade do consumidor.

A tabela 3.1 apresenta os resultados computacionais obtidos para esta condição, indicando também os valores de distorções esperados para as ordens harmônicas consideradas. Todas as tensões estão referenciadas ao valor fundamental de 7.967 [V], valor este correspondente ao nominal fase-neutro.

*Tabela 3.1 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 01*

<i>h</i>	Distorções de tensão						
	PAC	Concessionária			Consumidor		
		Esperado	Calculado	Erro	Esperado	Calculado	Erro
<b>5<sup>a</sup></b>	3,18 %	-	0,01 %	ND	3,18 %	3,19 %	0,31 %
<b>7<sup>a</sup></b>	4,75 %	-	0,01 %	ND	4,75 %	4,74 %	-0,21 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	0,01 %	ND	1,50 %	1,51 %	0,67 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	0,01 %	ND	1,17 %	1,17 %	0,00 %
<b>DTHT</b>	6,03 %	-	0,02 %	ND	6,03 %	6,03 %	0,00 %

Da mesma forma que os resultados obtidos no capítulo anterior, os erros de cálculo são mínimos, indicando, pois total consistência do desempenho do método diante das expectativas para o presente caso.

As formas de onda da tensão e corrente obtidas junto ao PAC não são aqui repetidas por serem exatamente as mesmas já indicadas na figura 2.5. O mesmo pode ser afirmado para as impedâncias da concessionária, tensões e correntes harmônicas, presentes na tabela 2.2. No que tange às impedâncias harmônicas do consumidor, a tabela 3.2 explicita os valores resultantes da metodologia de cálculo adotada.

*Tabela 3.2 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Condição 1*

<b>Parâmetro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>R [Ω]</b>	190,44	191,12	0,36 %
<b>L [mH]</b>	841,93	836,15	-0,69 %
<b>C [μF]</b>	2,786	2,842	2,01 %

Observando os valores dos parâmetros adotados nos estudos (considerados como referências) e aqueles determinados através do processo estabelecido, constata-se uma grande concordância entre os mesmos. Isto revela que, nesta primeira avaliação, o procedimento utilizado para a determinação dos parâmetros equivalentes à carga se mostra bastante apropriados aos fins aqui almejados.

## b) Caso 02

Diferentemente do estudo anterior, a presente avaliação compreende uma situação operacional tal que as distorções harmônicas são, por princípio, totalmente vinculadas com a fonte de suprimento. As componentes harmônicas admitidas presentes junto ao suprimento correspondem às ordens 3, 5 e 7. Os valores percentuais das mesmas estão indicados na tabela 3.3, a qual mostra também os valores resultantes do processo da separação das distorções harmônicas entre as partes.

*Tabela 3.3 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 02*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	1,95 %	-2,50 %	-	0,06 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	5,00 %	5,00 %	4,59 %	-8,20 %	-	0,53 %	ND
<b>7<sup>a</sup></b>	1,00 %	1,00 %	0,95 %	-5,00 %	-	0,23 %	ND
<b>DTHT</b>	5,48 %	5,48 %	5,08 %	-7,30 %	-	0,58 %	ND

Novamente, os erros detectados são pequenos e não afetam significativamente o desempenho do processo da separação das parcelas de responsabilidade, evidenciando, também para este caso, a eficácia da metodologia de cálculo da impedância equivalente do consumidor.

A tabela 3.4 apresenta os parâmetros da carga calculados para esta situação operacional.

*Tabela 3.4 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Caso 02*

<b>Parâmetro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>R [Ω]</b>	190,44	190,43	-0,01 %
<b>L [mH]</b>	841,93	895,98	6,42 %
<b>C [μF]</b>	2,786	2,283	-18,05 %

Mais uma vez, os erros entre os parâmetros utilizados e os calculados são aceitáveis e justificáveis pela pequena quantidade de ordens harmônicas consideradas.

### c) Caso 03

Desta vez, o consumidor e a concessionária possuem características determinantes na distorção da tensão do PAC. Os valores das distorções de tensão adotados para o barramento de suprimento e as injeções harmônicas provenientes da carga encontram-se destacadas na figura 3.1.

Os resultados da aplicação da metodologia para separação das responsabilidades encontram-se apresentados na tabela 3.5.

*Tabela 3.5 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 03*

<i>h</i>	Distorções de tensão						
	PAC	Concessionária			Consumidor		
		Esperado	Calculado	Erro	Esperado	Calculado	Erro
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,02 %	1,00 %	-	0,02 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	7,51 %	5,00 %	5,09 %	1,80 %	3,18 %	3,17 %	-0,31 %
<b>7<sup>a</sup></b>	5,74 %	1,00 %	1,02 %	2,00 %	4,75 %	4,74 %	-0,21 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	0,01 %	ND	1,50 %	1,51 %	0,67 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	0,00 %	ND	1,17 %	1,17 %	0,00 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	5,57 %	1,64 %	6,03 %	6,01 %	-0,33 %

A metodologia também mostrou-se adequada para o caso em questão, indicando de forma correta os responsáveis pelas distorções harmônicas medidas no PAC.

A tabela 3.6 fornece os valores dos parâmetros equivalentes da carga para a presente situação. Os mesmos se mostram em total consonância com as expectativas.

*Tabela 3.6 – Impedâncias equivalentes do consumidor – Caso 03*

Parâmetro	Esperado	Calculado	Erro
<b>R [Ω]</b>	190,44	191,66	0,64 %
<b>L [mH]</b>	841,93	832,18	-1,16 %
<b>C [μF]</b>	2,786	2,886	3,59 %

#### **d) Caso 04**

Esta condição operacional repete a situação imposta para o Caso 03, todavia, considerando a possibilidade de erros no processo de estimação da impedância do sistema supridor, adota-se, aleatoriamente, que o valor utilizado para os cálculos se apresenta com um desvio de 10% (em módulo). A tabela 3.7 mostra os resultados finais obtidos.

*Tabela 3.7 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 04*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,02 %	1,00 %	-	0,02 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	7,51 %	5,00 %	5,51 %	10,20 %	3,18 %	2,84 %	-10,69 %
<b>7<sup>a</sup></b>	5,74 %	1,00 %	1,47 %	47,00 %	4,75 %	4,63 %	-2,53 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	0,10 %	ND	1,50 %	1,59 %	6,00 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	0,05 %	ND	1,17 %	1,21 %	3,42 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	6,05 %	10,40 %	6,03 %	5,79 %	-3,98 %

De um modo geral, percebe-se que o desempenho do método não foi significativamente afetado para as ordens harmônicas contempladas, a não ser pela componente de ordem 7. O resultado obtido para esta ordem, atribuída ao sistema supridor, apresentou-se com uma discrepância elevada em relação ao valor esperado. No entanto, apesar desta ocorrência, a parcela referente ao consumidor continua a dominar e não houve maiores prejuízos quanto à questão da separação das responsabilidades. Como justificativa para a questão detectada argumenta-se que, além da introdução de um erro proposital na impedância, há ainda a se considerar que o assunto trata de níveis bastante pequenos (em torno de 1%) e estes são fortemente influenciados por qualquer imprecisão de valores e de metodologia.

Os valores referentes à impedância do consumidor são os mesmos da condição anterior, visto que as tensões e correntes obtidas no PAC não foram alteradas, sendo desnecessária sua rerepresentação.

**e) Caso 05**

Nesta última condição operacional, os desvios adotados para a impedância da concessionária são, supostamente, ainda maiores. Isto se materializa através de um erro de 10° no ângulo da impedância da concessionária e de 10% da magnitude da mesma grandeza. Os resultados computacionais obtidos sob tais condições são mostrados na tabela 3.8.

*Tabela 3.8 – Avaliação computacional da modelagem da carga equivalente do consumidor – Caso 05*

<i>h</i>	<b>Distorções de tensão</b>						
	<b>PAC</b>	<b>Concessionária</b>			<b>Consumidor</b>		
		<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>	<b>Esperado</b>	<b>Calculado</b>	<b>Erro</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	2,00 %	2,00 %	2,01 %	0,50 %	-	0,01 %	ND
<b>5<sup>a</sup></b>	7,51 %	5,00 %	5,41 %	8,20 %	3,18 %	2,49 %	-21,70 %
<b>7<sup>a</sup></b>	5,74 %	1,00 %	2,15 %	115,00 %	4,75 %	3,67 %	-22,74 %
<b>11<sup>a</sup></b>	1,50 %	-	0,17 %	ND	1,50 %	1,47 %	-2,00 %
<b>13<sup>a</sup></b>	1,17 %	-	0,09 %	ND	1,17 %	1,16 %	-0,85 %
<b>DTHT</b>	9,85 %	5,48 %	5,98 %	9,12 %	6,03 %	4,81 %	-20,23 %

Os resultados revelam que o método apresentou um bom desempenho para as componentes harmônicas de ordem 3, 11 e 13, enquanto que para as demais componentes os erros se mostraram acentuados. Mesmo assim, não houve inversão quanto ao processo da atribuição da responsabilidade sobre as distorções individuais. Portanto, os desempenhos do processo aqui discutidos determinam a relevância quando ao fornecimento de informações mais exatas sobre a impedância da concessionária. Esta grandeza deve ser motivo de constante atualização para melhor adequar os procedimentos propostos por esta pesquisa.

### **3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A modelagem de cargas lineares e não-lineares agregadas, objeto deste capítulo, apesar de fundamentada no domínio do tempo permite a conversão para o domínio da frequência, mantendo assim o padrão adotado para esta tese. A base dos desenvolvimentos está alicerçada na associação paralela de elementos lineares e não-lineares, sendo uma resistência, um capacitor e um indutor os representantes da parcela linear da carga, enquanto que a não-linear é representada por uma fonte de correntes harmônicas.

As formulações apresentadas no corpo deste capítulo exigem a inclusão de condicionantes para o cálculo da impedância equivalente do consumidor. Estas condições são relativas ao sentido das potências harmônicas ativa e reativa medidas no PAC. Assim, dependendo do sentido do fluxo (carga-supridora ou supridora-carga), diferentes condições de contorno são adotadas de forma a compatibilizar o sinal medido com o componente físico sob análise. Este processo, conforme observado no processo de validação computacional, implicou em valores próximos daqueles esperados para os componentes R, L e C. Neste ponto vale ressaltar que, o cálculo referente à fonte de corrente decorrente da parcela não-linear da carga do consumidor não se faz necessário, pois, indiretamente, o critério da superposição já indica este valor, sendo, portanto, redundante este procedimento.

O processo de validação computacional comprovou a eficácia da metodologia para as condições operacionais consideradas, não havendo inversão da responsabilidade sobre as distorções mesmo quando imprecisões para o valor da impedância da concessionária são adotadas. Assim, de uma forma geral, a modelagem da carga equivalente do consumidor mostrou-se satisfatória na representação do conjunto de elementos lineares e não-lineares presentes nas instalações consumidoras. Visando complementar as análises computacionais, ensaios laboratoriais são conduzidos no Capítulo V.

# APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA A ATRIBUIÇÃO DAS RESPONSABILIDADES

## 4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A elaboração de uma sistemática de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, em consonância com os objetivos almejados pela presente Tese, está apoiada no conhecimento e análise dos sinais de tensão e corrente adquiridos junto ao ponto de acoplamento comum entre o supridor e o consumidor. Estas informações são advindas de equipamentos comerciais, os quais se destinam à amostragem das tensões e correntes, e respectivas decomposições, à cada intervalo de tempo, através da Série de Fourier [2]. A partir deste banco de dados, empregando as técnicas exploradas nos capítulos anteriores, torna-se factível os cálculos voltados para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, nos termos discutidos.

Neste momento cabe uma reflexão sobre as opções cabíveis aos processos de cálculo com o objetivo final de definir as parcelas de responsabilidades sobre as distorções entre as partes envolvidas. Uma delas consistiria em utilizar as informações e processar internamente, no próprio equipamento de medição, os cálculos definidos pela proposta desta tese. Uma outra estaria alicerçada numa sistematização, via um aplicativo implementado num computador externo, dos procedimentos elaborados. Nesta última opção haveria, naturalmente, a

necessidade de uma comunicação entre o medidor empregado e o computador. Tendo em vista que a primeira solução exigiria alterações de *firmware* e isto somente seria factível ao fabricante, esta tese utilizará a segunda alternativa.

Diante deste contexto, o presente capítulo, destinado a apresentar o aplicativo desenvolvido para a avaliação do compartilhamento das responsabilidades das distorções harmônicas entre um supridor e um consumidor, encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Elaboração da estrutura computacional destinada à implementação da metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas;
- Desenvolvimento de uma interface computacional entre o equipamento de medição e o usuário final para tratamento dos sinais medidos e aplicação da metodologia proposta;
- Configuração do aplicativo para a utilização em conjunto com um determinado equipamento de medição.

## **4.2 – ESTRUTURA DO APLICATIVO**

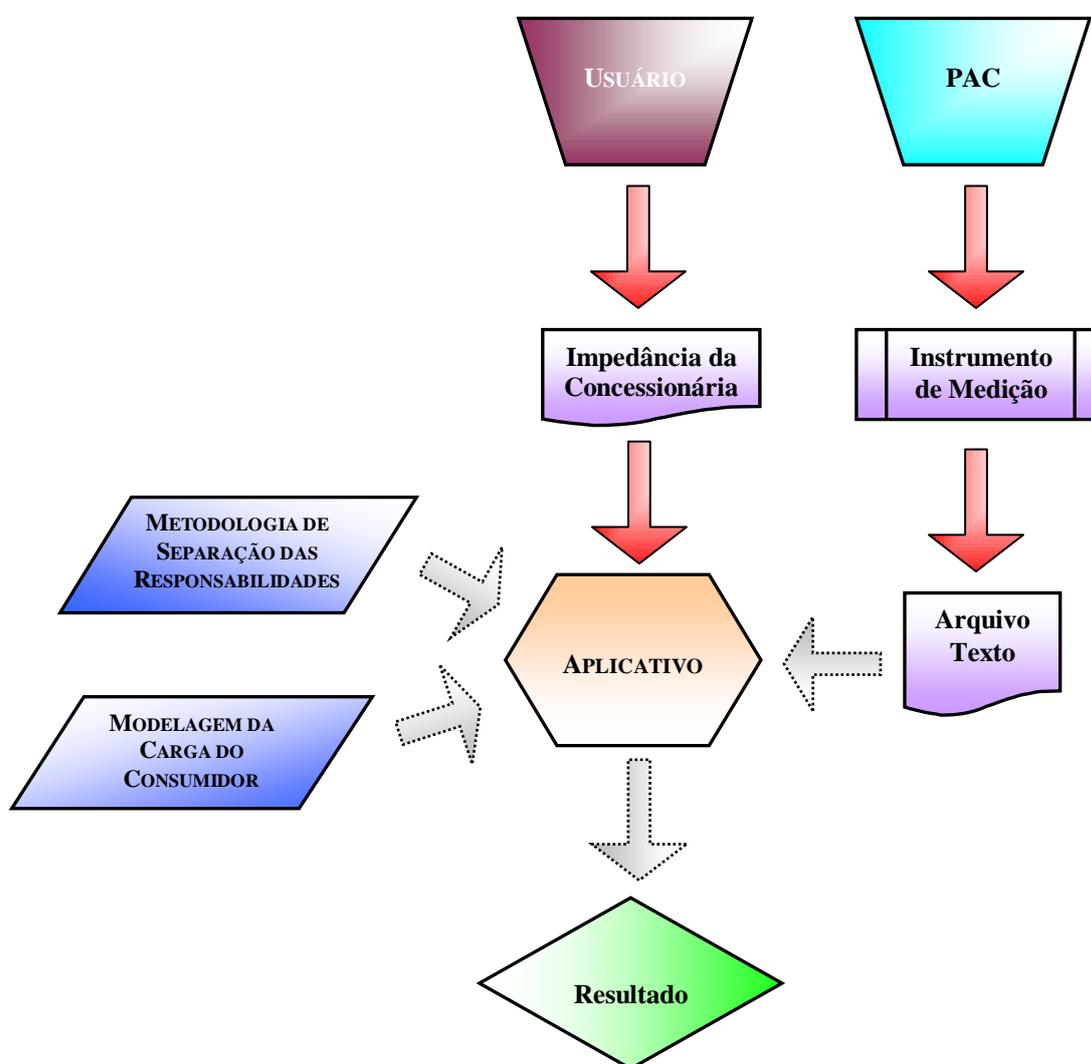
A plataforma computacional, para análise das responsabilidades sobre as distorções, está estruturada de forma a viabilizar as seguintes ações:

- Importação dos registros de tensão e corrente realizados por um determinado equipamento de medição de harmônicos;
- Tratamento dos sinais de forma a evitar eventuais desvios decorrentes da instalação incorreta do instrumento de medição ou mesmo de imprecisões advindas dos sensores de tensão e/ou corrente;
- Inserção dos dados relativos à impedância do sistema supridor;
- Aplicação da metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções;

- Visualização dos resultados obtidos na forma de gráficos e tabelas para cada amostra do sinal medido.

Esta estrutura deve primar por ações, configurações e interfaces que minimizem a possibilidade de ocorrência de erros, e sua propagação, advindos dos sinais medidos ou em falhas na de entrada de dados por parte do usuário.

Tendo como base estas premissas, o diagrama ilustrado na figura 4.1 sintetiza as funções a serem desempenhadas pelo aplicativo ATRES (Atribuição de Responsabilidade).



*Figura 4.1 – Esquema simplificado da estrutura do aplicativo ATRES.*

No diagrama anterior, as setas pontilhadas indicam processos de comunicação sem a interferência do usuário, enquanto que as setas em vermelho representam ações com envolvimento do operador.

De um modo geral, os blocos indicados na figura anterior possuem os seguintes atributos:

- Aplicativo ATRES

Corresponde ao centro de comando da plataforma computacional de análise das responsabilidades sobre as distorções. Muito embora seja constituído por um único arquivo executável, internamente é composto de diversos módulos responsáveis pelas diferentes etapas de elaboração do processo de separação das distorções harmônicas provenientes do consumidor daquelas oriundas do sistema supridor. Neste particular, um conjunto de componentes, janelas, gráficos, funções e procedimentos computacionais são atrelados de forma a comportar as exigências do processo de entrada e tratamento de dados, cálculos e publicação dos resultados. Este aplicativo computacional corresponde à interface entre o usuário final e o instrumento de medição.

- Instrumento de Medição e PAC

Os sinais de tensão e corrente no ponto de acoplamento são registrados por um instrumento de medição apropriado a sinais distorcidos. Estes registros formam a base do processo de cálculo das responsabilidades e devem conter os módulos e ângulos de todas as ordens harmônicas sob análise.

- Arquivo Texto

A utilização de um equipamento comercial implica na indisponibilidade de acesso direto aos registros contidos na memória de massa do mesmo. Esta dificuldade é contornada através da exportação dos registros para arquivos texto. Esta função é comum à grande maioria dos equipamentos de medição e exige que o usuário utilize o *software* do próprio instrumento para criar este arquivo de dados.

- Metodologia de Separação das Responsabilidades

Conjunto de funções e procedimentos de cálculo fundamentados no domínio da frequência conforme formulações contidas no capítulo II.

- Modelagem da Carga do Consumidor

Formulações e condicionantes aplicadas aos sinais medidos para estimação da impedância equivalente do consumidor, de acordo com as premissas do capítulo III.

- Usuário e Impedância da Concessionária

O usuário final é responsável pela inserção da impedância harmônica da concessionária e, caso seja necessário, pela entrada dos dados necessários à correção dos parâmetros medidos.

- Resultados

Ao final do processo de separação das responsabilidades, os valores das distorções harmônicas obtidas para o consumidor e para a concessionária são apresentados na forma de tabelas e gráficos, fornecendo a almejada separação das responsabilidades.

## **4.3 – MÓDULOS DO APLICATIVO ATRES**

Internamente, o ATRES é composto por diversos módulos computacionais, os quais são responsáveis por ações que compreendem atividades desde a entrada de dados até a análise dos resultados finais. Estes blocos de código são separados de acordo com sua função, possibilitando que um conjunto de algoritmos seja estruturado para atender a todas as etapas do processo de cálculo das responsabilidades. Na seqüência os principais módulos são apresentados e detalhados.

### **a) Módulo de Importação**

Este módulo corresponde à primeira ação a ser tomada pelo usuário e pelo aplicativo: a importação das tensões e correntes harmônicas registradas pelo equipamento de medição. Portanto, antes da execução do ATRES, faz-se necessário que o usuário acesse os registros originais utilizando o *software* do próprio equipamento e exporte todas as tensões e correntes harmônicas para um arquivo texto.

Este arquivo, necessariamente, deve conter, para cada amostra os seguintes dados:

- Data e hora do registro;
- Tipo do parâmetro: tensão ou corrente;
- Indicação(ões) da(s) fase(s) monitorada(s);
- Ordem, módulo e ângulo de cada harmônica medida.

Cada fabricante de equipamento de medição possui estruturas próprias de exportação de dados. Assim, para cada fabricante, ou mesmo para cada configuração de parâmetros internos de medição, diferentes formas de exportação são encontradas.

Diante do exposto fica evidente a dificuldade de obtenção de uma ferramenta computacional genérica capaz de importar registros de qualquer fabricante. Logo, neste trabalho, os desenvolvimentos foram concentrados na identificação dos arquivos textos exportados pelo equipamento MARH-21 [38], instrumento este disponibilizado pela Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

A figura 4.2 ilustra a forma de exportação deste fabricante, quando o instrumento está configurado para operação no módulo “Harmônicos”.

Fund Pico	DHT	0	1	2	3	4	5	6	7
10:56:10	06/06/2007		QUA						
186070,567	0,701	0,072	100,000	0,060	0,201	0,100	0,153	0,051	0,136
	0,00	0,65	164,68	176,11	327,59	50,64	93,49	249,23	56,91
187827,752	0,700	0,012	100,000	0,077	0,114	0,076	0,168	0,029	0,060
	0,00	240,52	257,22	130,68	83,87	152,70	43,35	90,82	213,60
186940,602	0,858	0,000	100,000	0,140	0,203	0,147	0,173	0,090	0,106
	0,00	120,10	44,90	109,06	181,87	303,41	219,48	89,66	354,25
468,789	2,795	0,069	100,000	0,125	0,103	0,016	0,079	0,048	0,096
	0,00	327,18	279,79	240,37	162,66	73,57	354,59	107,20	348,32
469,962	3,066	0,050	100,000	0,050	0,187	0,027	0,087	0,033	0,027
	0,00	208,03	286,56	283,19	177,93	151,38	237,69	154,79	127,28
474,176	2,940	0,039	100,000	0,148	0,190	0,077	0,138	0,019	0,129
	0,00	87,54	98,03	161,39	4,15	300,33	189,93	308,22	263,93
10:56:20	06/06/2007		QUA						
186097,483	0,729	0,081	100,000	0,138	0,217	0,046	0,176	0,040	0,063
	0,00	1,07	150,45	180,98	340,23	32,02	144,80	256,00	85,96
188212,923	0,701	0,018	100,000	0,034	0,060	0,108	0,237	0,077	0,039
	0,00	240,90	22,76	170,39	89,84	174,68	18,70	238,35	226,14
187109,227	0,806	0,044	100,000	0,128	0,248	0,104	0,175	0,127	0,132
	0,00	120,48	13,35	119,00	211,05	305,56	227,08	74,04	319,29
466,552	2,986	0,074	100,000	0,186	0,148	0,032	0,112	0,031	0,097
	0,00	327,90	301,31	223,45	75,79	101,65	54,75	120,42	7,29
468,465	3,157	0,141	100,000	0,040	0,151	0,062	0,093	0,052	0,057
	0,00	208,84	337,27	263,51	186,28	156,57	215,66	143,33	128,11
472,874	3,050	0,000	100,000	0,207	0,201	0,037	0,133	0,014	0,128
	0,00	88,25	122,30	168,92	343,81	290,34	111,40	306,33	253,52

*Figura 4.2 – Exemplo de Arquivo texto exportado por [38].*

Na figura, observa-se que, cada amostra, preenche 13 linhas do arquivo (não considerando a linha de título). Neste exemplo, cada linha de dados indica os seguintes parâmetros:

- Linha 1: data e hora do registro;
- Linhas 2, 4 e 6: módulo das tensões harmônicas das fases A, B e C, respectivamente;
- Linhas 3, 4 e 7: ângulo das tensões harmônicas das fases A, B e C, respectivamente;

- Linhas 8, 10 e 12: módulo das correntes harmônicas das fases A, B e C, respectivamente;
- Linhas 9, 11 e 13: ângulo das correntes harmônicas das fases A, B e C, respectivamente.

Quanto às colunas, a primeira indica o valor de pico da fundamental e as demais apresentam os valores percentuais para cada ordem harmônica em relação ao valor fundamental.

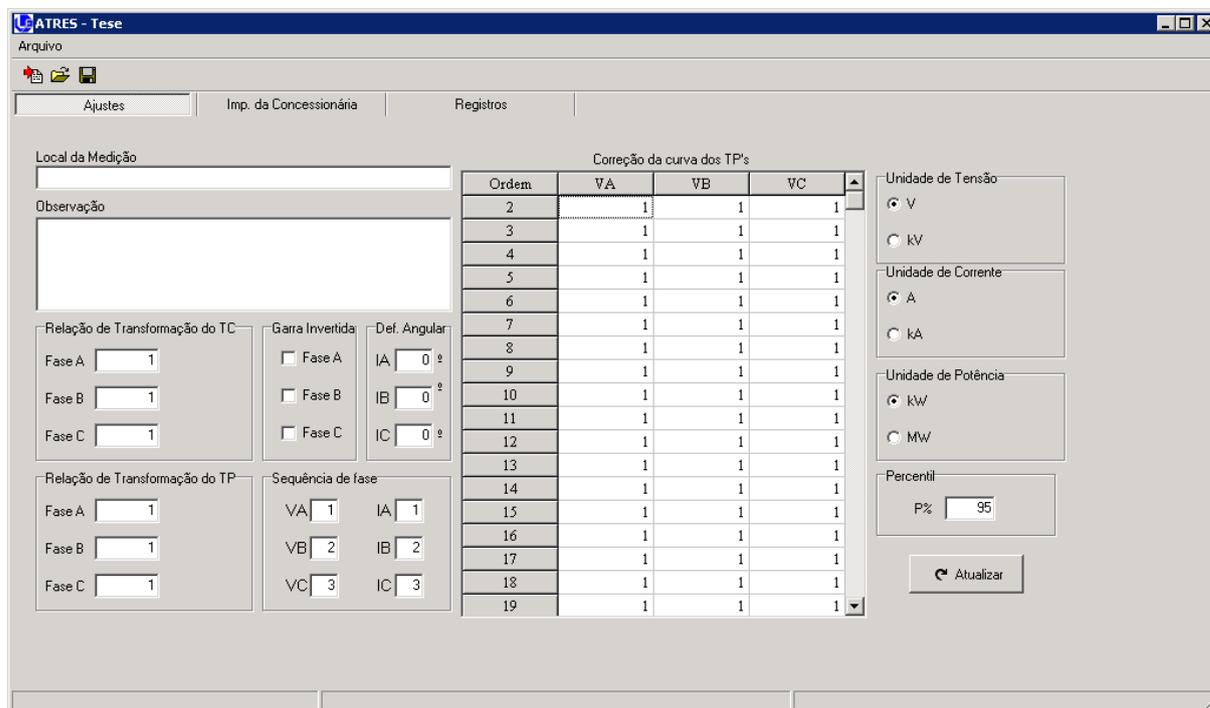
Muito embora a formatação acima seja específica para o equipamento mencionado, não há maiores impedimentos para a importação de arquivos provenientes de outros fabricantes, para tanto, basta adaptar este módulo à nova formatação.

Ao término da importação, todos os registros são armazenados na forma de vetores correspondentes a cada sinal avaliado.

## **b) Módulo de Tratamento dos Dados**

Após a importação, os valores das tensões e correntes para cada amostra estão disponíveis para aplicação da metodologia de separação das responsabilidades entre o supridor e o consumidor. No entanto, de forma a evitar erros provocados por conexões erradas em campo ou mesmo imprecisões advindas dos sensores empregados nas medições, a adequação/correção dos sinais medidos é imprescindível para um diagnóstico seguro e preciso.

As ferramentas para esta adequação estão contidas no módulo de tratamento de dados. A figura 4.3 ilustra a tela de entrada dos dados deste módulo.



*Figura 4.3 – Tela de tratamento dos dados de medição.*

Além de observações sobre a medição e o local da mesma, a figura oferece diversos campos para entrada de informações relativas aos parâmetros medidos. Estes campos estão relacionados a correções que porventura sejam necessárias, conforme descrição abaixo:

- **Garra invertida:** quando da utilização de garras de medição, devido a dificuldades de acesso ou mesmo descuido do técnico responsável pelas conexões, frequentemente, uma ou mais das fases de corrente estão invertidas, ou seja, o sentido positivo do fluxo de potência está invertido em relação ao sentido indicado na garra. Deste fato decorrem erros nos cálculos das potências entre outros, e podem inviabilizar a aplicação da metodologia de separação das responsabilidades. Diante desta possibilidade, mesmo após o término das medições, a correção do sentido da garra permite a adequação dos sinais de corrente aos objetivos deste trabalho;
- **Erro de fase:** garras de medição ou mesmo medição direta de corrente inserem defasamentos angulares nos sinais medidos. Estes valores, muito embora pequenos,

podem afetar de forma contundente a avaliação das responsabilidades sobre as distorções. Isto se deve ao fato que pequenos defasamentos angulares, à frequência fundamental, resultam em defasamentos significativos nas harmônicas de maior ordem. Devido ao custo elevado, a grande maioria dos equipamentos nacionais utiliza garras de medição inadequadas à análise da qualidade da energia. Assim, uma ferramenta computacional destinada ao tratamento destes sinais deve permitir a correção destes deslocamentos.

- Relação de transformação de TPs e TCs: a correção do módulo dos sinais de tensão e corrente também são contempladas pela ferramenta desenvolvida. Estes parâmetros permitem a inclusão da relação de transformação dos transformadores de potencial e de corrente, além de possibilitar a correção de erros em módulo dos sensores.
- Seqüência de Fase: em sistemas trifásicos a seqüência de fase incorreta também pode inviabilizar toda uma campanha de medições. Assim sendo, os ajustes das seqüências de fase das tensões e correntes são indispensáveis a cálculos que exigem a correta correlação entre tensão e corrente, como é o caso da metodologia proposta.
- Curva de TPs: a monitoração de sistemas de média e alta tensão exige a utilização de transformadores de potencial. Estes sensores, dependendo do nível de tensão e do tipo de TP empregado, apresentam erros distintos para cada ordem harmônica [34]. Portanto, através de dados provenientes de ensaios com estes elementos é possível a correção, via *software*, dos valores registrados.
- Probabilidade de Ocorrência (Percentil): padrões, normas e recomendações sobre distorções harmônicas, empregam ferramentas estatísticas para a indicação de um único valor representativo de todo um período de monitoração (normalmente 7 dias consecutivos). Além dos níveis médios e máximos, estes documentos utilizam a

probabilidade de ocorrência para cada ordem harmônica. Normalmente, o valor de 95% é utilizado nestes cálculos.

- Outros: além de permitir todos os ajustes acima mencionados, o *software* de análise possibilita a configuração das unidades de tensão, corrente e potência.

Ao preencher qualquer dos campos relativos ao tratamento dos dados o usuário deve acionar o botão **Atualizar** para corrigir a medição atual. Ao término deste procedimento as medições foram atualizadas e estão de acordo com as exigências impostas pelo processo de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

Por fim, o usuário deve fornecer os valores das impedâncias harmônicas representativas do sistema elétrico sob responsabilidade da concessionária, conforme ilustrado pela figura 4.4.

Ordem	ZA - Módulo	ZA - Ângulo	ZB - Módulo	ZB - Ângulo	ZC - Módulo	ZC - Ângulo
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						

*Figura 4.4 – Entrada de dados da impedância da concessionária.*

### **c) Módulo de Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

Neste módulo são realizados todos os cálculos relacionados com o processo de separação das distorções entre o consumidor e a concessionária. A proposta de modelagem da carga do consumidor utiliza os valores das tensões e correntes, ajustadas no módulo anterior, para o cálculo da resistência, indutância e capacitância equivalentes da carga. Os cálculos destes parâmetros, entre outros, é função deste módulo. A figura 4.5 exemplifica, através de um fluxograma, o processo de cálculo do resistor equivalente do consumidor.

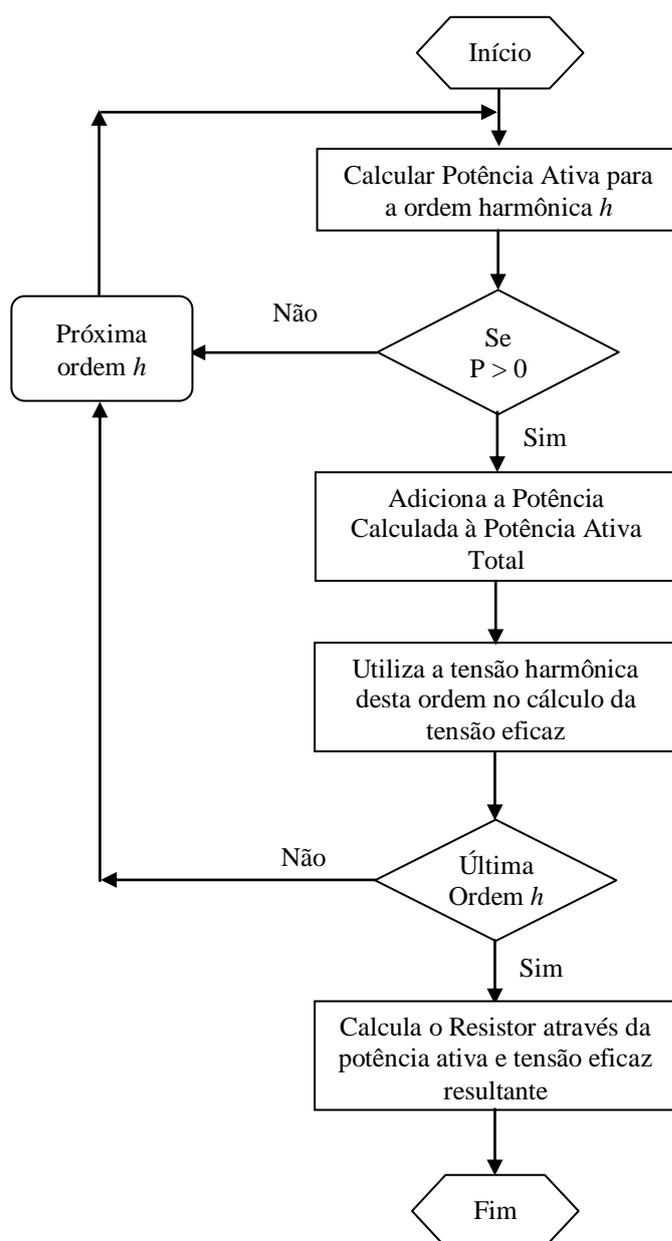


Figura 4.5 – Fluxograma de cálculo do resistor equivalente do consumidor.

Concluído o processo de cálculo do resistor procede-se ao cálculo da corrente remanescente para capacitor, indutor e fonte de corrente. O valor do capacitor equivalente é determinado conforme o fluxograma simplificado abaixo.

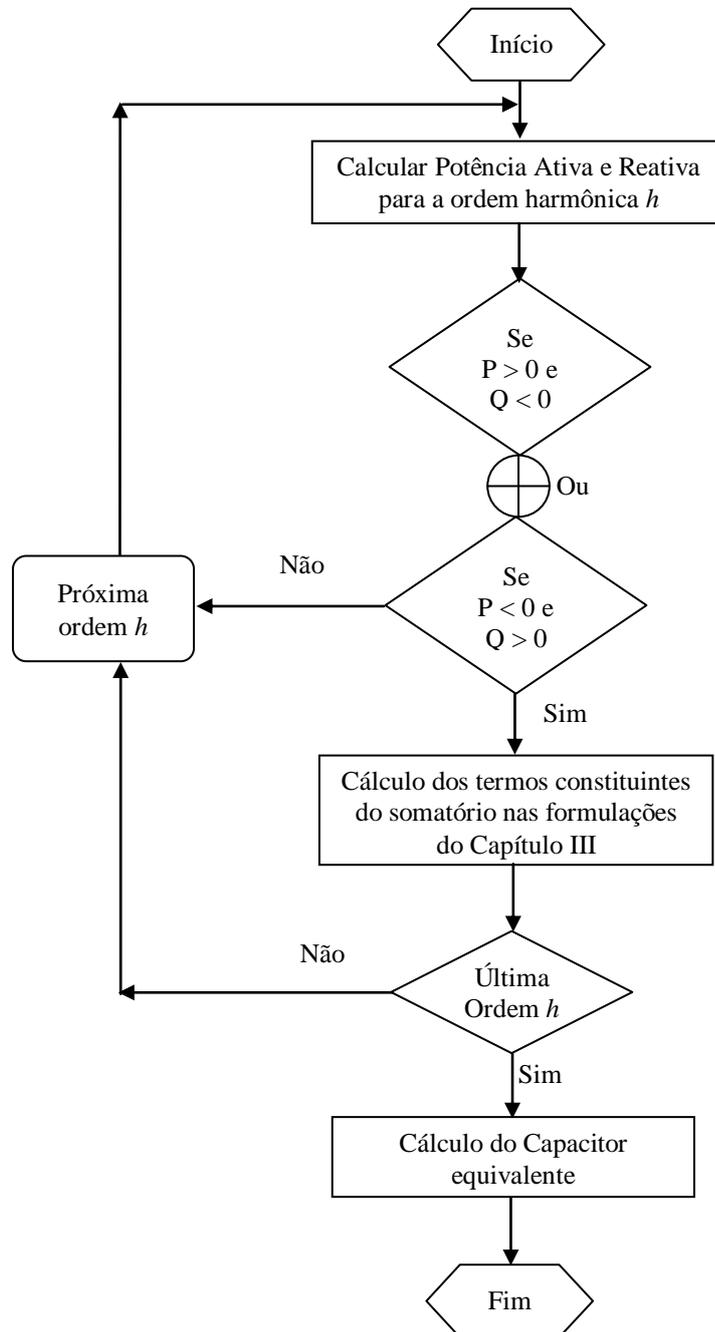


Figura 4.6 – Fluxograma de cálculo do capacitor equivalente do consumidor.

O procedimento de cálculo do indutor equivalente é semelhante ao acima exposto, somente alterando as comparações relativas às potências ativa e reativa. Cabe destacar que

todas as ações contidas neste módulo são internas ao aplicativo computacional e não dependem da interação homem-máquina.

As formulações do Capítulo II também estão implementadas neste módulo e, ao final do processo de cálculo dos parâmetros equivalentes da carga, são utilizadas nos cálculos das distorções harmônicas de tensão representativas do consumidor e da concessionária.

#### **d) Módulo de Resultados**

Todos os parâmetros importados do equipamento de medição são disponibilizados na página denominada “Registros”. Nesta, todas as correntes, tensões e potências registradas e calculadas são mostradas na forma de tabelas e gráficos indicativos do comportamento de cada parâmetro em função do horário do registro.

Em complemento a estes valores, cálculos estatísticos são realizados considerando o tempo total de medição, abrangendo valores médios, mínimos, máximos e a probabilidade de ocorrência para 95% do tempo de amostragem.

Na seqüência, todas as páginas constituintes do aplicativo desenvolvido são detalhadas e ilustradas.

- **Página “Tensão”**

As distorções harmônicas individuais e totais das tensões fase-neutro ou fase-fase estão presentes nesta página, tanto na forma de um banco de dados mostrado em tabelas, quanto na forma de gráficos de tendência, forma de onda ou espectro harmônico. Os cálculos estatísticos são apresentados para as três fases e para o neutro (tensões fase-neutro). Vale destacar que os valores referentes à tensão de neutro são calculados através do somatório das tensões de fase.

A figura 4.7 ilustra a tela de registros das tensões em forma de tabelas, enquanto que a figura 4.8 apresenta a tela de gráficos.

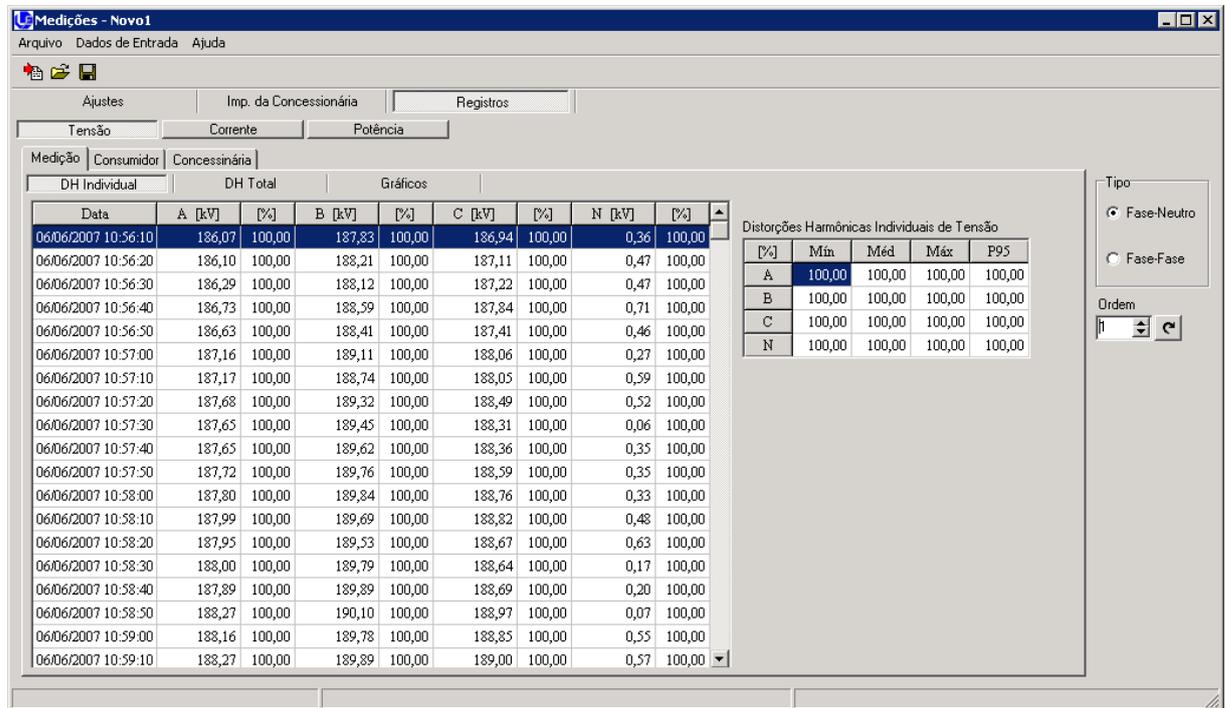


Figura 4.7 – Tela de registros das tensões medidas - Tabelas.

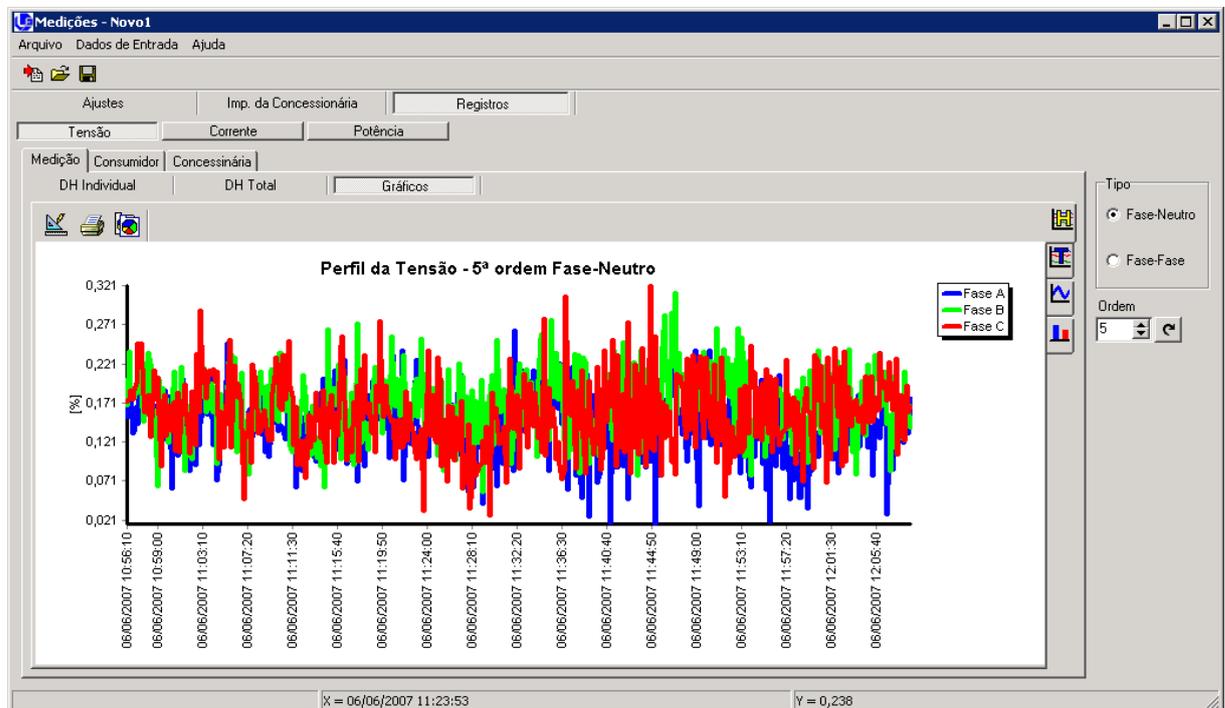


Figura 4.8 – Tela de registros das tensões medidas - Gráficos.

Nas figuras anteriores observa-se que a página “Tensão” possui três guias: Medição, Consumidor e Concessionária. Estas subdivisões são idênticas quanto ao teor da informação, diferindo quanto à origem dos dados. Em “Medição” as distorções harmônicas são aquelas provenientes do equipamento de monitoração, enquanto que “Consumidor” e “Concessionária” apresentam as distorções resultantes da aplicação da metodologia de separação das responsabilidades.

A escolha da ordem harmônica mostrada nas tabelas e gráficos é realizada através de um botão localizado no lado direito da tela. Na figura 4.7 o campo “Ordem” indica o número 1, ou seja, a componente fundamental foi selecionada e os valores mostrados na tabela de registros e dados estatísticos correspondem a esta ordem. Para a figura 4.8, a ordem harmônica selecionada corresponde à 5ª, portanto o gráfico representa o perfil desta ordem ao longo de todo o tempo de medição.

As figuras 4.9 e 4.10 exemplificam os gráficos de forma de onda e espectro harmônico relativos a um ponto ou amostra.

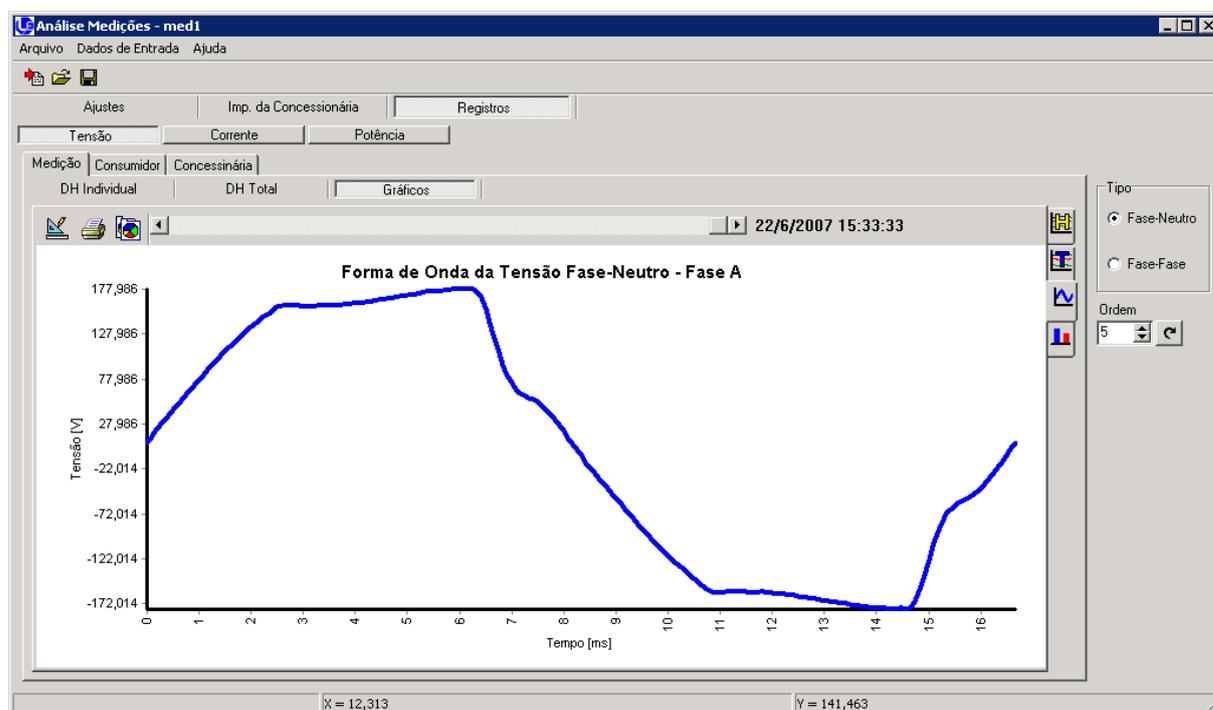


Figura 4.9 – Tela de registros das tensões – Gráfico de forma de onda.

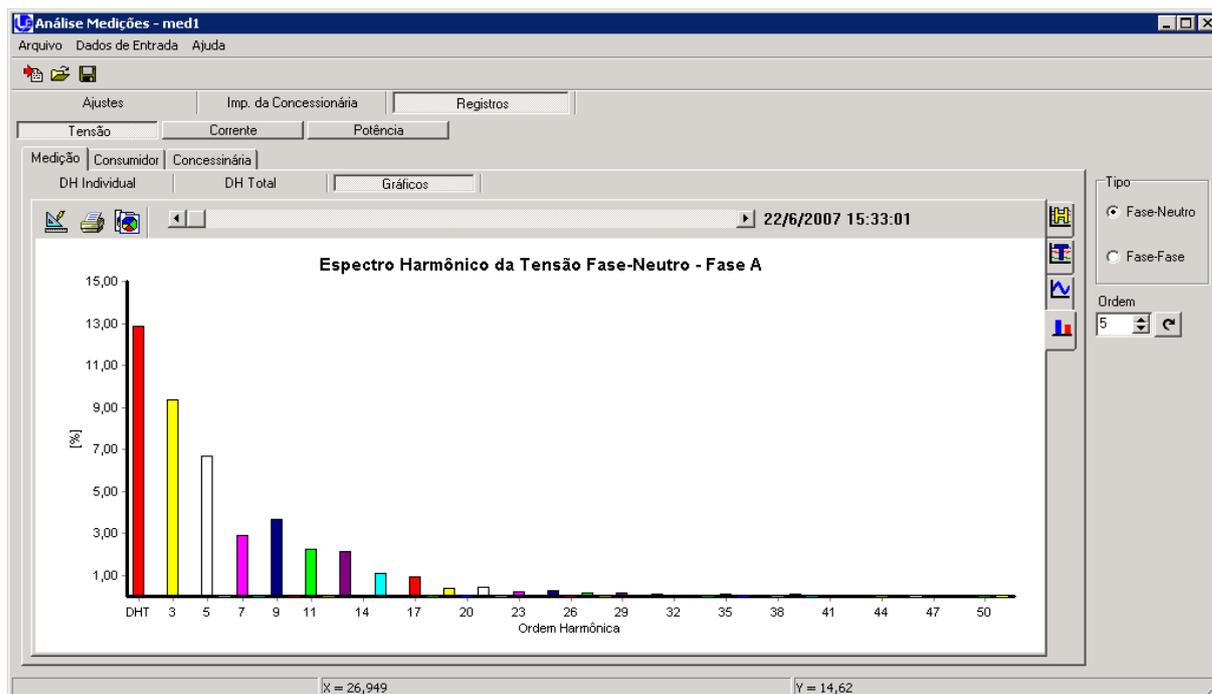


Figura 4.10 – Tela de registros das tensões – Gráfico de espectro harmônico.

- **Página “Corrente”**

Esta página é idêntica à de “Tensão”, ressaltando que, para as correntes, somente os valores medidos são apresentados. A figura 4.11 mostra o gráfico de tendência da distorção harmônica total de corrente.

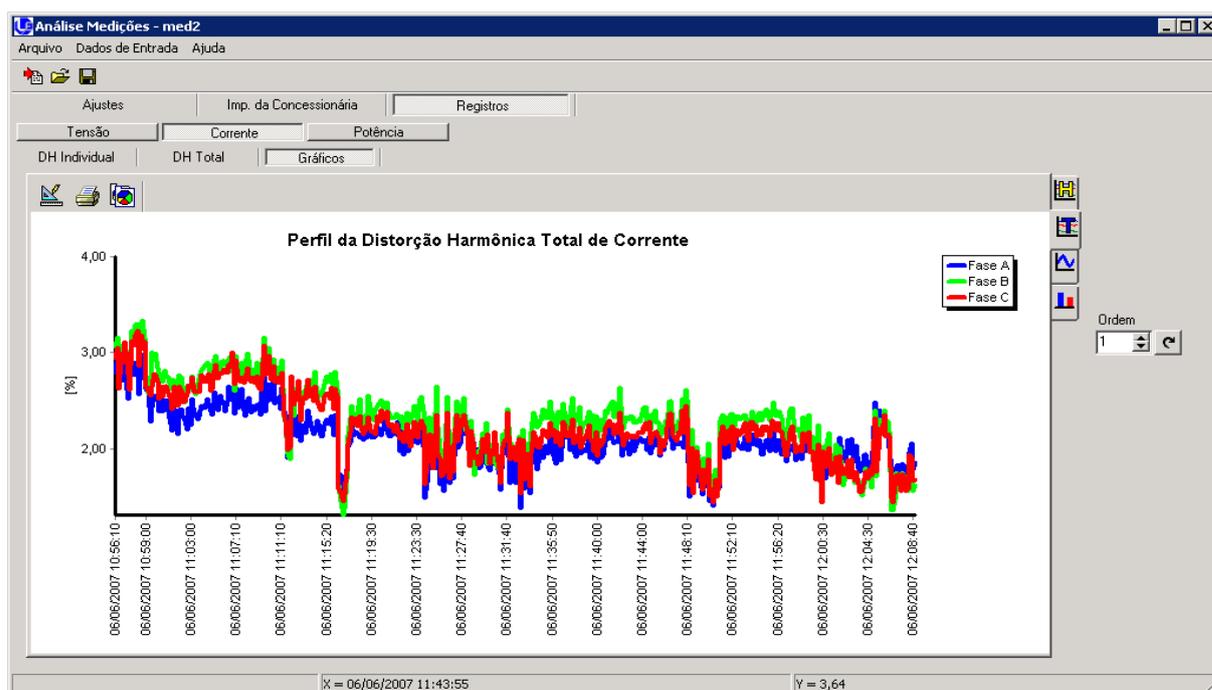


Figura 4.11 – Tela de registros das correntes – Gráfico tendência da distorção harmônica total de corrente.

• **Página “Potência”**

Através dos registros das tensões e correntes são calculadas as potências totais e harmônicas. Os valores “Totais” referem-se àqueles em que o cálculo das potências considera todas as ordens harmônicas, neste caso a teoria de Budeanu [39] é utilizada. De acordo com esta, além das componentes ativa, reativa e aparente, há uma quarta potência denominada de “distorção”(D), resultante da interação das harmônicas de tensão e corrente de diferentes ordens. Os valores concernentes às parcelas ativa, reativa e aparente para cada ordem harmônica são calculados e mostrados na guia “Harmônicas”. Além das potências, o fator de potência também é computado para todas as ordens consideradas. As figuras 4.12 e 4.13 mostram os registros das potências totais e o gráfico de tendência do fator de potência total, respectivamente.

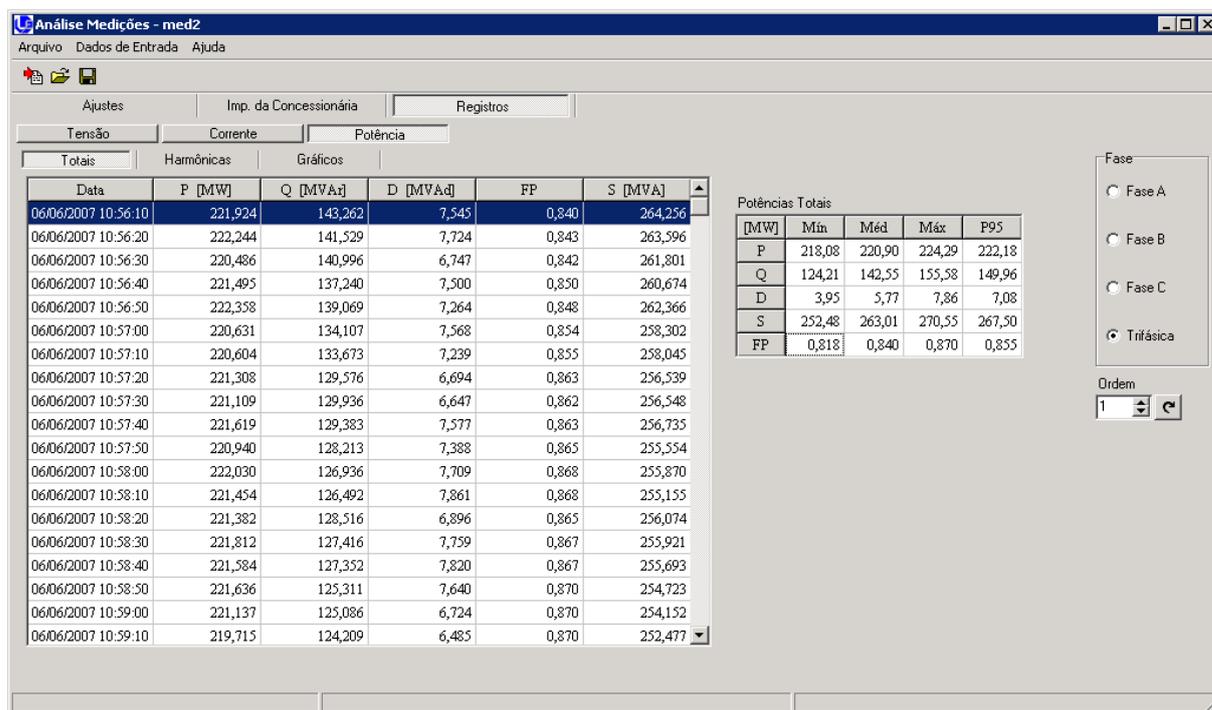
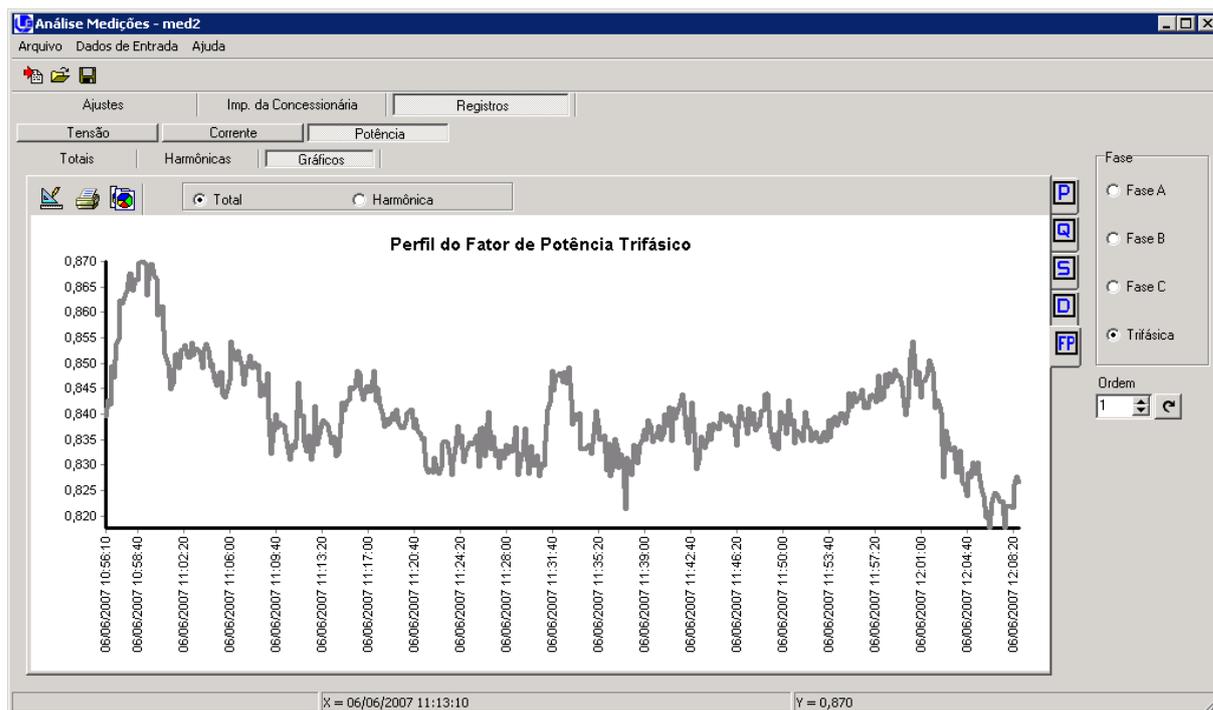


Figura 4.12 – Tela de registros das potências – Tabela dos valores totais.



*Figura 4.13 – Tela de registros das potências – Gráfico de tendência do fator de potência total.*

Através das figuras é possível notar o quadro denominado “Fase”, localizado ao lado direito dos gráficos e tabelas. Neste quadro é possível escolher o tipo de potência desejada: por fase ou trifásica.

## **4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo primou pela elaboração de uma estrutura computacional capaz de interagir com os equipamentos de medição e prover uma análise direta e rápida das distorções harmônicas medidas junto ao PAC. Naturalmente, os instrumentos de medição não estão configurados/programados para o atendimento aos requisitos impostos pelo processo da separação das distorções feito nesta tese. Assim, a utilização de ferramentas computacionais externas permite a introdução (via *software*) destas formulações, possibilitando a utilização da instrumentação disponível comercialmente.

A estrutura computacional apresentada está fundamentada na importação de arquivos texto exportados por estes instrumentos. Muito embora, a aplicativo desenvolvido esteja direcionado para um equipamento específico, a adequação para outros é bastante simples e de fácil implementação computacional.

Além de prover a separação das distorções harmônicas o aplicativo ATRES possibilita, ainda, a visualização dos resultados na forma de tabelas e gráficos, fornecendo ao usuário todas as informações relativas às distorções harmônicas. Cálculos estatísticos, através da avaliação da probabilidade de ocorrência de um determinado valor de distorção harmônica, permitem a análise de medições realizadas por longos períodos e sua comparação com os limites impostos pela legislação pertinente.

# APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

## 5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas agregada à modelagem de cargas abordada nos capítulos anteriores apresentou resultados satisfatórios em processos de validação computacionais. Não obstante ao bom desempenho computacional destes modelos matemáticos, é importante ressaltar que as investigações realizadas contemplaram situações bem definidas e com parâmetros elétricos calculados através de formulações no domínio da frequência. Estas condições, apesar de todos os avanços obtidos nas últimas décadas, tanto no campo da modelagem de sistemas elétricos quanto na elaboração de aplicativos computacionais, não englobam, normalmente, situações passíveis de ocorrência em ambientes reais ou em laboratório. Como exemplos destas particularidades, citam-se: influências nos equipamentos de medição, erros inerentes aos sistemas de aquisição, variações na fonte de alimentação, dentre outras.

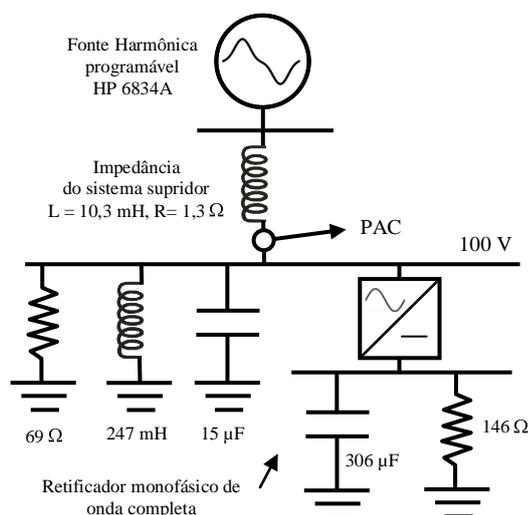
Diante destas observações e objetivando avaliar a metodologia proposta em sistemas físicos, o presente capítulo contempla, em um primeiro momento, ensaios laboratoriais sob condições controladas, empregando circuitos semelhantes àqueles utilizados nas avaliações computacionais. Em uma segunda abordagem, o aplicativo ATRES é utilizado para um complexo elétrico real.

Nestes termos, o presente capítulo compreende ações direcionadas ao cumprimento das seguintes etapas:

- Montagem laboratorial do arranjo físico selecionado;
- Realização de experimentos sob condições operacionais distintas;
- Análise dos resultados obtidos;
- Aplicação da metodologia em um sistema real e análise dos resultados.

## 5.2 – SISTEMA TESTE – MONTAGEM LABORATORIAL

De forma semelhante à definição do sistema elétrico considerado nas avaliações computacionais, o sistema teste adotado nos experimentos em laboratório, pelas suas características, busca a representação de uma unidade consumidora típica, com cargas resistivas, indutivas, capacitivas e cargas especiais ou não-lineares. A figura 5.1 apresenta o arranjo físico selecionado para o sistema teste experimental.



*Figura 5.1 – Arranjo físico utilizado para os testes de desempenho.*

Conforme indicado na figura, de acordo com restrições impostas pela estrutura laboratorial, o nível de tensão considerado nos ensaios é de, aproximadamente, 100 [V], ou

seja, baixa tensão. A opção por este nível de tensão está relacionada ao nível da corrente resultante, cujo valor é limitado pela fonte de tensão exigida pelos ensaios.

O processo de avaliação laboratorial da metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas impõe a utilização de um sistema isolado e com distorções conhecidas, pois, para que os resultados sejam confiáveis, torna-se imprescindível o conhecimento das características elétricas do sistema supridor. Conseqüentemente, a utilização da rede de suprimento da concessionária local torna-se inviável, pois esta possui características variáveis de módulo e ângulo da tensão e, principalmente, distorções harmônicas desconhecidas, portanto, não permite a correta identificação das distorções de sua responsabilidade. Assim, para os ensaios laboratoriais, a fonte de tensão da concessionária será representada por uma fonte harmônica da HP, modelo 6834A, com potência de 4500 [VA]. Esta, por ser programável, viabiliza a geração de uma fonte de tensão com quaisquer distorções harmônicas desejáveis.

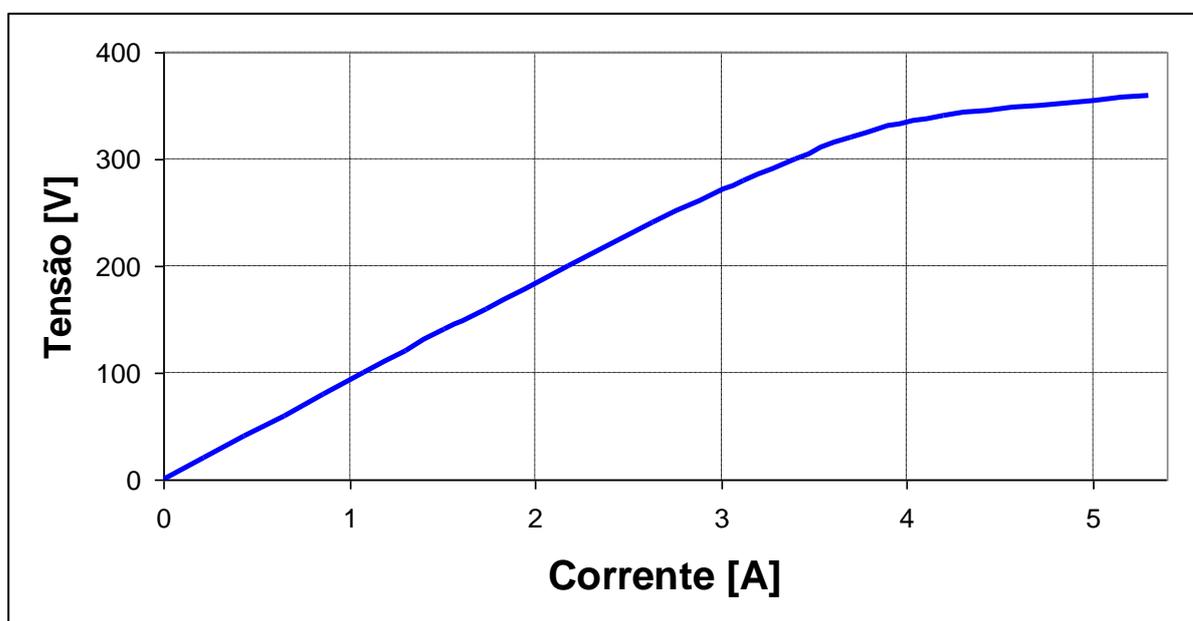


*Figura 5.2 – Fonte de tensão utilizada nos ensaios.*

A impedância do sistema supridor é representada por um indutor com os parâmetros indicados na figura 5.1. Este componente fornece uma impedância conhecida e de magnitude

significativamente superior à impedância interna da fonte de tensão, permitindo o cálculo das impedâncias harmônicas representativas da rede de suprimento da concessionária.

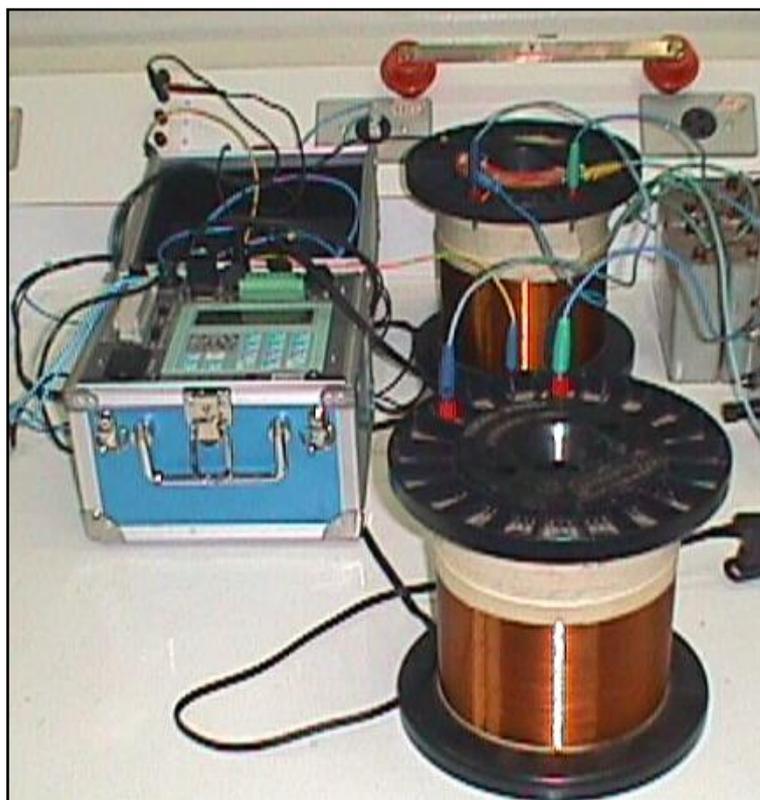
No arranjo laboratorial, as cargas não-lineares, contidas nas instalações do consumidor, são representadas por um retificador monofásico suprindo uma carga constituída por um resistor e um capacitor. A parcela linear da carga é caracterizada por um resistor, um capacitor e um indutor. Este último, apesar de possuir núcleo de ferro e apresentar uma curva de saturação não-linear, pode ser considerado linear para a tensão adotada nos ensaios (100 V). A curva de saturação mostrada na figura 5.3 esclarece esta propriedade.



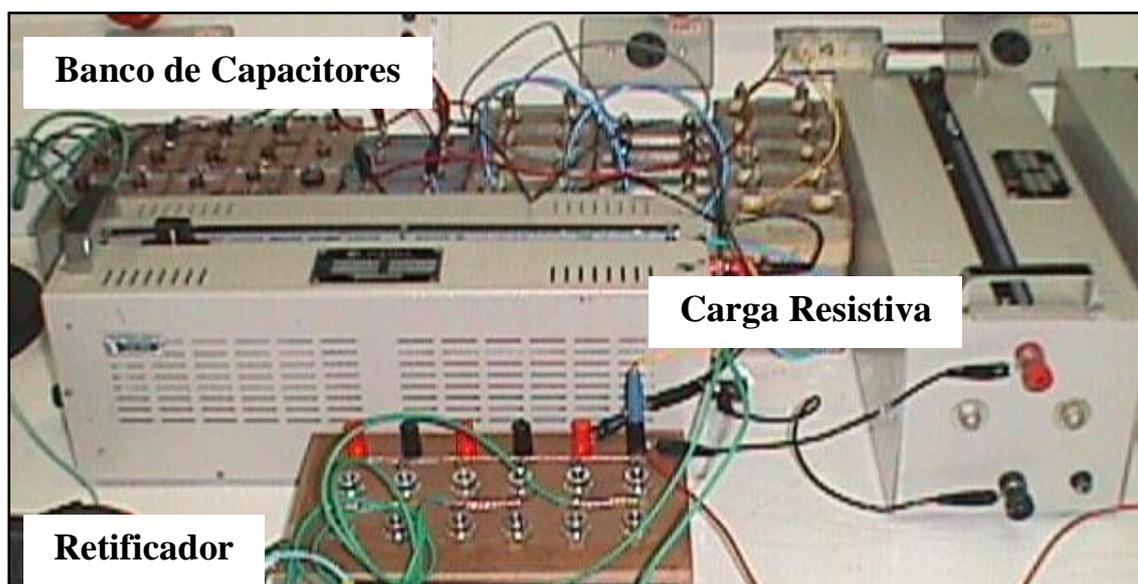
*Figura 5.3 – Curva de saturação da indutância da carga.*

Para a realização das medições das tensões e correntes harmônicas junto ao PAC, utilizou-se do equipamento MARH-21[38]. Este medidor realiza a aquisição dos ciclos da onda de tensão e corrente, com seus respectivos harmônicos, e os envia para um microcomputador, onde os mesmos são processados e armazenados.

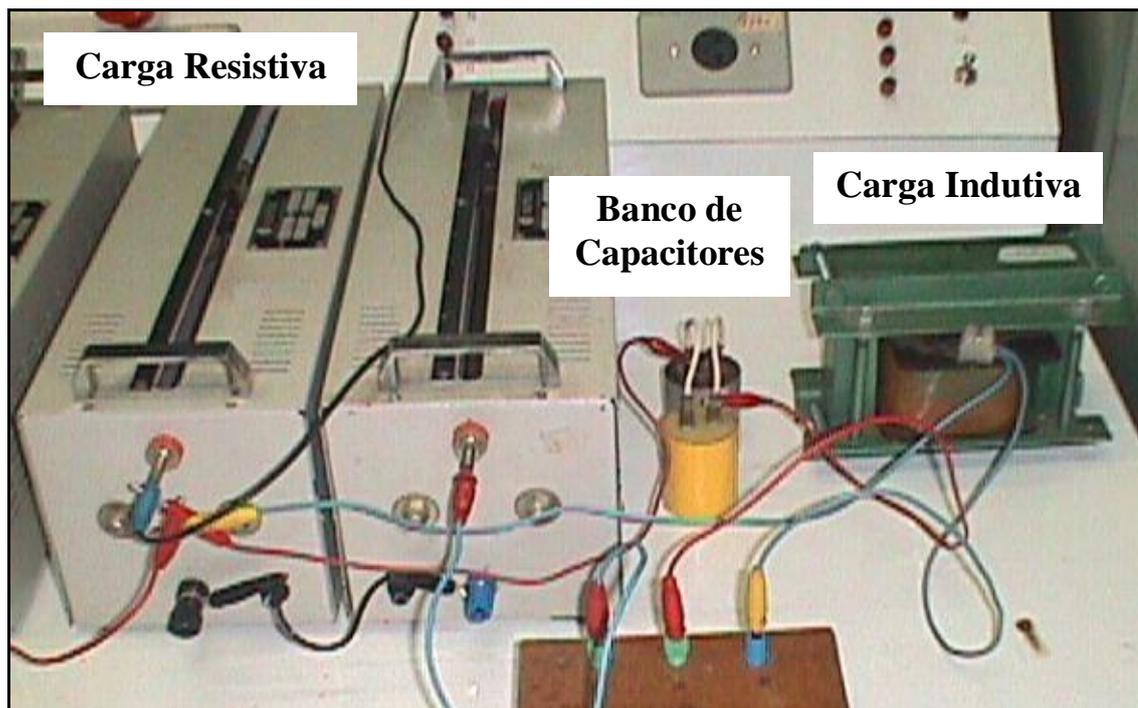
Os componentes físicos que perfazem o sistema teste são mostrados pelas figuras 5.4, 5.5 e 5.6.



*Figura 5.4 – Foto do indutor representativo da impedância da concessionária e do equipamento de medição.*



*Figura 5.5 – Foto do retificador com suas cargas (resistiva e capacitiva).*



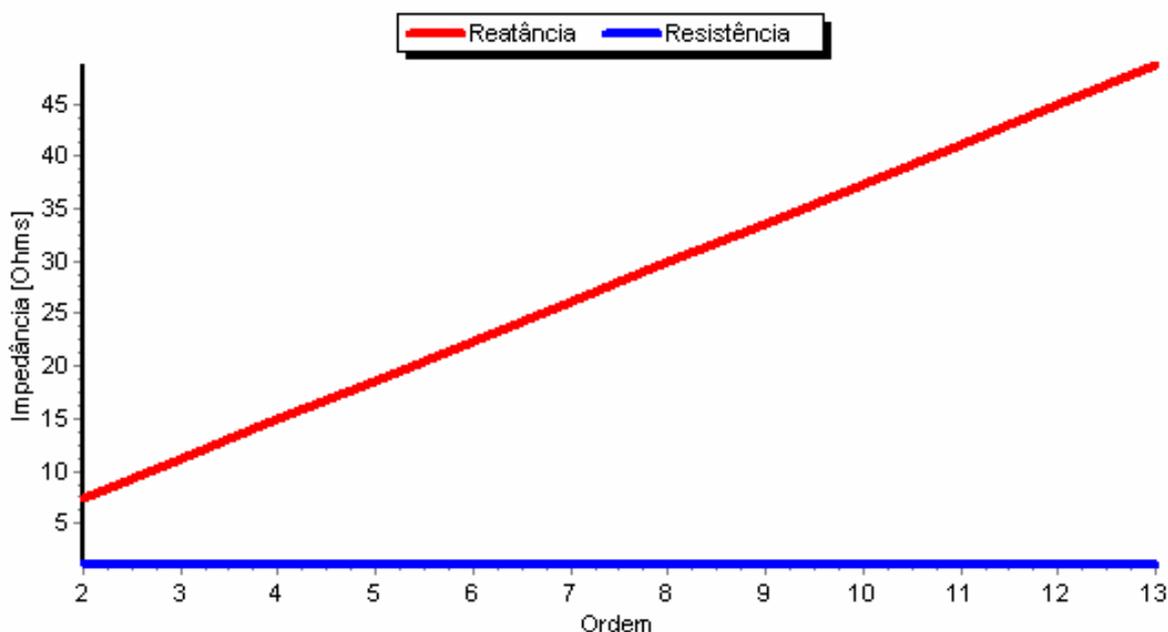
*Figura 5.6 – Foto das cargas lineares do consumidor.*

### **5.2.1 – Impedância Harmônica do Supridor**

A aplicação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas determina o prévio conhecimento da impedância harmônica da concessionária para cada ordem. Estes parâmetros, para o sistema teste, correspondem ao espectro de impedâncias do indutor representativo da concessionária.

Para a obtenção destes valores optou-se pelo ensaio do indutor para todas as frequências consideradas nas análises. Utilizando da mesma fonte de tensão do sistema teste, ao indutor foram aplicadas tensões cujas frequências abrangeram da ordem de número 2 (120 Hz) até a 13 (780 Hz). Esta faixa corresponde às frequências de maior amplitude geradas pelo retificador do sistema teste e, portanto, são as ordens analisadas no presente trabalho.

Assim procedendo, a figura 5.7 apresenta a curva impedância versus frequência deste componente, ressaltando que os valores indicados são os mesmos utilizados no cálculo das parcelas de responsabilidade.



*Figura 5.7 – Curva impedância x frequência do indutor representativo da concessionária.*

### **5.2.2 – Distorções Harmônicas Esperadas**

A utilização de arranjos laboratoriais tem a propriedade de possibilitar o cálculo das distorções harmônicas de tensão esperadas para o consumidor e para a concessionária. Esta característica é resultado do conhecimento de todos os componentes empregados no sistema teste, ou seja, todas as impedâncias harmônicas referentes às cargas lineares e ao sistema supridor são conhecidas ou passíveis de medição/ensaio. Por razões óbvias, esta facilidade somente é obtida em laboratório e sob condições controladas.

A determinação da tensão harmônica de responsabilidade exclusiva do consumidor adota como premissas a impedância total do PAC (impedância de barra) e a corrente harmônica injetada pelo consumidor. Estes parâmetros permitem o cálculo das tensões harmônicas resultantes somente das cargas não-lineares presentes nas instalações do consumidor. A figura 5.8 exemplifica esta situação.

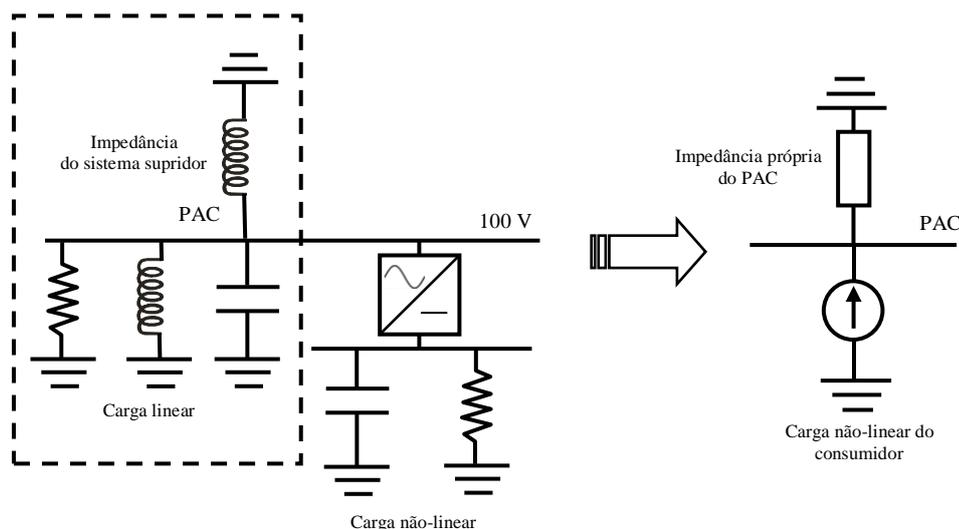


Figura 5.8 – Circuito equivalente para cálculo das tensões harmônicas exclusivas do consumidor.

Na figura, a conexão em paralelo das cargas lineares do consumidor e da impedância da concessionária corresponde à chamada impedância do PAC. As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear do sistema teste (retificador) multiplicadas por esta impedância resulta na tensão harmônica exclusiva do consumidor. Portanto, a determinação das distorções provenientes do consumidor implica na medição das correntes injetadas por suas cargas não-lineares ( $\dot{I}_h^{ic}$ ) e no conhecimento das impedâncias harmônicas do PAC ( $\dot{Z}_h^b$ ), conforme expresso em (5.1).

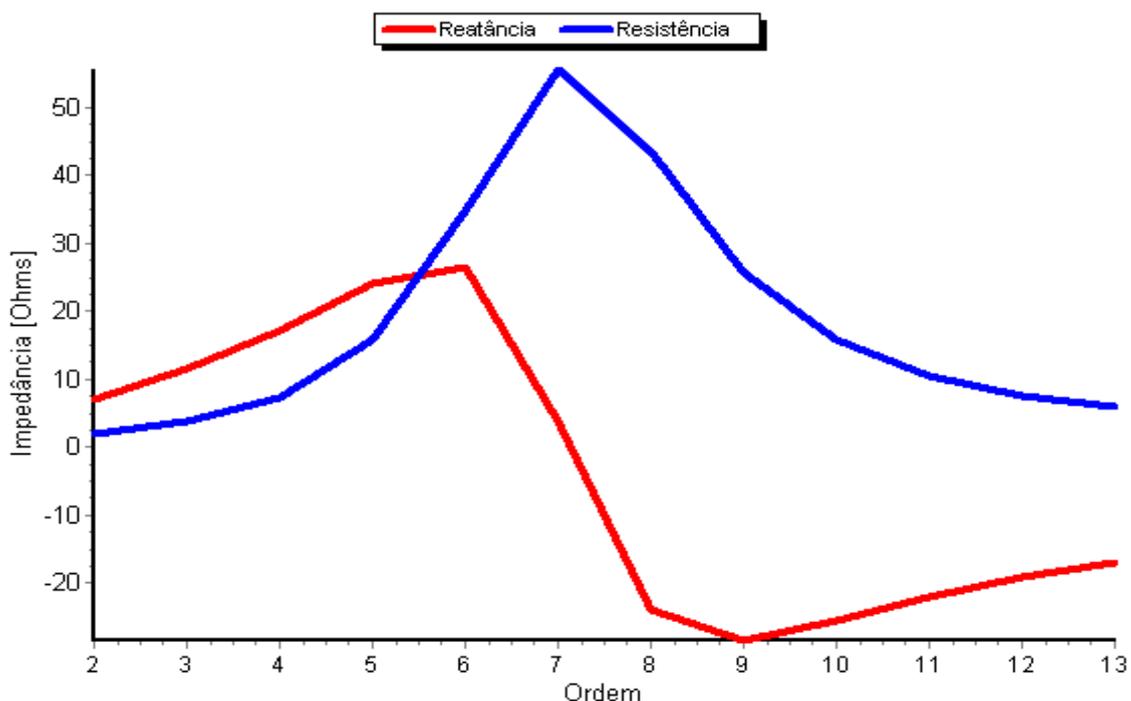
$$\dot{V}_h^c = \dot{I}_h^{ic} \cdot \dot{Z}_h^b \quad (5.1)$$

A tensão harmônica exclusiva do sistema supridor é expressa por:

$$\dot{V}_h^s = \dot{V}_h^m - \dot{V}_h^c \quad (5.2)$$

Como as cargas não-lineares do sistema teste são representadas por um retificador, a medição das correntes harmônicas deste componente soluciona a primeira incógnita. Quanto à impedância do PAC, por meio de procedimento idêntico àquele adotado para a obtenção da impedância da concessionária, é possível o cálculo destes valores. Para tanto, aplica-se uma

tensão de frequência definida no arranjo paralelo definido pelo indutor da concessionária e os elementos passivos do consumidor e, através da corrente resultante, calcula-se a impedância harmônica do PAC. Os ensaios laboratoriais resultaram na curva impedância versus frequência mostrada pela figura 5.9.



*Figura 5.9 – Curva impedância x frequência da impedância de barra do PAC.*

A curva acima demonstra que o PAC possui um acréscimo substancial em sua impedância nas proximidades da harmônica de ordem 7. Este atributo, característica de ressonância, é resultado do paralelismo entre o capacitor do consumidor e o indutor representativo da impedância da concessionária. Diante desta propriedade, há de se esperar ampliações nas distorções para esta harmônica.

### **5.3 – ENSAIOS LABORATORIAIS**

Empregando o arranjo físico anterior e explorando as características da fonte de tensão utilizada nos ensaios, procedeu-se ao processo de avaliação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Os distintos casos selecionados para apresentação e discussão encontram-se sintetizados abaixo. Estas situações visam abranger uma ampla gama de condições operacionais passíveis de ocorrência em sistemas reais e contemplam distorções harmônicas advindas do consumidor ou da concessionária. Além das diferenças em módulo, os estudos também buscam a identificação do grau de influência da defasagem angular entre as fontes de distorções harmônicas de ambas as partes.

Nestes termos, os casos selecionados estão indicados na tabela abaixo.

*Tabela 5.1 – Descrição dos casos selecionados.*

<b>Caso</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consumidor</b>	<b>Concessionária</b>
<b>01</b>	Fonte de tensão puramente senoidal suprimindo as cargas do sistema teste	Contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Sem distorções harmônicas.
<b>02</b>	Sistema teste suprido por fonte de tensão distorcida.		Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 6% com ângulo 0° *; - 5 <sup>a</sup> : 4% com ângulo 0°; - 7 <sup>a</sup> : 2% com ângulo 0°.
<b>03</b>			Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 6% com ângulo 180°; - 5 <sup>a</sup> : 4% com ângulo 180°; - 7 <sup>a</sup> : 2% com ângulo 180°.

<b>Caso</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consumidor</b>	<b>Concessionária</b>
<b>04</b>	Sistema teste suprido por fonte de tensão distorcida.	Contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 16% com ângulo 0°; - 5 <sup>a</sup> : 13% com ângulo 0°; - 7 <sup>a</sup> : 8% com ângulo 0°.
<b>05</b>			Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 16% com ângulo 180°; - 5 <sup>a</sup> : 13% com ângulo 180°; - 7 <sup>a</sup> : 8% com ângulo 180°.
<b>06</b>	Sistema teste sem cargas não-lineares (retificador desconectado) alimentado por fonte de tensão contendo distorções harmônicas.	<u>Não</u> contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 6% com ângulo 0°; - 5 <sup>a</sup> : 4% com ângulo 0°; - 7 <sup>a</sup> : 2% com ângulo 0°.
<b>07</b>			Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3 <sup>a</sup> : 16% com ângulo 0°; - 5 <sup>a</sup> : 13% com ângulo 0°; - 7 <sup>a</sup> : 8% com ângulo 0°.

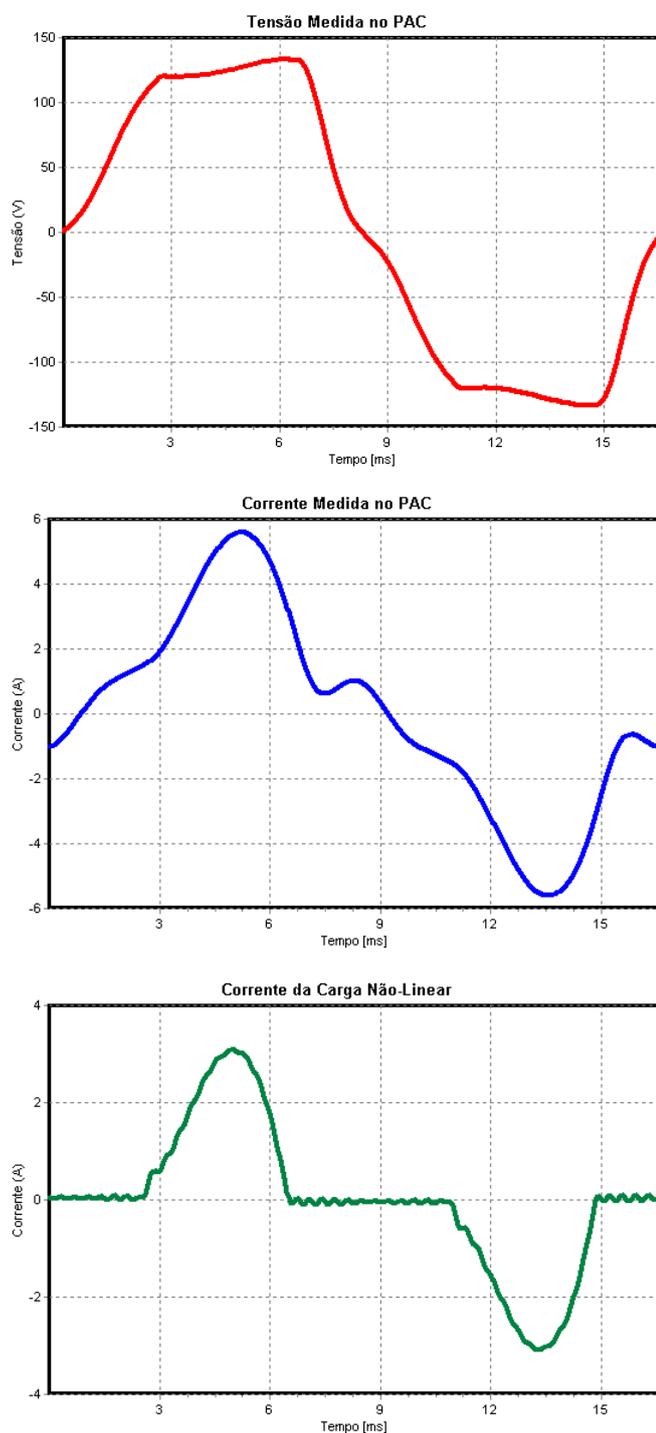
\* Os valores percentuais e a defasagem angular são referentes à tensão fundamental de 100 [V].

### **a) Caso 01**

Conforme mencionado, nesta situação operacional o sistema teste é suprido por uma fonte de tensão sem distorções harmônicas quando operando a vazio, ou seja, como premissa, é conhecido que todas as distorções harmônicas são provenientes do consumidor. Os resultados, cálculos e comentários sobre este caso são apresentados na seqüência.

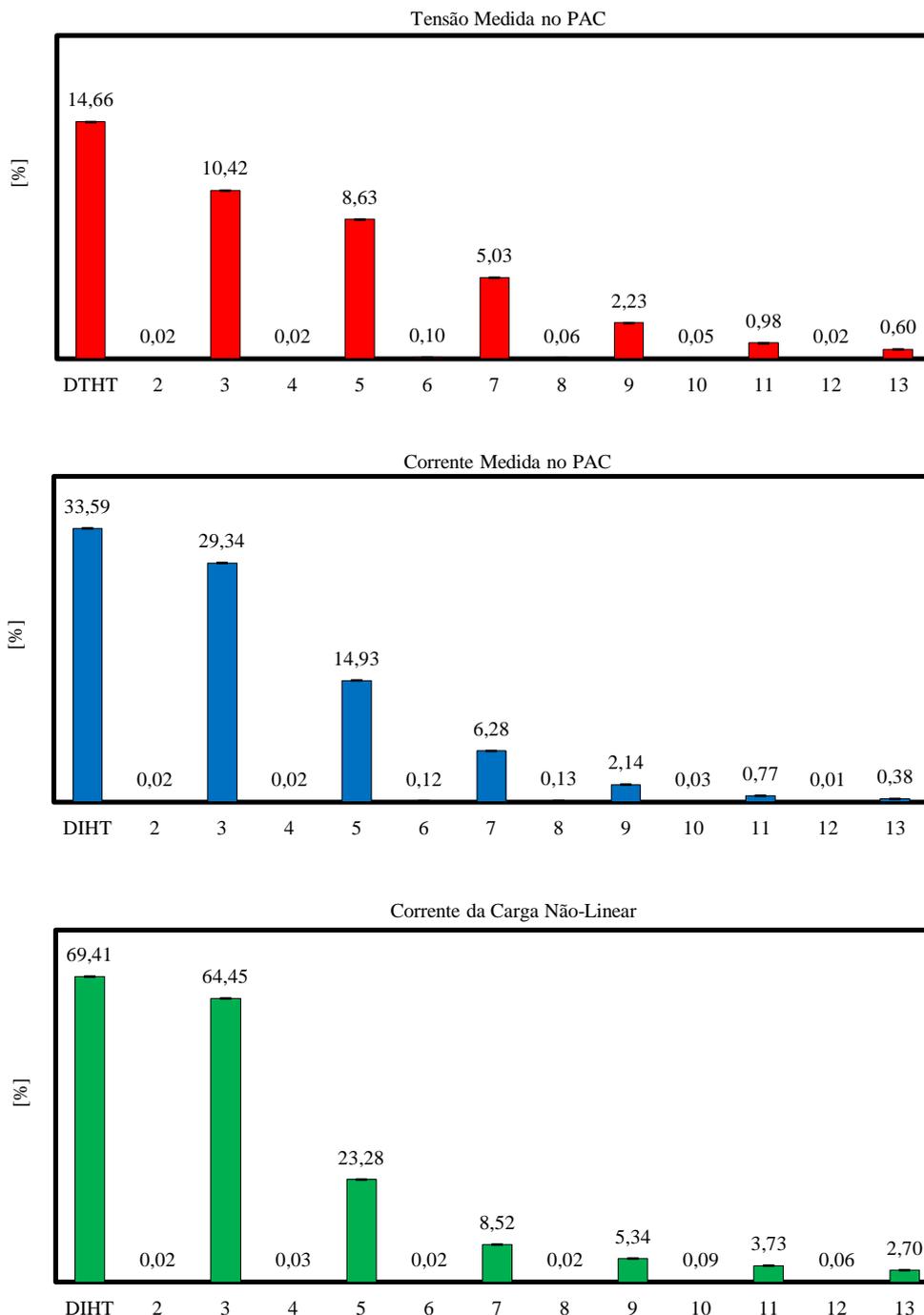
### **Resultados experimentais**

A figura 5.10 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.



*Figura 5.10 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.*

Complementarmente, a figura 5.11 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.



*Figura 5.11 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.*

Conforme observado na figura anterior, somente são apresentadas as harmônicas inferiores a 800 Hz (até a 13ª ordem). A escolha desta faixa de frequências está relacionada com as amplitudes observadas para estas frequências. Somente os valores superiores a 0,5% para as distorções de tensão foram considerados.

### **Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

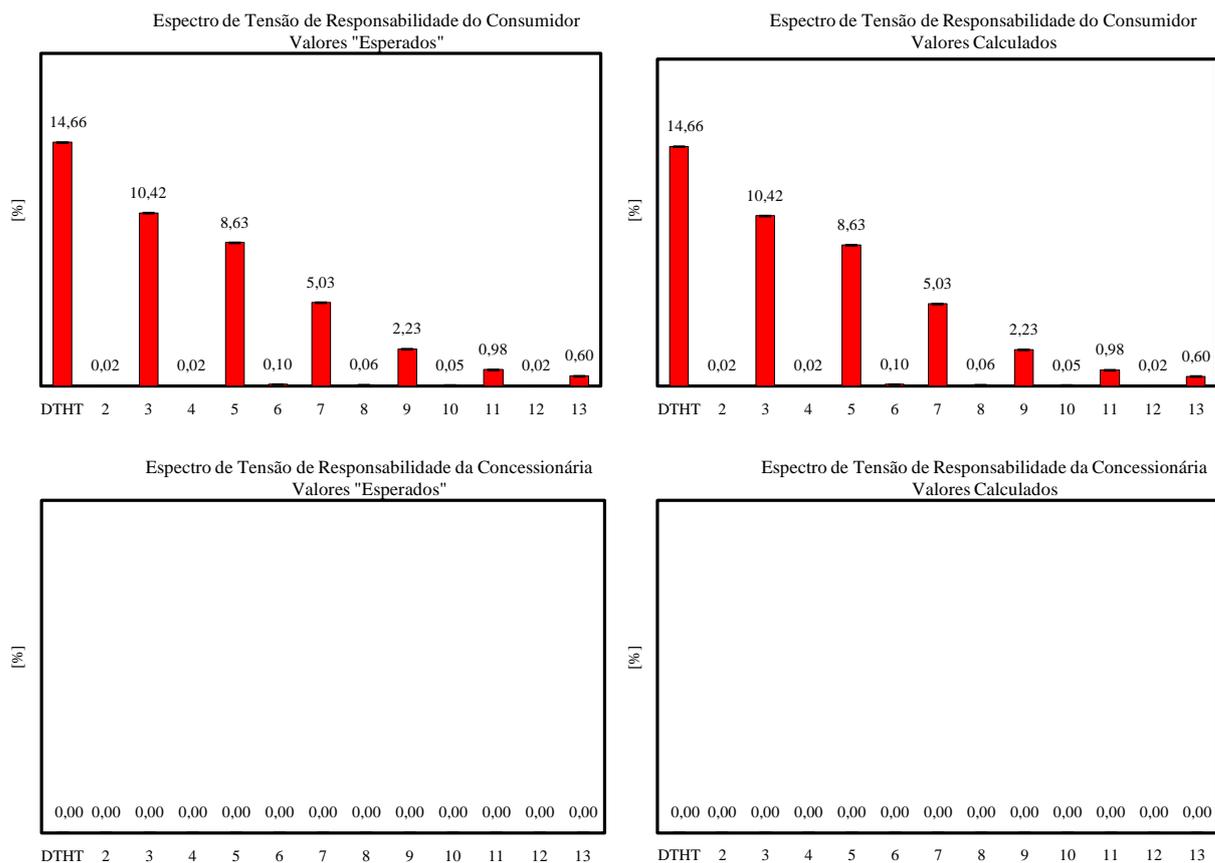
Para a aplicação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, inicialmente, aos sinais de tensão e corrente medidos no PAC são aplicadas as formulações referentes à modelagem da carga equivalente do consumidor apresentadas no Capítulo III. Os parâmetros indicados na tabela 5.2 são decorrentes deste procedimento.

*Tabela 5.2 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 01*

<b>R [<math>\Omega</math>]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>
35,66	382,58	1,80

Cabe destacar que, necessariamente, os valores de R, L e C não são semelhantes aos componentes físicos, pois estes representam o equivalente entre a parcela linear e não-linear da carga do consumidor e, portanto, são influenciados pelas características de ambas as cargas.

Prosseguindo com o processo de atribuição das responsabilidades, o emprego dos parâmetros acima indicados nas equações contidas no Capítulo II resulta nos espectros harmônicos de tensão indicados na figura 5.12. Nesta figura, os valores denominados por “esperados” são considerados como referência, visto terem sido determinados através dos parâmetros reais e conhecidos do sistema teste. Por outro lado, aqueles identificados como “calculados” correspondem aos resultados da aplicação da metodologia proposta.



*Figura 5.12 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 01.*

### **Comentários**

Os resultados obtidos evidenciaram que:

- Para o caso em questão, a metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios, indicando corretamente as parcelas de responsabilidade sobre as distorções provenientes do consumidor e da concessionária.
- Os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciam de forma significativa na separação das responsabilidades quando o consumidor é o principal responsável pelas distorções.

### **b) Caso 02**

Para esta situação operacional, as cargas lineares e não-lineares do sistema testes são mantidas inalteradas, enquanto que a fonte de alimentação é programada para fornecer distorções harmônicas pré-definidas. As seguintes frequências foram contempladas para este caso:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 6% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

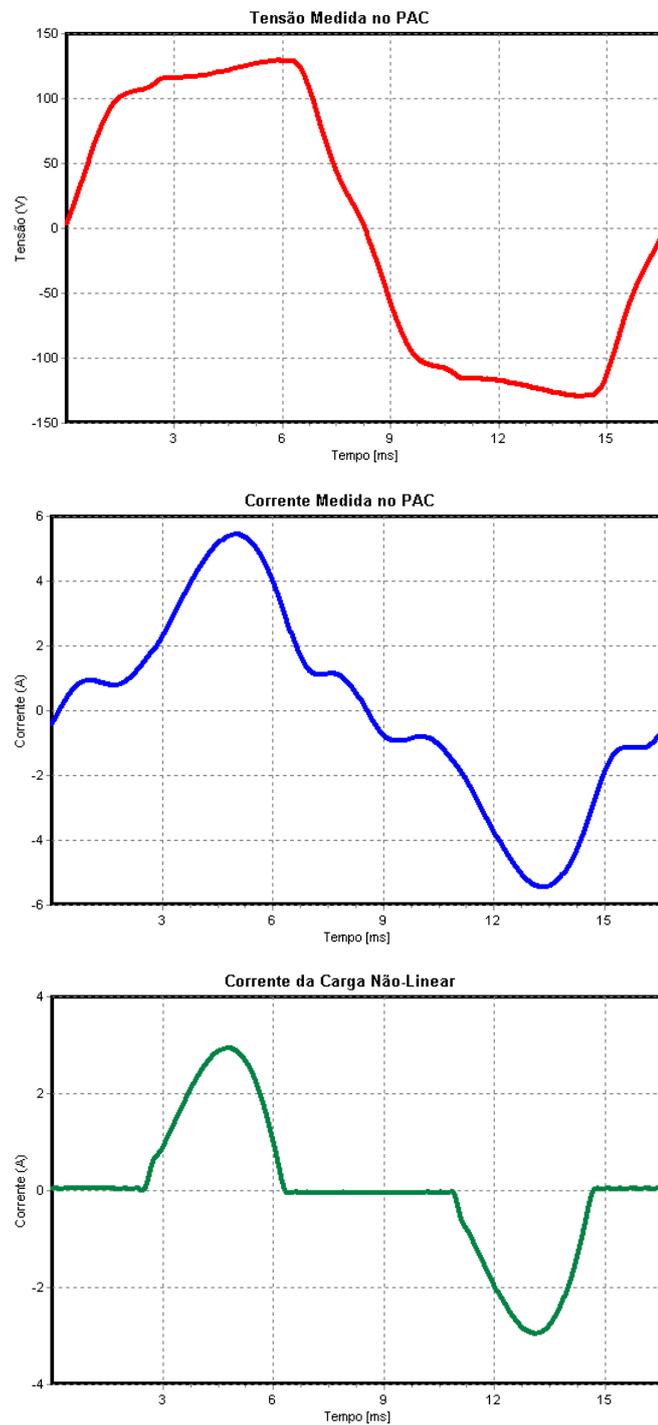
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

A opção pelos valores acima está baseada nos percentuais observados para as tensões harmônicas do caso anterior. Nota-se que as distorções pré-definidas são inferiores àquelas de responsabilidade exclusiva do consumidor. No entanto, esta constatação não significa que o consumidor, também para este caso, continuará sendo o principal responsável pelas distorções de tensão, pois as distorções pré-definidas correspondem à operação em vazio da fonte de alimentação. Adicionalmente, a parcela não-linear da carga do consumidor estará sujeita a uma nova condição operacional e, conseqüentemente, as correntes harmônicas geradas por este componente poderão sofrer alterações.

Seguindo a mesma formação utilizada no caso anterior, na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários sobre esta nova condição.

### **Resultados experimentais**

A figura 5.13 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.



*Figura 5.13 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.*

Complementarmente, a figura 5.14 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

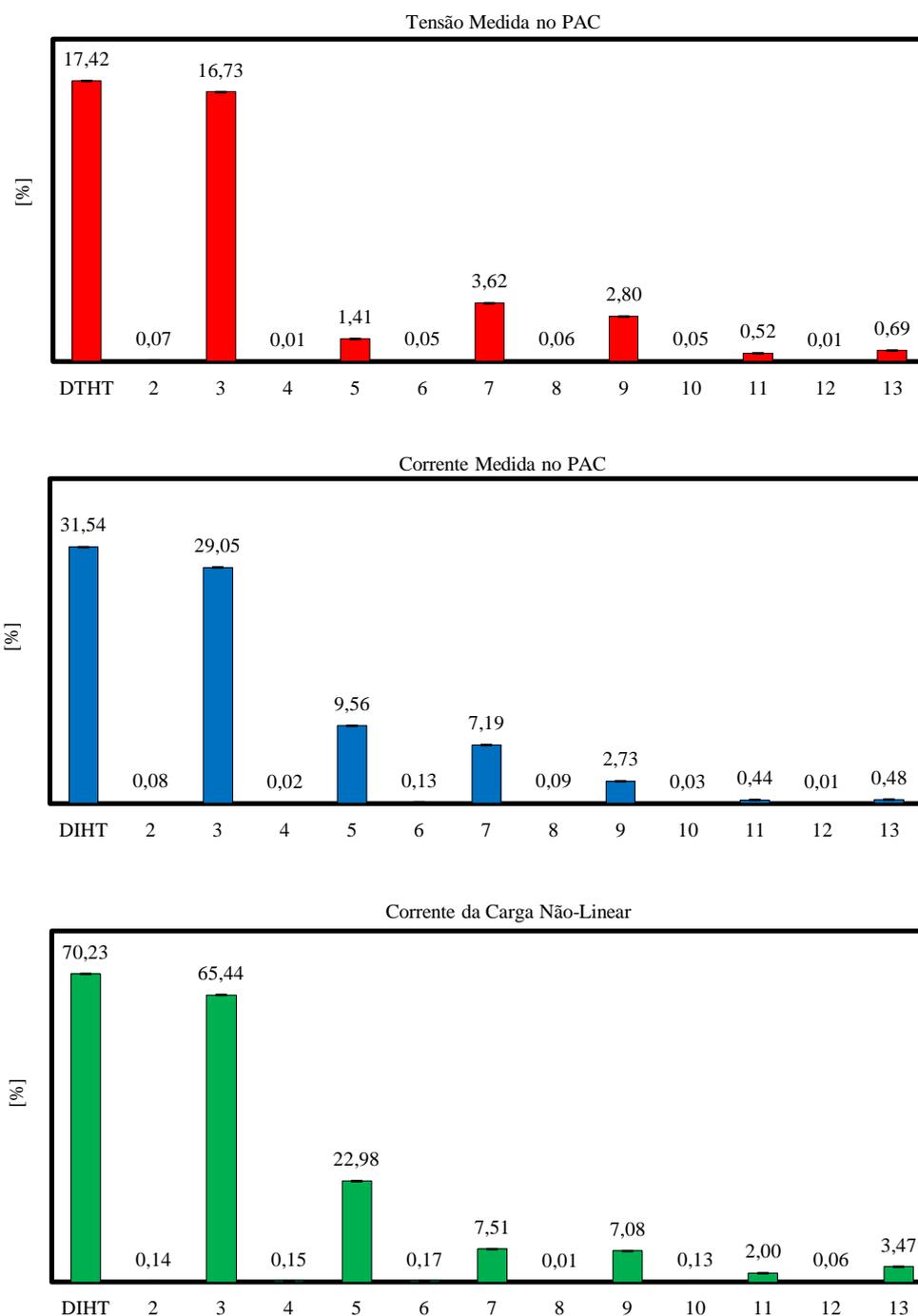


Figura 5.14 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.

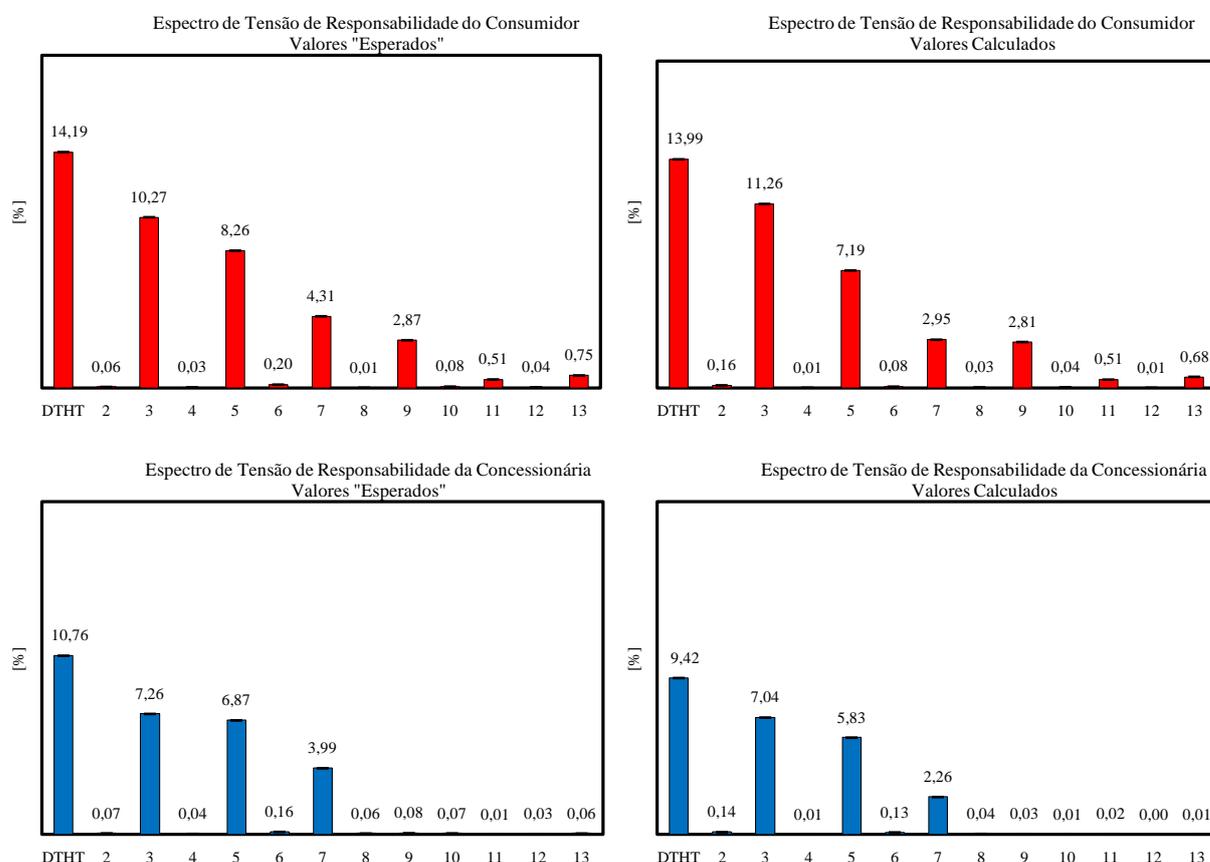
### Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.3 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 02.

*Tabela 5.3 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 02.*

<b>R [<math>\Omega</math>]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>
36,06	193,22	19,58

Prosseguindo com o processo de atribuição das responsabilidades, os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.15.



*Figura 5.15 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 02.*

Em complemento aos módulos indicados na figura anterior e com o intuito de melhor visualizar a composição entre as distorções provenientes do consumidor e da concessionária, a figura 5.16 apresenta os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade

do consumidor e da concessionária para as harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados, ou seja, as ordens 3, 5 e 7.

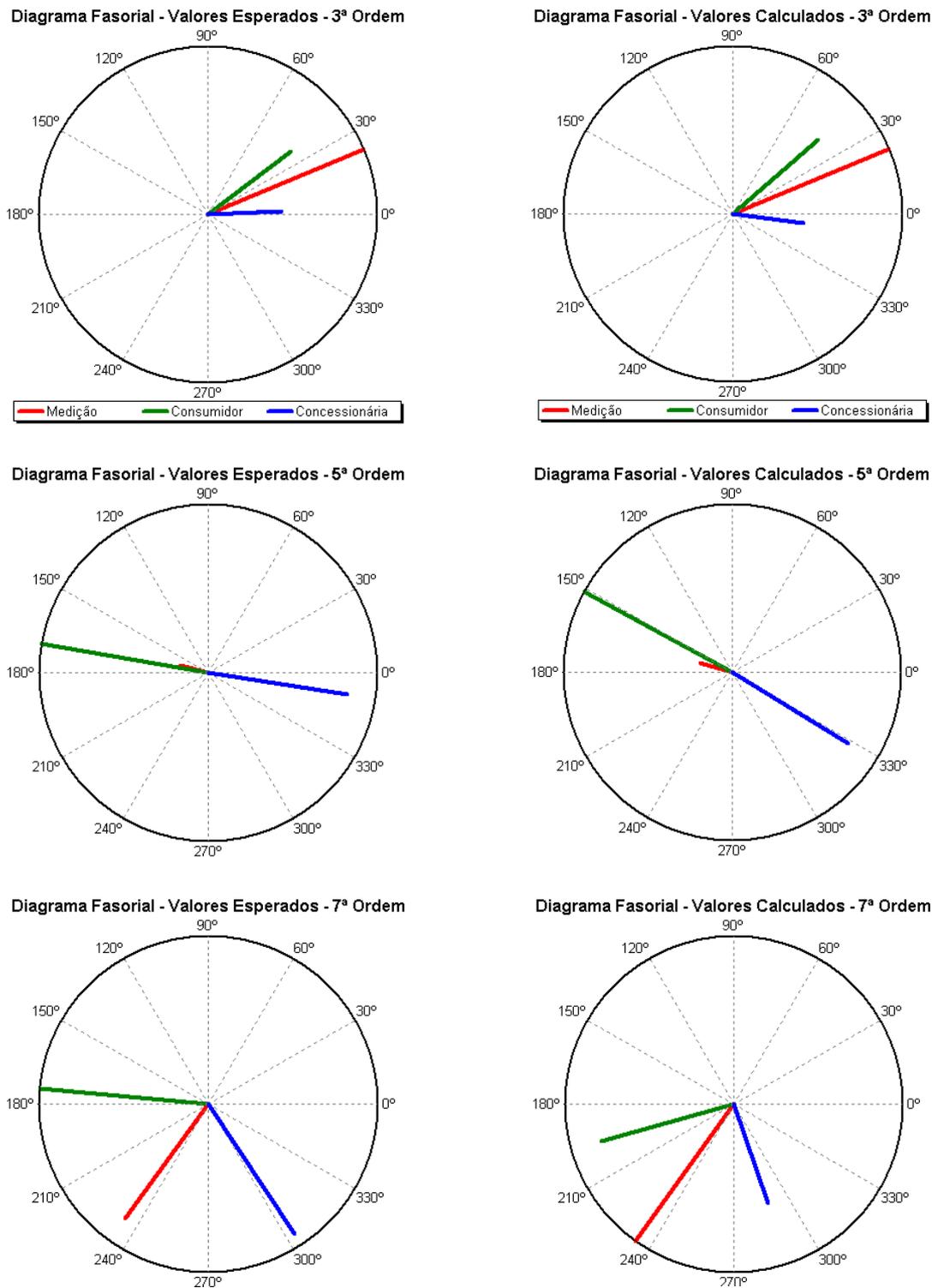


Figura 5.16 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 02.

### Comentários

Os resultados evidenciam que:

- Também para este caso, a proposta de metodologia apresentou resultados satisfatórios para todas as frequências. As diferenças observadas entre os valores “esperados” e calculados não resultaram em inversão da responsabilidade sobre as distorções.
- A distorção de tensão medida para a harmônica de ordem 5, equivalente a 1,41% do valor fundamental, está em conformidade com as recomendações do ONS [3] e, devido ao baixo valor, não há razão para discussão sobre os responsáveis por esta distorção. No entanto, os valores “esperados” e calculados indicam que tanto o consumidor quanto a concessionária violam os limites recomendados (5%). Este fato é decorrente de um cancelamento entre as tensões de ambas as partes, conforme mostrado no diagrama fasorial da figura 5.15. Mesmo nestas condições, a metodologia mostrou-se condizente com os valores esperados.
- Mais uma vez, os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciaram na separação das responsabilidades quando o consumidor é o principal responsável pelas distorções, caso das ordens 9, 11 e 13.

### **c) Caso 03**

Nesta terceira configuração, as cargas lineares e não-lineares do sistema teste continuam inalteradas enquanto que a fonte de alimentação é programada para fornecer as mesmas ordens harmônicas do caso anterior, mantendo o módulo constante e alterando somente o defasamento angular. Então, as distorções ficam assim definidas:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 6% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

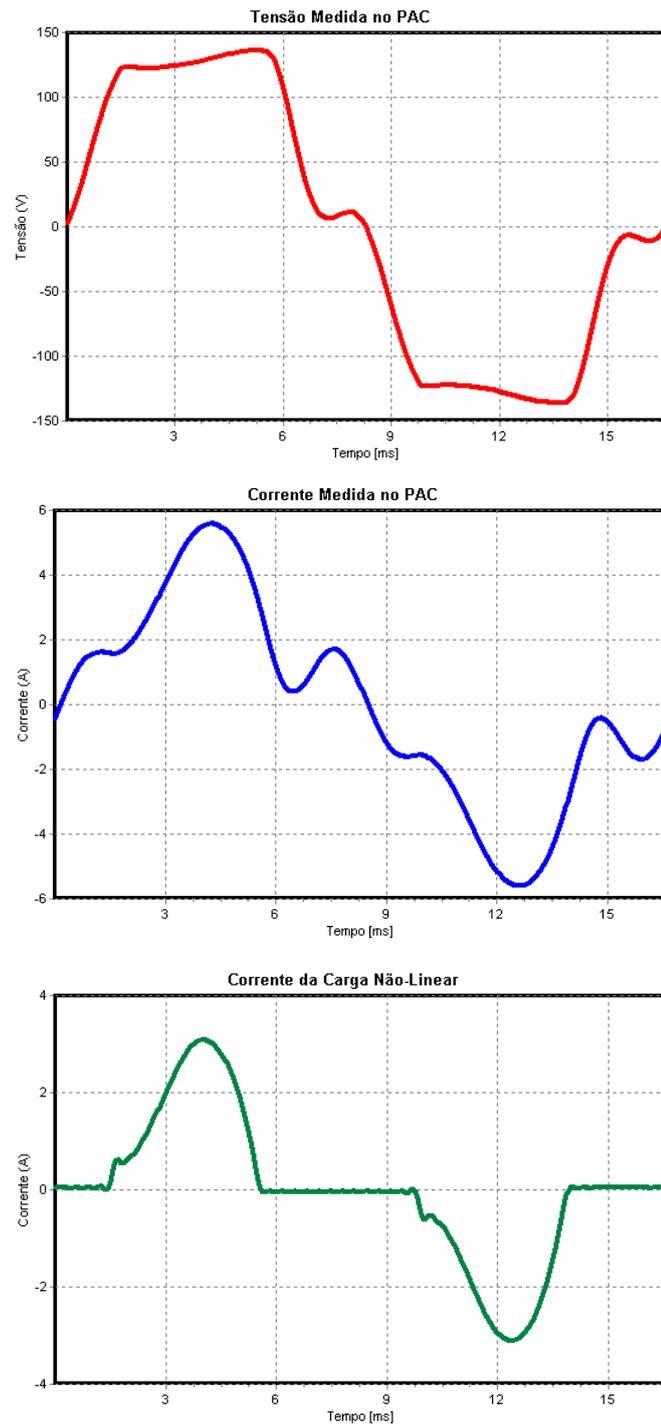
Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

O deslocamento em 180° nas tensões pré-definidas tem como objetivo avaliar a proposta de metodologia para uma condição operacional onde as distorções harmônicas, produzidas pela fonte de alimentação, encontram-se em posição inversa às aquelas configuradas para o Caso 02.

Seguindo a mesma formação utilizada no caso anterior, na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários sobre esta nova condição.

### **Resultados experimentais**

A figura 5.17 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.



*Figura 5.17 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03.*

Novamente, a figura 5.18 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

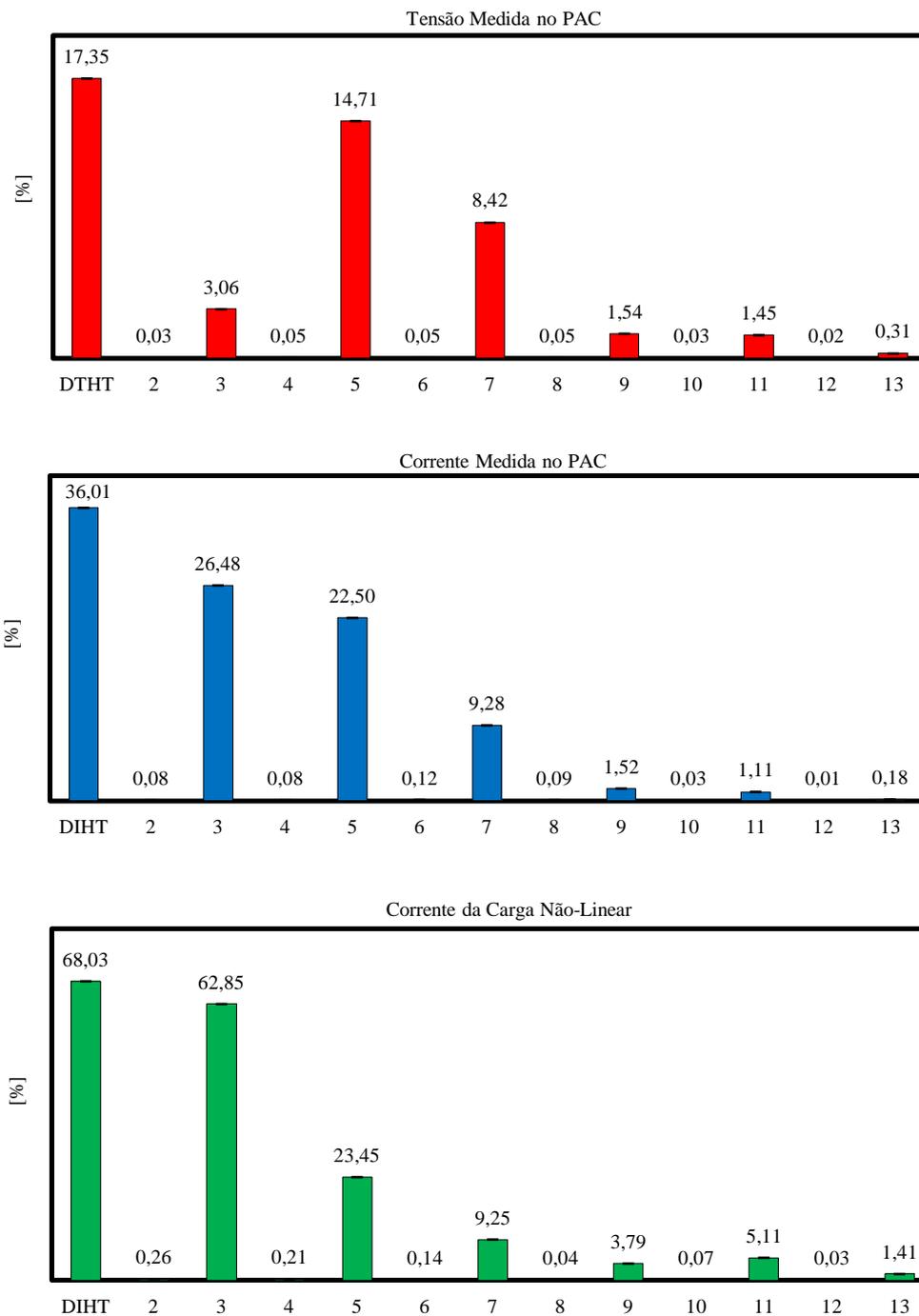


Figura 5.18 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03.

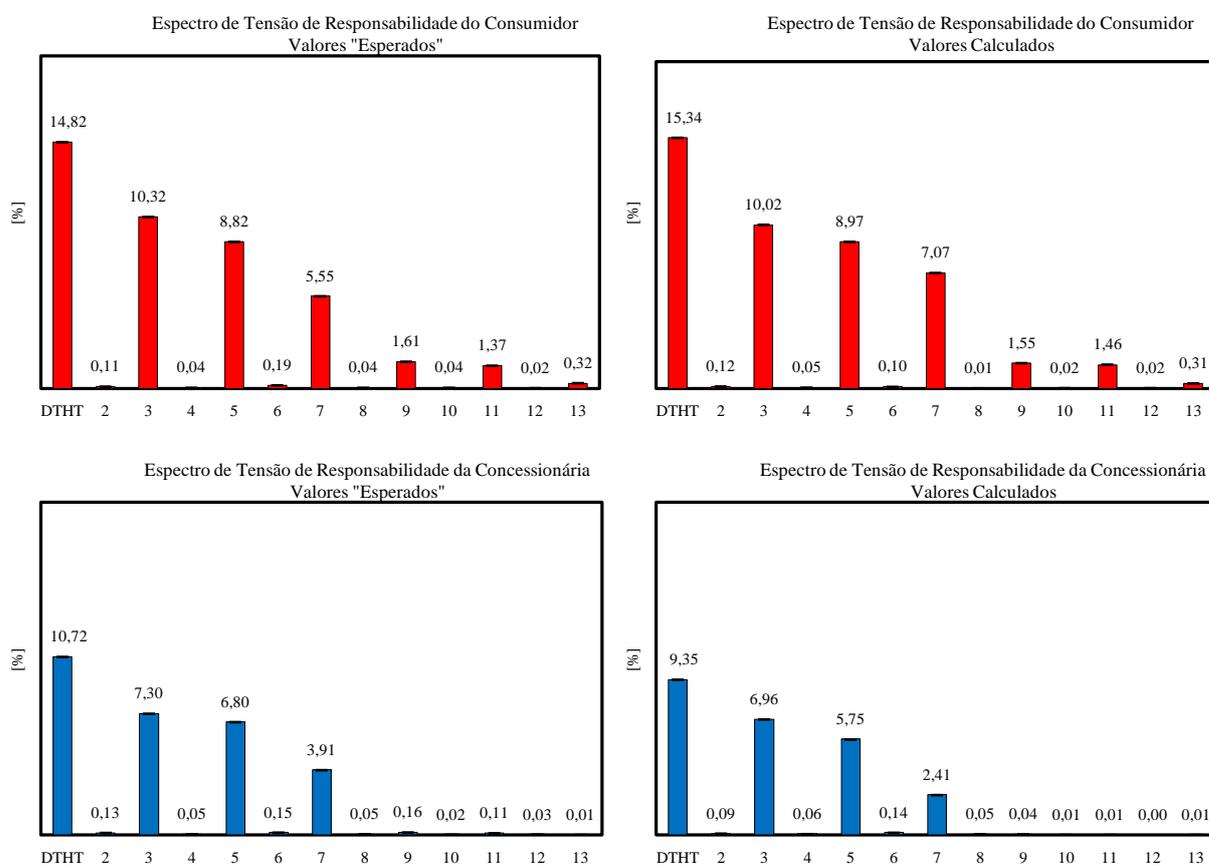
### Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.4 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 03.

*Tabela 5.4 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 03.*

<b>R [<math>\Omega</math>]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>
36,10	220,04	18,55

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.19.



*Figura 5.19 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 03.*

Também para este caso, a figura 5.20 apresenta os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária para as harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados, ordens 3, 5 e 7.

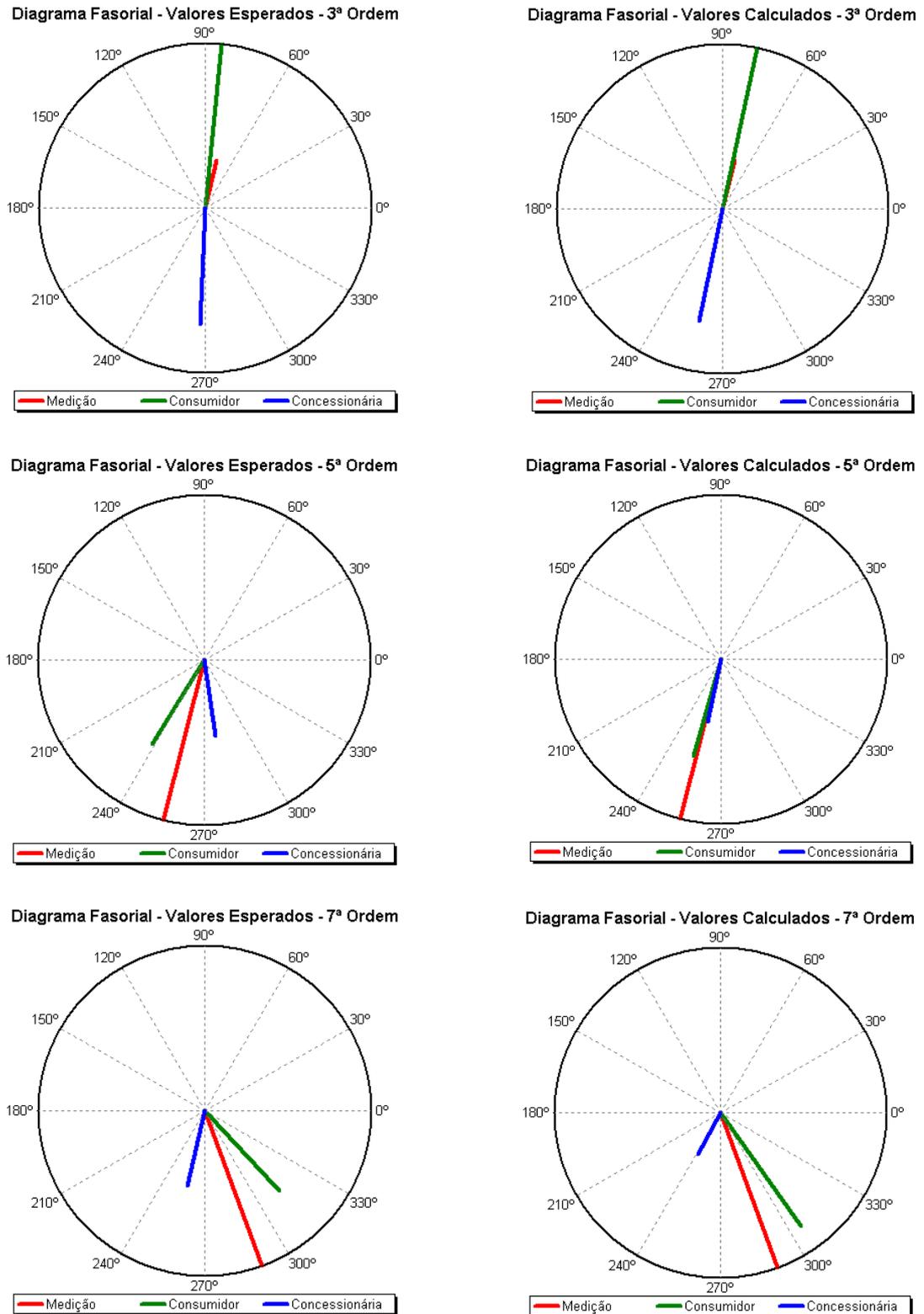


Figura 5.20 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 03.

### **Comentários**

Os resultados evidenciam que:

- A inversão de 180° no ângulo de defasagem das distorções oriundas da concessionária não afetou o desempenho da metodologia e, mais uma vez, a proposta mostrou-se satisfatória.
- A distorção de tensão de 3ª ordem, de forma semelhante ao ocorrido para a harmônica de ordem 5 no caso anterior, não apresenta níveis superiores aos recomendados pelo ONS [3]. Mas, os valores “esperados” e calculados, indicam que tanto o consumidor quanto a concessionária violam estes limites. Novamente, este fato é decorrente do cancelamento entre as tensões de ambas as partes, conforme elucidado no diagrama fasorial da figura 5.19.
- A maior discrepância entre as distorções esperadas e as calculadas é observada para ordem 7. Este fato é justificado pela amplificação das impedâncias harmônicas do PAC nas proximidades desta ordem (ressonância paralela), conforme visualizado na figura 5.9. Assim, qualquer imprecisão, mesmo que pequena, nos parâmetros da carga equivalente da carga pode resultar em uma diferença significativa na impedância deste ponto. Apesar desta característica, não houve maiores prejuízos ao processo de separação das responsabilidades.

#### **d) Caso 04**

Neste caso as distorções harmônicas provenientes do sistema supridor são substancialmente majoradas, sem qualquer alteração nas cargas lineares e não-lineares do sistema testes. Os novos níveis das distorções harmônicas de tensão programados na fonte de alimentação são:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 16% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 13% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 8% do valor fundamental;

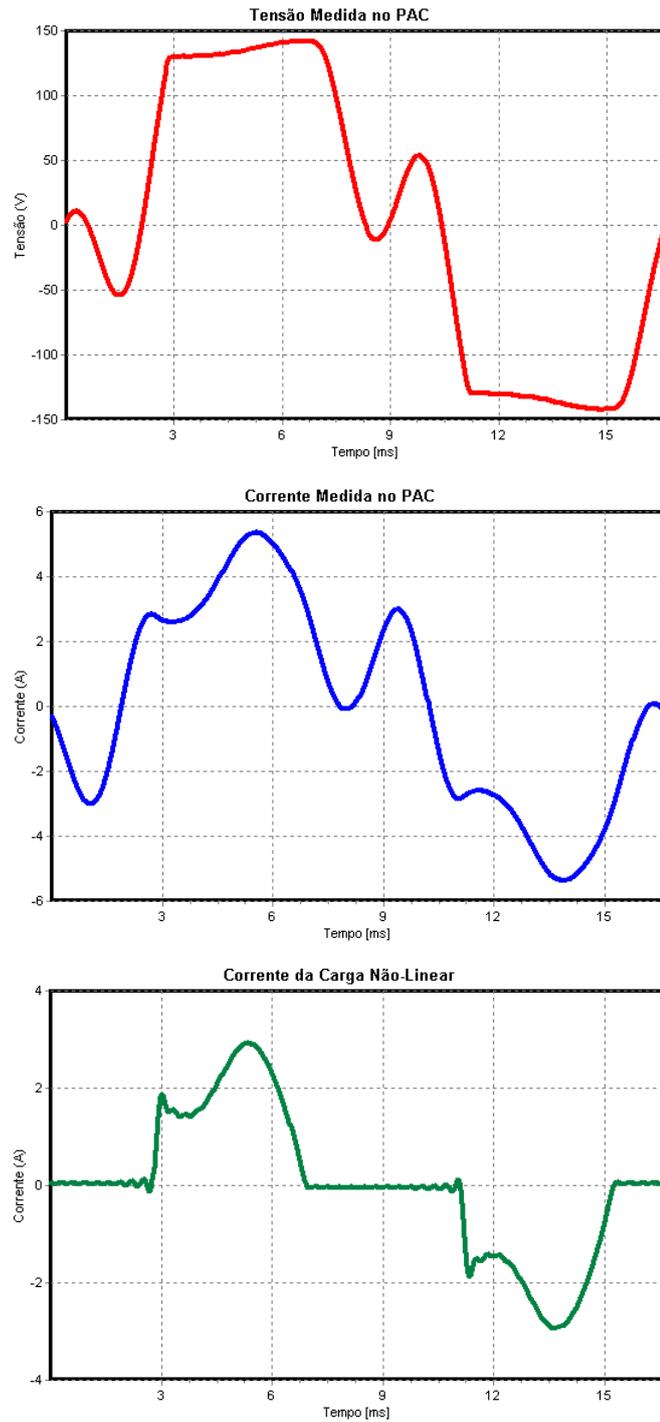
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

O acréscimo nas distorções harmônicas presentes no PAC objetiva uma inversão das responsabilidades em comparação com os casos anteriores. Esta situação crítica também favorece mudanças significativas no comportamento da carga não-linear do consumidor, fato este não observado nos situações mostradas.

Na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 04.

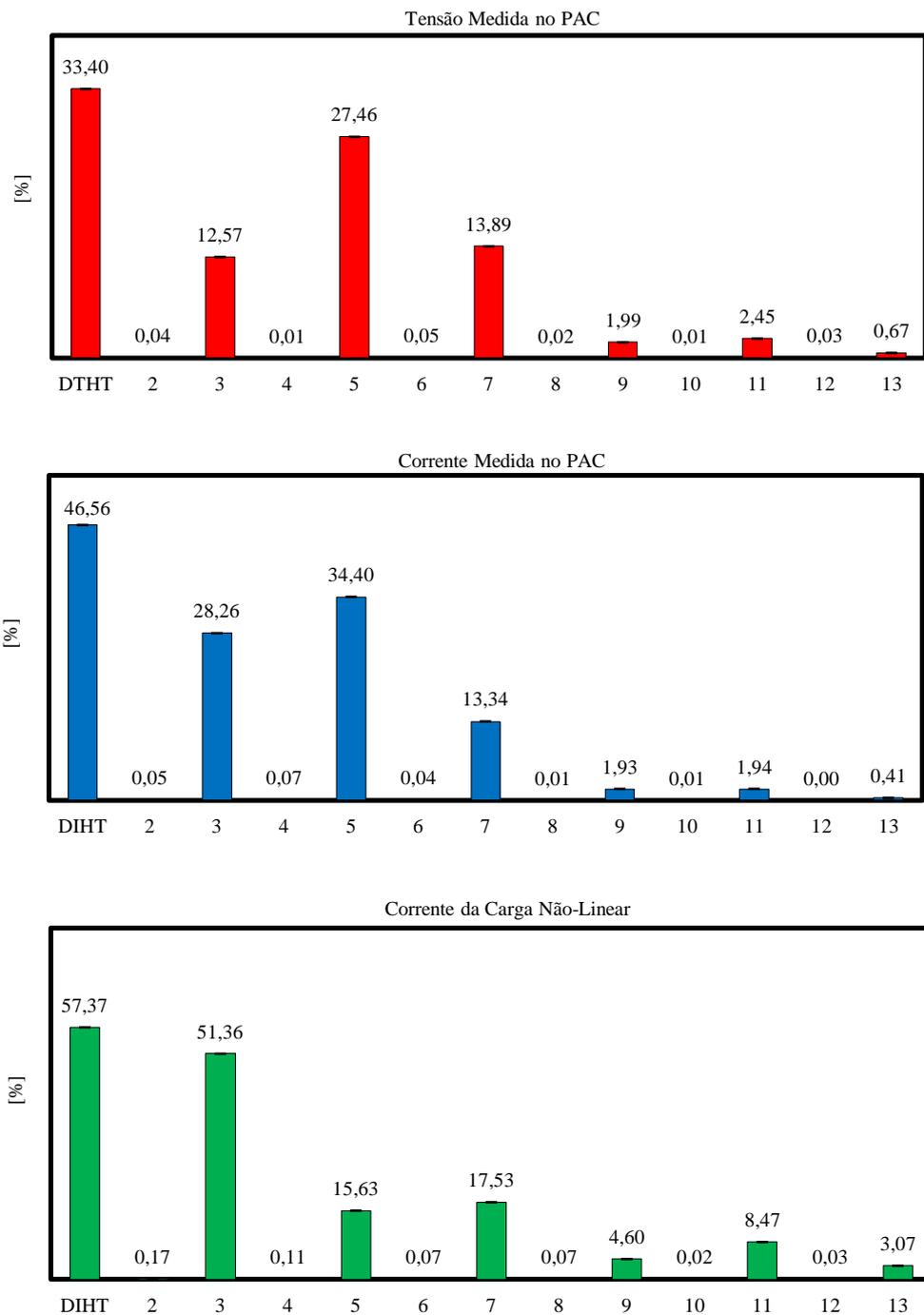
#### **Resultados experimentais**

A figura 5.21 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.



*Figura 5.21 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04.*

A figura 5.22 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.



*Figura 5.22 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04.*

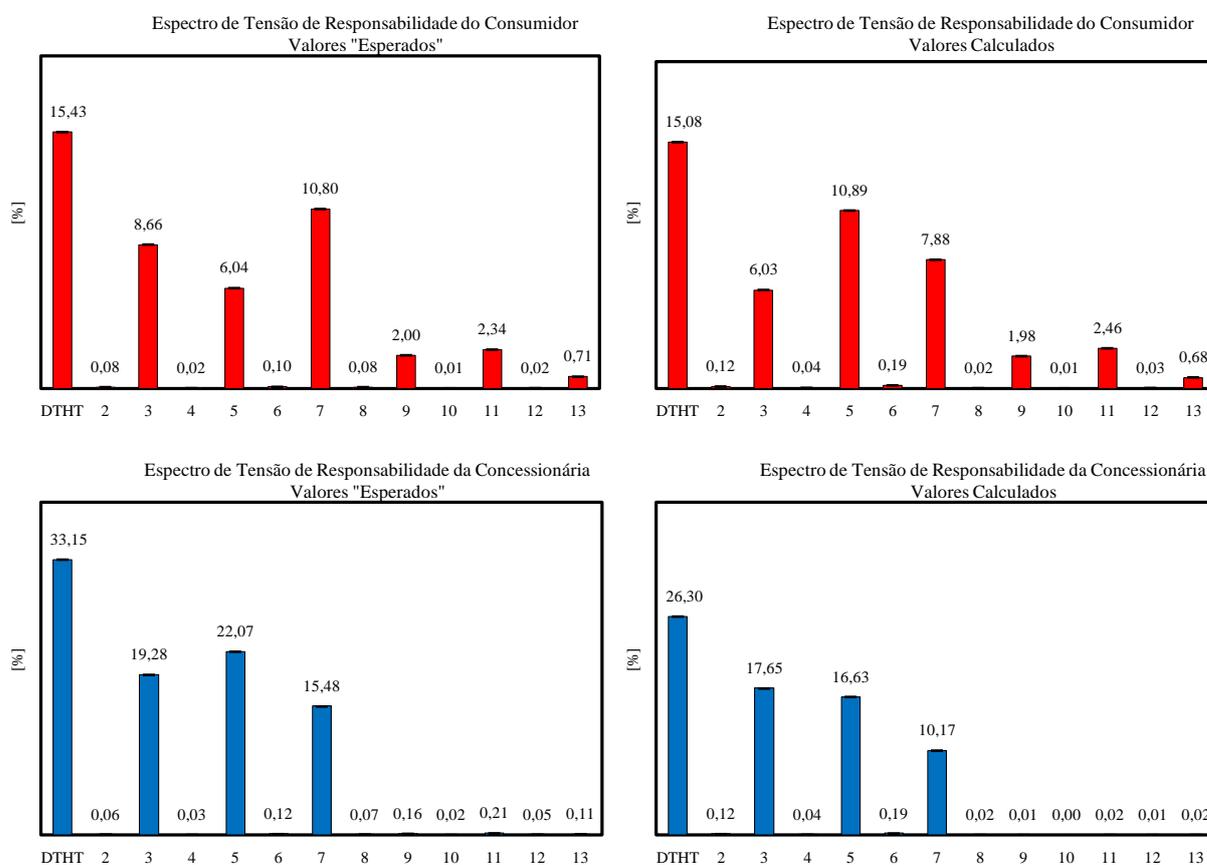
### **Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

A tabela 5.5 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 04.

*Tabela 5.5 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 04.*

<b>R [<math>\Omega</math>]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>
36,08	355,86	13,71

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.23.



*Figura 5.23 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 04.*

Os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária são mostrados pela figura 5.24 para aquelas harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados (3ª, 5ª e 7ª ordens).

Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 3ª Ordem

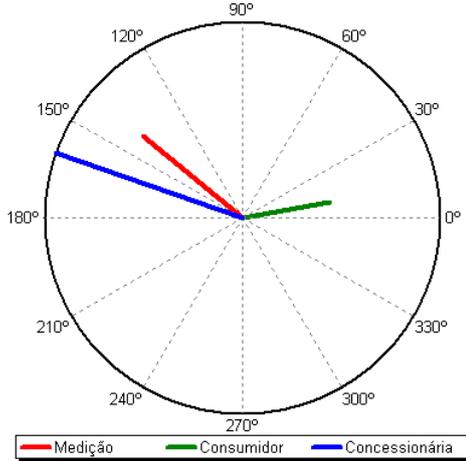


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 3ª Ordem

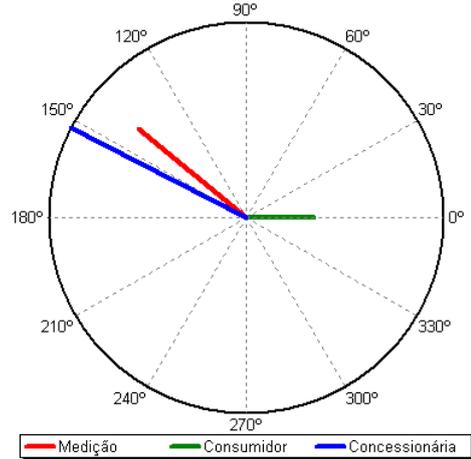


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 5ª Ordem

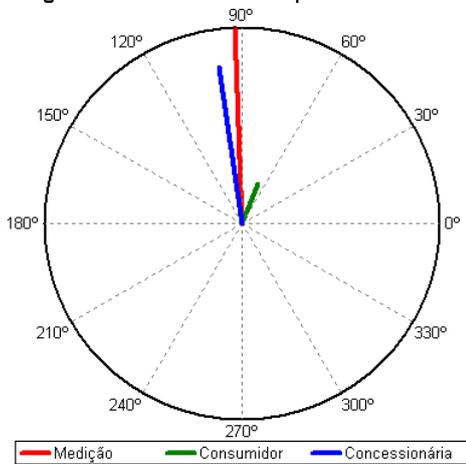


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 5ª Ordem

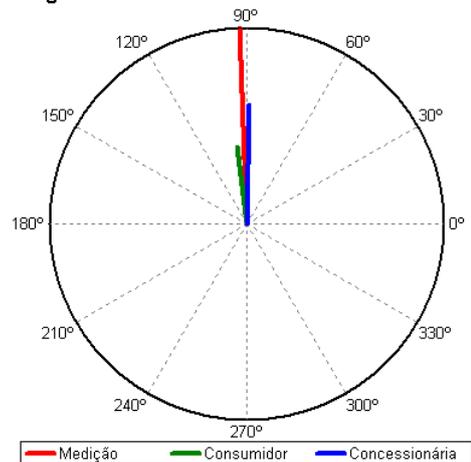


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 7ª Ordem

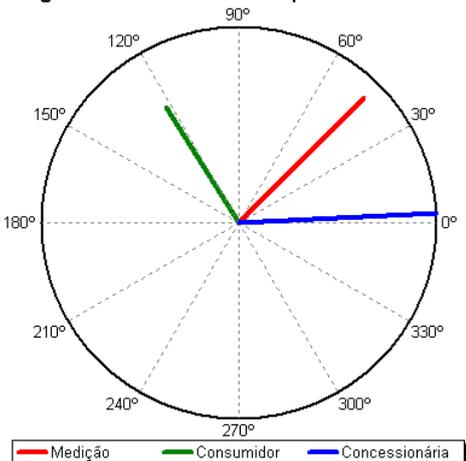


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 7ª Ordem

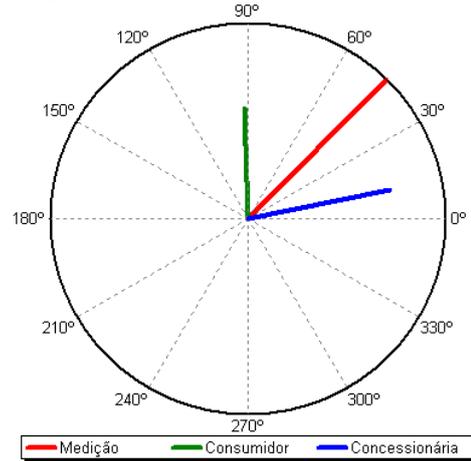


Figura 5.24 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04.

### **Comentários**

Para este caso, os resultados permitem os seguintes comentários:

- O conteúdo elevado de distorções harmônicas oriundas da concessionária modificou substancialmente o comportamento da carga não-linear (retificador) do consumidor. Estas condições operacionais conduziram a uma redução nas correntes harmônicas de ordem 3 e 5, e um substancial acréscimo para a 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens.
- As distorções de responsabilidade exclusiva do consumidor (9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens) continuam com resultados satisfatórios e atestam a independência destas ordens com relação às ordens com contribuição de ambas as partes.
- Para a 3<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, apesar das diferenças registradas entre os valores calculados e os “esperados”, a relação entre estes parâmetros permite uma adequada separação das responsabilidades sobre estas distorções.
- Os valores “esperados” para a harmônica de ordem 5 indicam uma diferença de aproximadamente 15,97% entre a concessionária e o consumidor (22,04 e 6,07% respectivamente). Esta diferença é de 5,74% para os valores calculados (16,63% e 10,89%, respectivamente). Não obstante a esta observação, a responsabilidade sobre as distorções desta ordem continua clara.

### **e) Caso 05**

Seguindo o mesmo procedimento adotado para os casos iniciais, o Caso 05 é semelhante ao Caso 04 com relação ao módulo das distorções presentes no sistema supridor, sendo alterada a defasagem angular das harmônicas consideradas.

Assim, a configuração da fonte de tensão segue os seguintes parâmetros:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 16% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 13% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

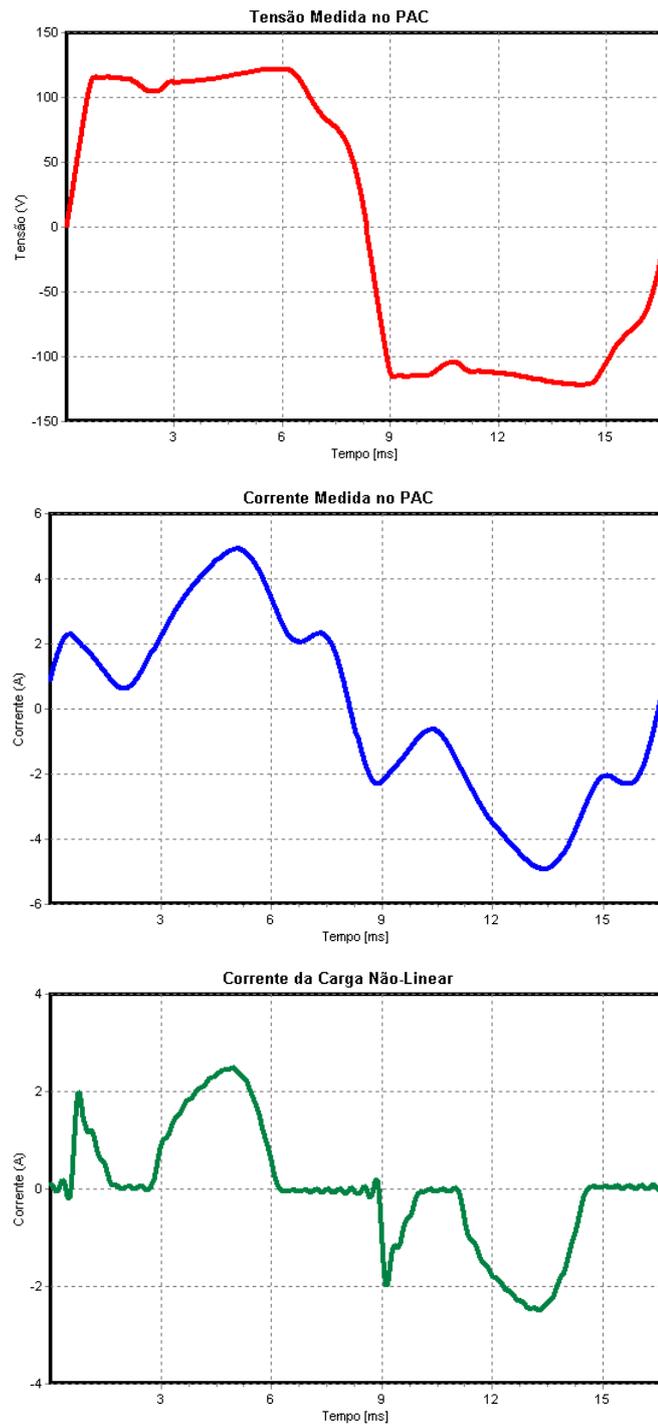
Magnitude = 8% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

Na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 05.

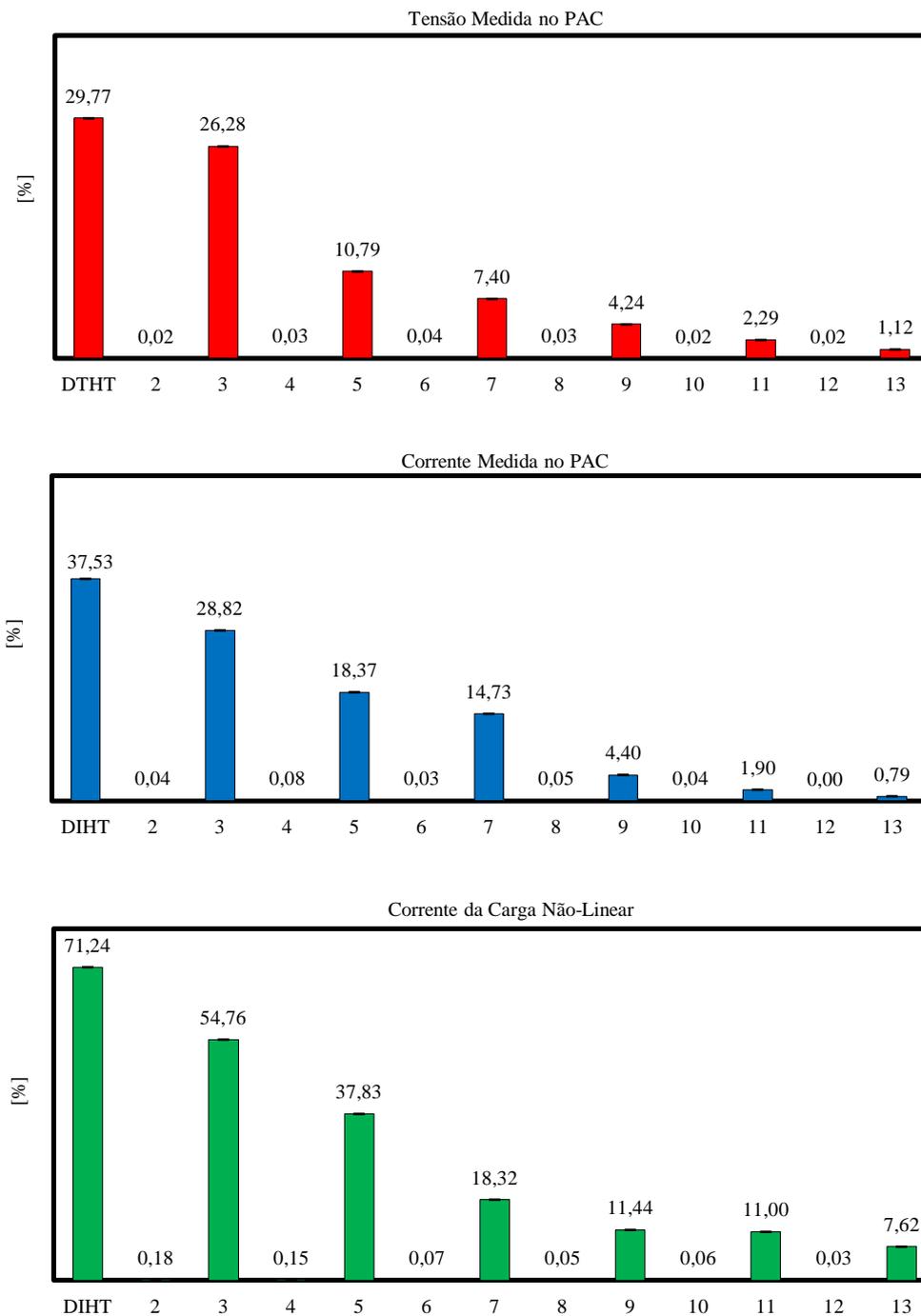
#### **Resultados experimentais**

A figura 5.25 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.



*Figura 5.25 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05.*

A figura 5.26 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.



*Figura 5.26 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05.*

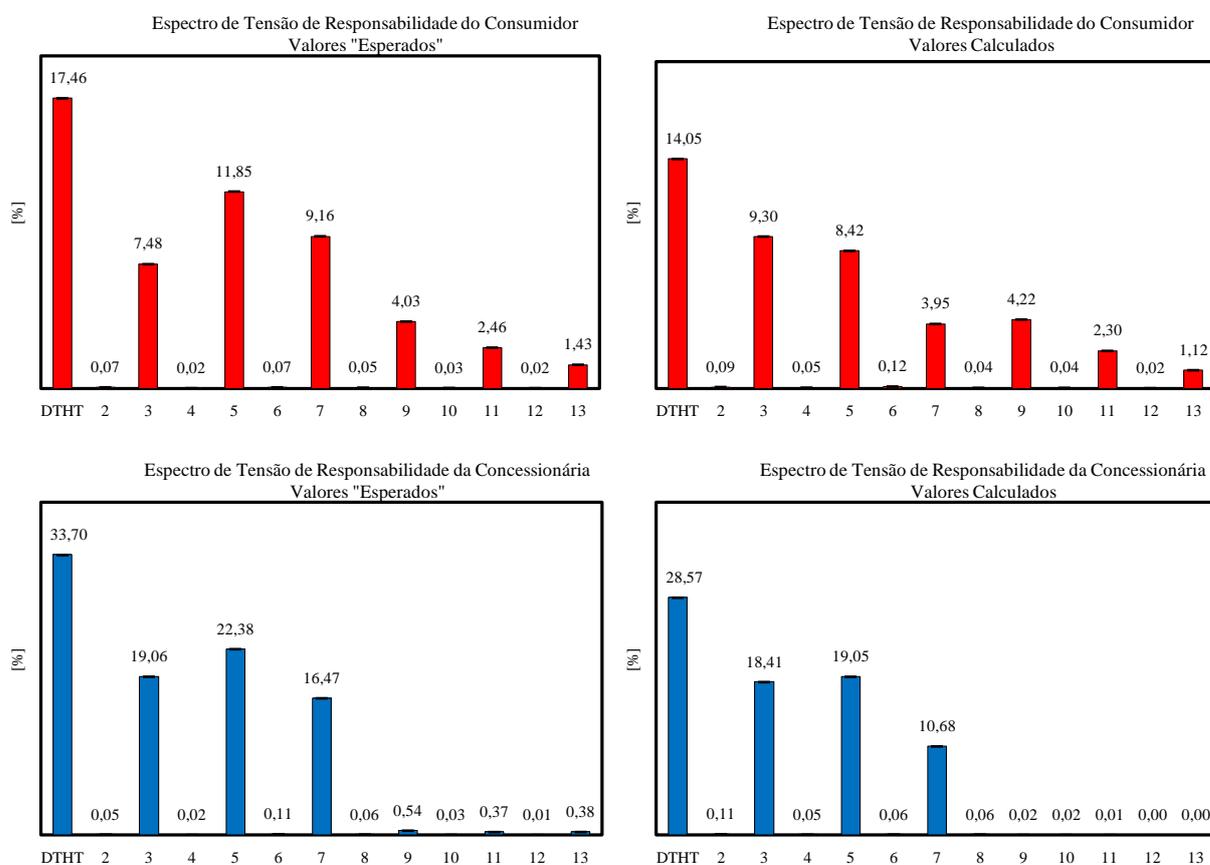
### **Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

A tabela 5.6 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 05.

*Tabela 5.6 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 05.*

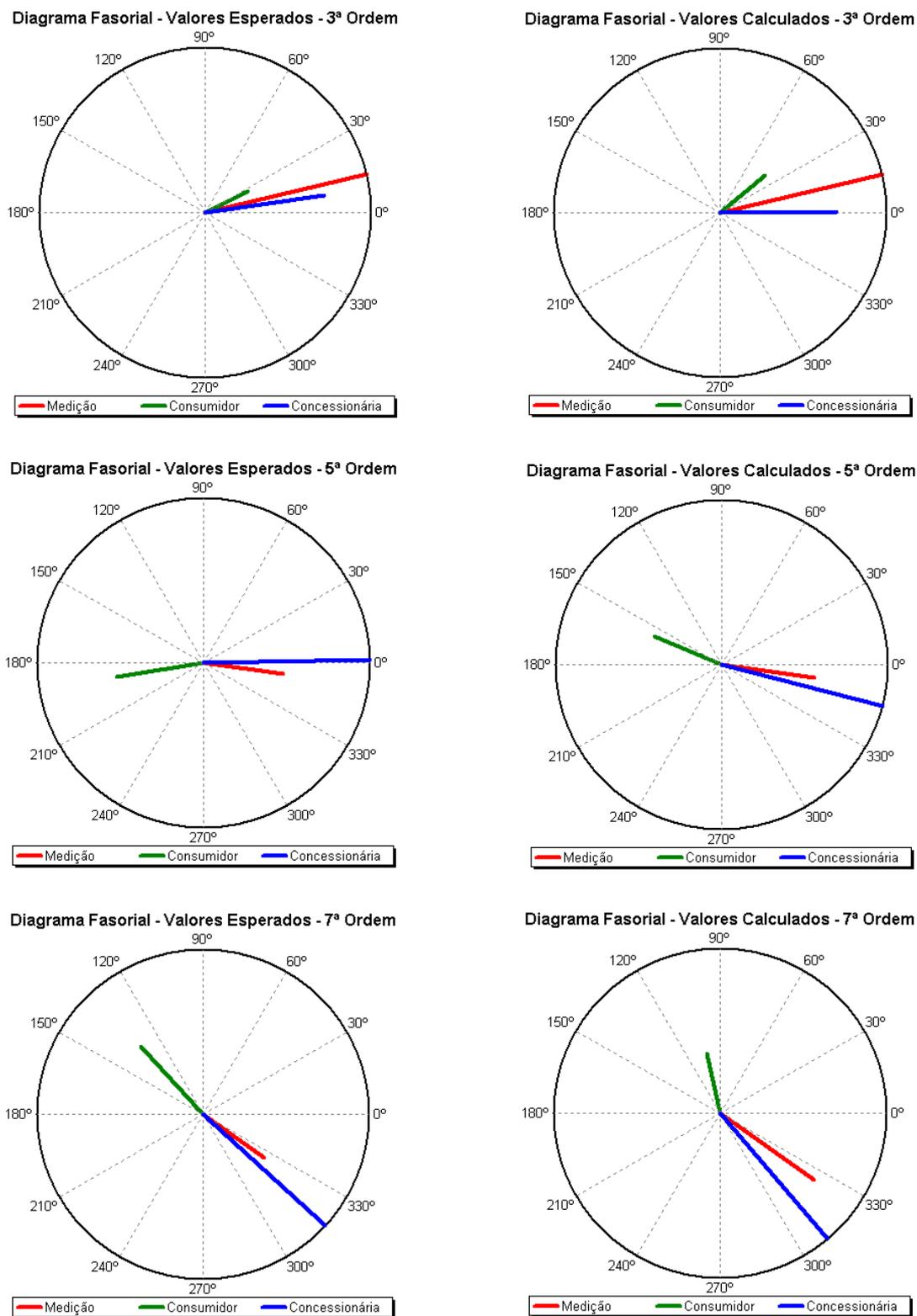
<b>R [<math>\Omega</math>]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>
39,97	240,86	16,97

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.27.



*Figura 5.27 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 05.*

Os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária são mostrados pela figura 5.28 para aquelas harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados (3ª, 5ª e 7ª ordens).



*Figura 5.28 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04.*

### **Comentários**

- A forma de onda da corrente do retificador é bastante diferente daquelas observadas nos casos anteriores, evidenciando o efeito das elevadas distorções da rede de suprimento. Com exceção da 3ª ordem, todas as demais foram majoradas. Esta condição operacional conduz a um acréscimo nas distorções de responsabilidade do consumidor. Portanto, situações adversas de suprimento podem aumentar a geração de correntes harmônicas por parte das cargas não-lineares do consumidor, agravando a situação inicial.
- Diferentemente do caso anterior, apesar das diferenças entre os valores “esperados” e calculados, a relação entre estes parâmetros permite uma adequada separação das responsabilidades sobre todas as distorções presentes no espectro de tensão.

### **f) Caso 06**

Com o intuito de verificar a resposta da metodologia de separação das responsabilidades quando somente o supridor possuir distorções harmônicas, surge o presente caso. Esta situação determina a ausência de cargas não-lineares nas instalações do consumidor, portanto, o retificador do sistema teste é desconectado. As distorções harmônicas contidas na fonte de alimentação possuem a seguinte configuração:

- 3ª ordem (180 Hz):  
Magnitude = 6% do valor fundamental;  
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.
- 5ª ordem (300 Hz):  
Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular =  $0^\circ$  em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

Defasagem angular =  $0^\circ$  em relação à tensão fundamental.

Na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 06.

### **Resultados experimentais**

A figura 5.29 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum.

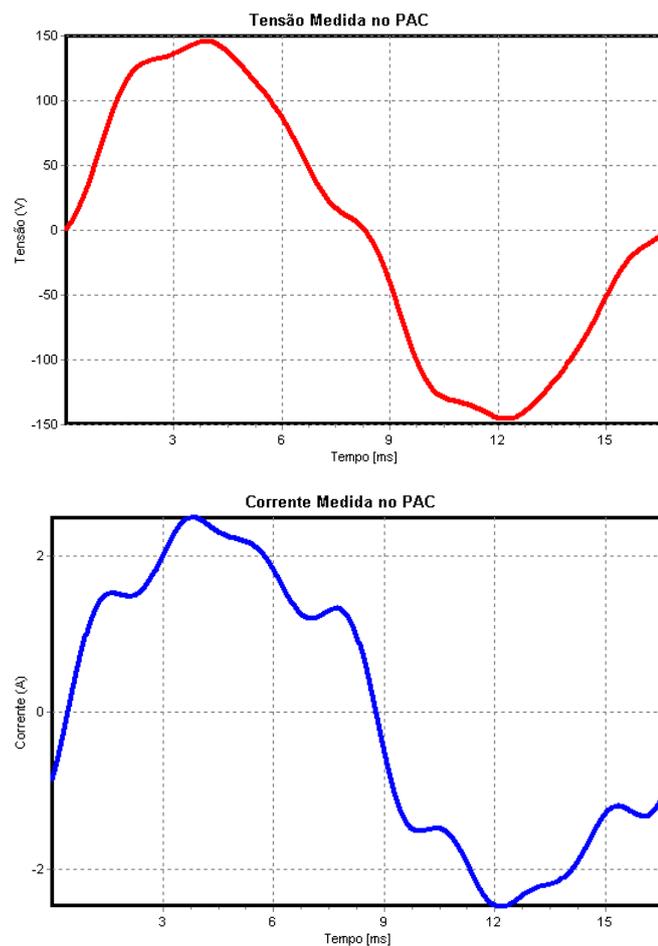


Figura 5.29 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06.

A figura 5.30 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

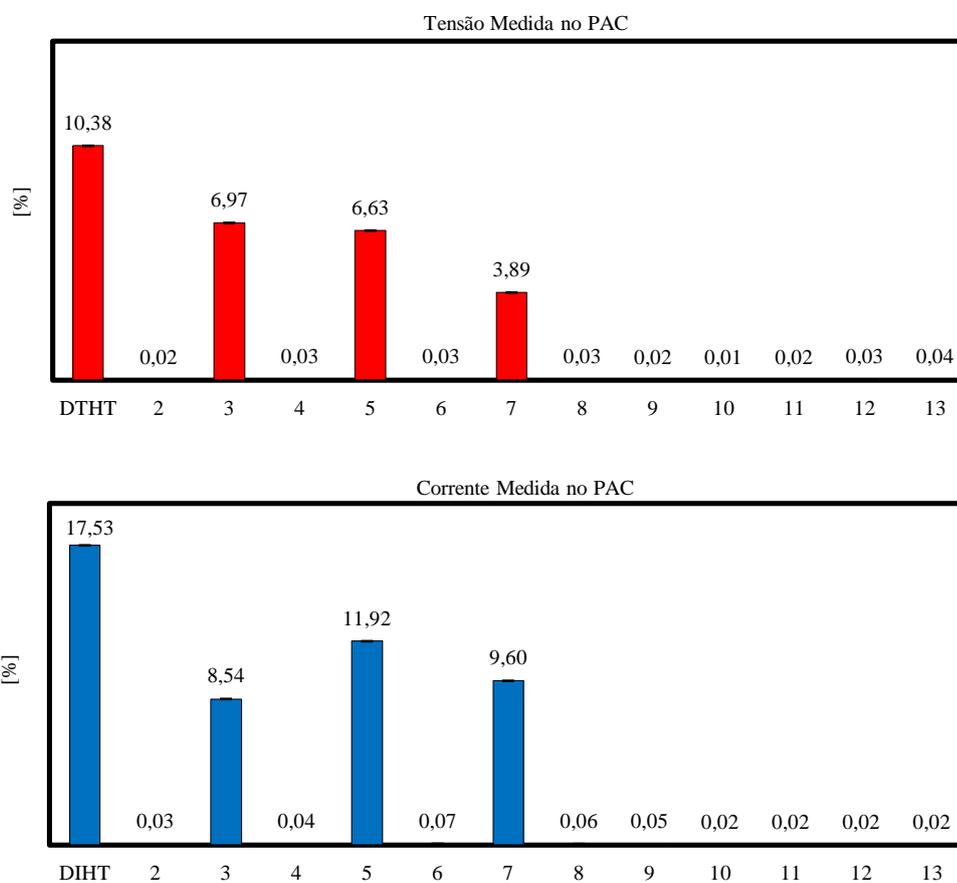


Figura 5.30 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06.

### **Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

A tabela 5.7 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 06.

Tabela 5.7 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 06.

<b>R [Ω]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [μF]</b>
61,46	274,03	13,65

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.31.

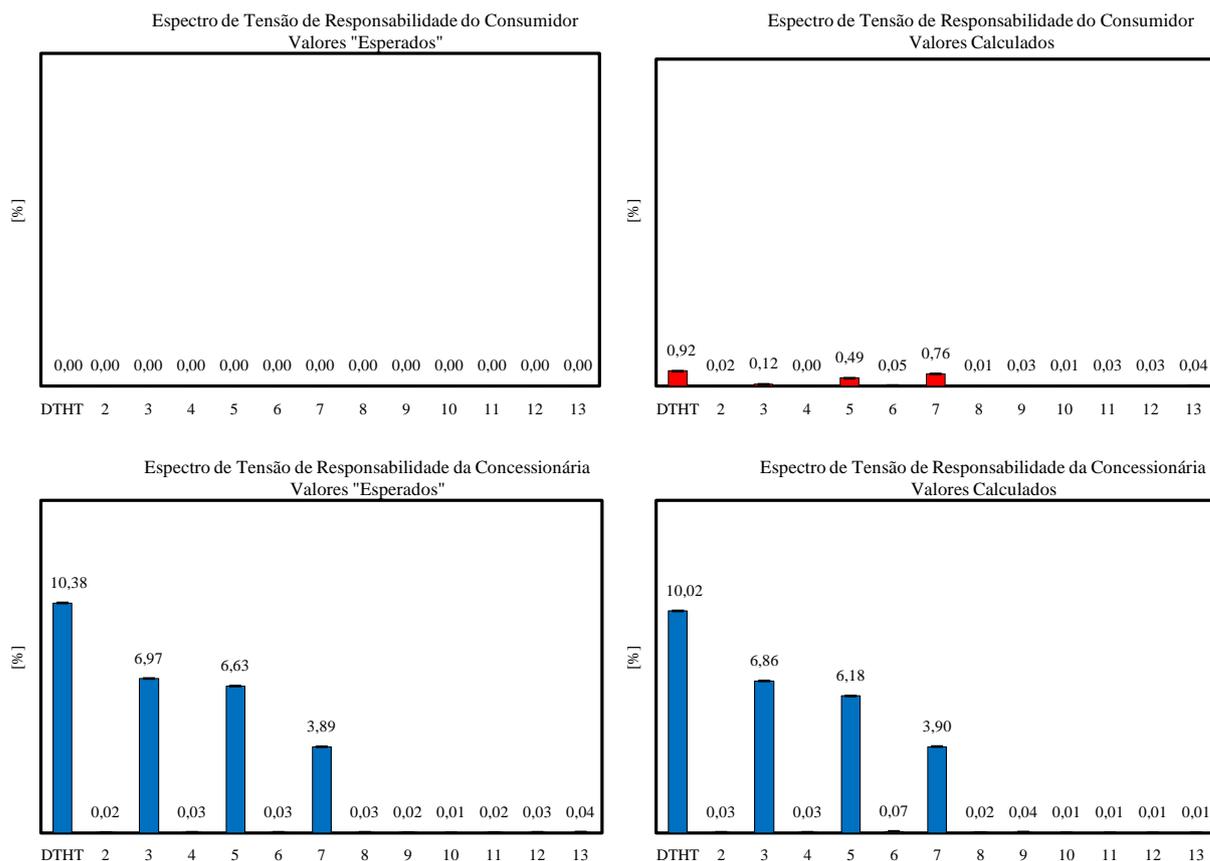


Figura 5.31 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 06.

**Comentário:**

- De acordo com os resultados apresentados a proposta de metodologia de separação das distorções harmônicas é adequada à identificação do responsável quando a fonte das mesmas é exclusiva do sistema supridor.

**g) Caso 07**

Por fim, de forma a manter a seqüência de estudos de casos apresentada, o Caso 07 é semelhante ao anterior quanto à instalação do consumidor, ou seja, somente cargas lineares. Quanto à fonte de alimentação, as distorções utilizam os mesmos patamares dos Casos 03 e 04, conforme descrito na seqüência:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 16% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 13% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 8% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

### **Resultados experimentais**

A figura 5.32 apresenta os parâmetros medidos no ponto de acoplamento comum.

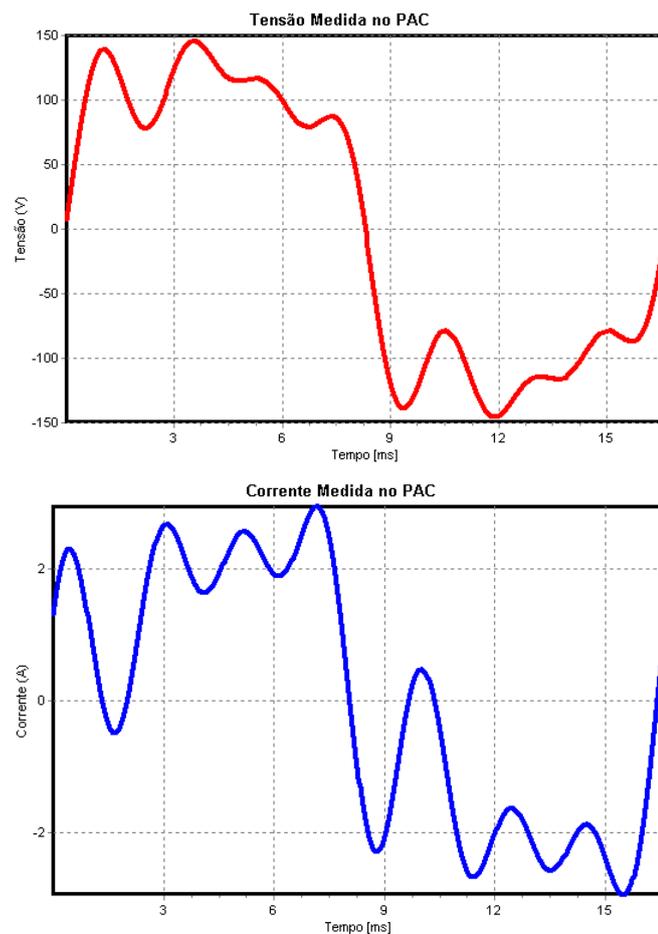


Figura 5.32 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07.

A figura 5.33 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

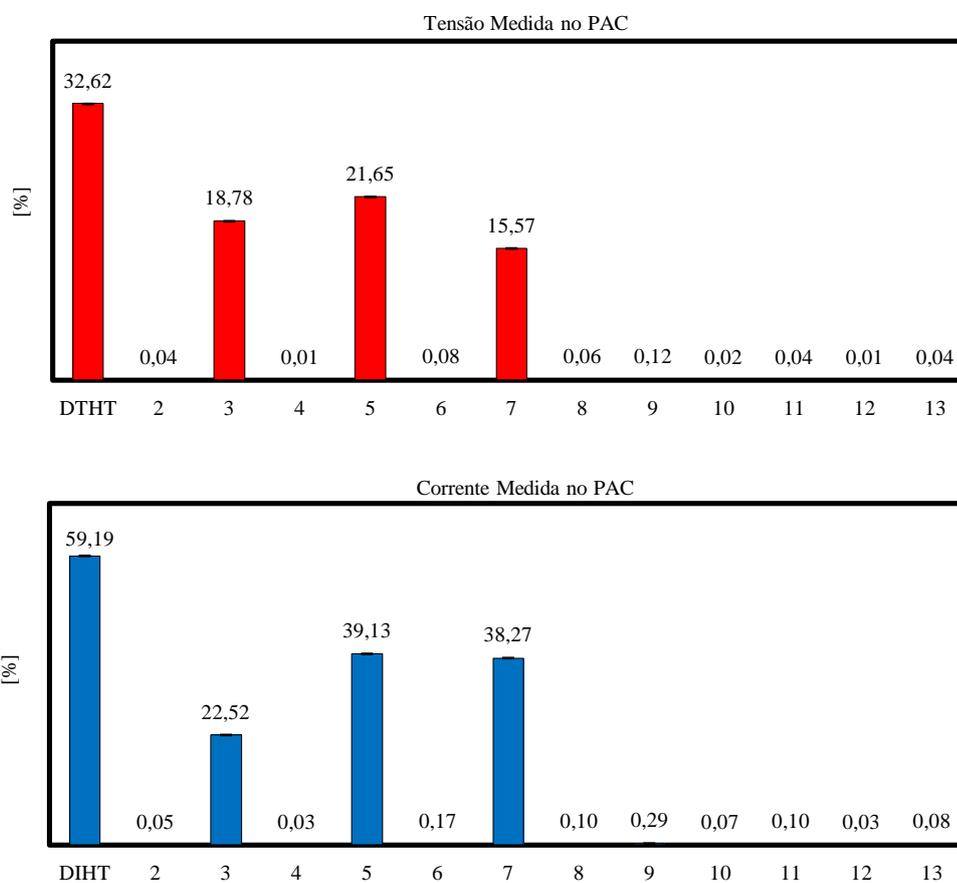


Figura 5.33 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07.

### **Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções**

A tabela 5.8 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 07.

Tabela 5.8 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 07.

<b>R [Ω]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>C [μF]</b>
61,63	270,39	13,95

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.34.

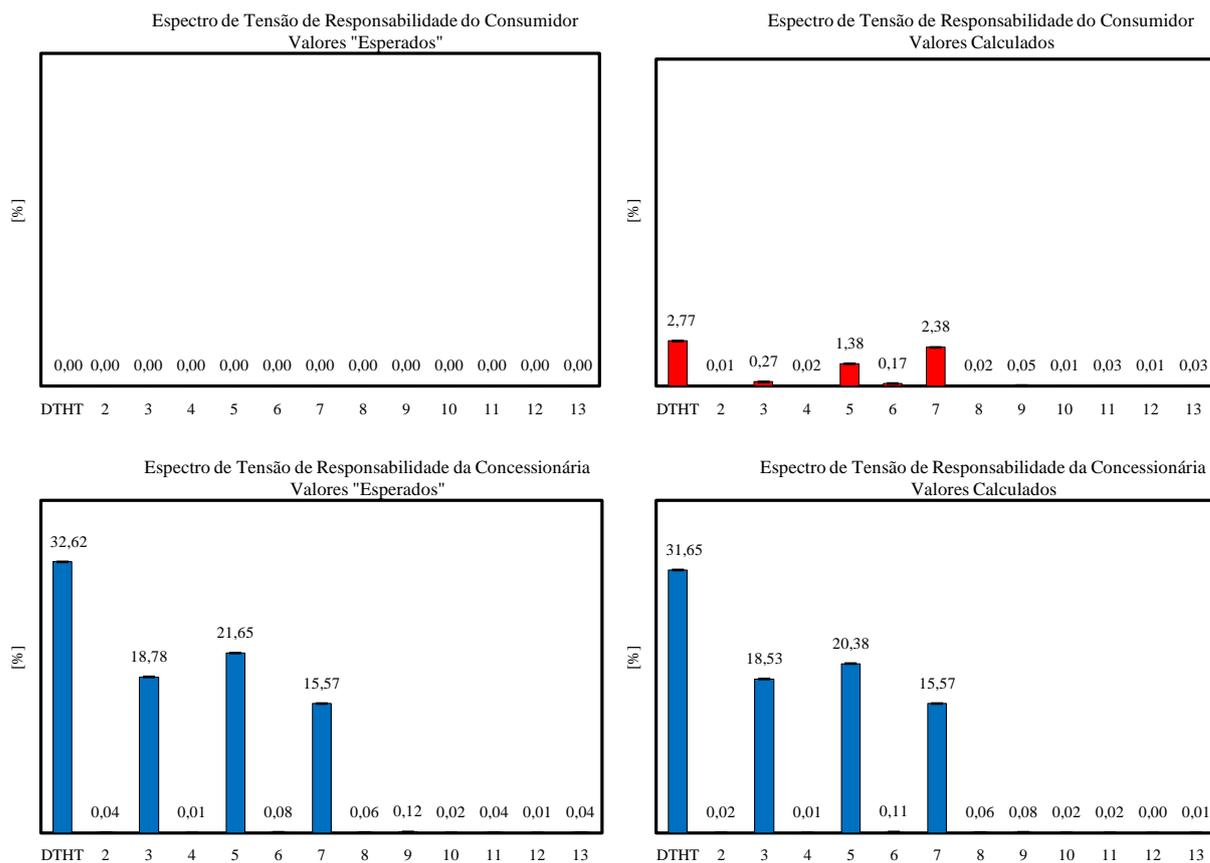


Figura 5.34 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 07.

**Comentário:**

- Não obstante aos valores calculados para as distorções do consumidor, a eficácia da metodologia é notória e corrobora os resultados e comentários do caso anterior, confirmando a aplicabilidade da proposta a sistemas cuja fonte de suprimento seja dominante quanto às distorções harmônicas.

## **5.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM UM SISTEMA REAL**

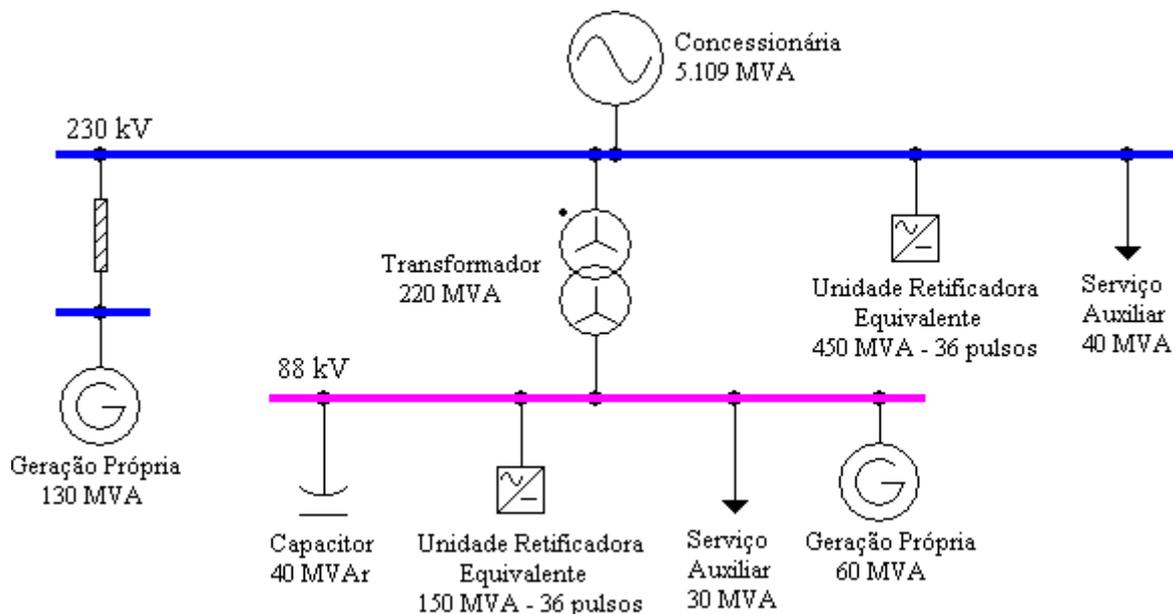
Prosseguindo com o processo de avaliação do desempenho da metodologia proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, em complemento às análises laboratoriais, procedeu-se, nesta etapa, à aplicação da proposta para um sistema elétrico real.

Em se tratando de um sistema real, vale ressaltar que, diferentemente da situação encontrada nos ensaios laboratoriais, não há facilidades que permitam a identificação dos valores exatos para fins de comparação com aqueles advindos do método. Em síntese, para a situação em pauta, não há meios para uma estimativa precisa dos valores esperados para as distorções harmônicas relativas ao consumidor e ao concessionário. Portanto, a verificação da consistência dos resultados é fundamentada no conhecimento das características operacionais inerentes ao consumidor, como seria, por exemplo, o caso de uma carga predominantemente caracterizada por retificadores de 12 pulsos, para a qual há de se esperar que as distorções harmônicas de ordem 11 e 13 estejam, prioritariamente, atreladas com o consumo e não como o fornecimento de energia. Alternativamente, caso haja nas vizinhanças cargas reconhecidamente geradores de frequências harmônicas conhecidas, é de se esperar que estas possam ser dominantes no processo e, se este for o caso, as distorções estariam relacionadas com o suprimento.

Não obstante às dificuldades ressaltadas e outras, os trabalhos a seguir descritos encontram-se correlacionados com um complexo elétrico de grande porte (demanda superior a 500 MW), contendo cargas não-lineares (retificadores) e conectado à rede básica em 230 kV.

### a) Diagrama unifilar simplificado

A figura 5.35 apresenta o diagrama unifilar simplificado da instalação real, de grande porte, utilizada para a aplicação da metodologia de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.



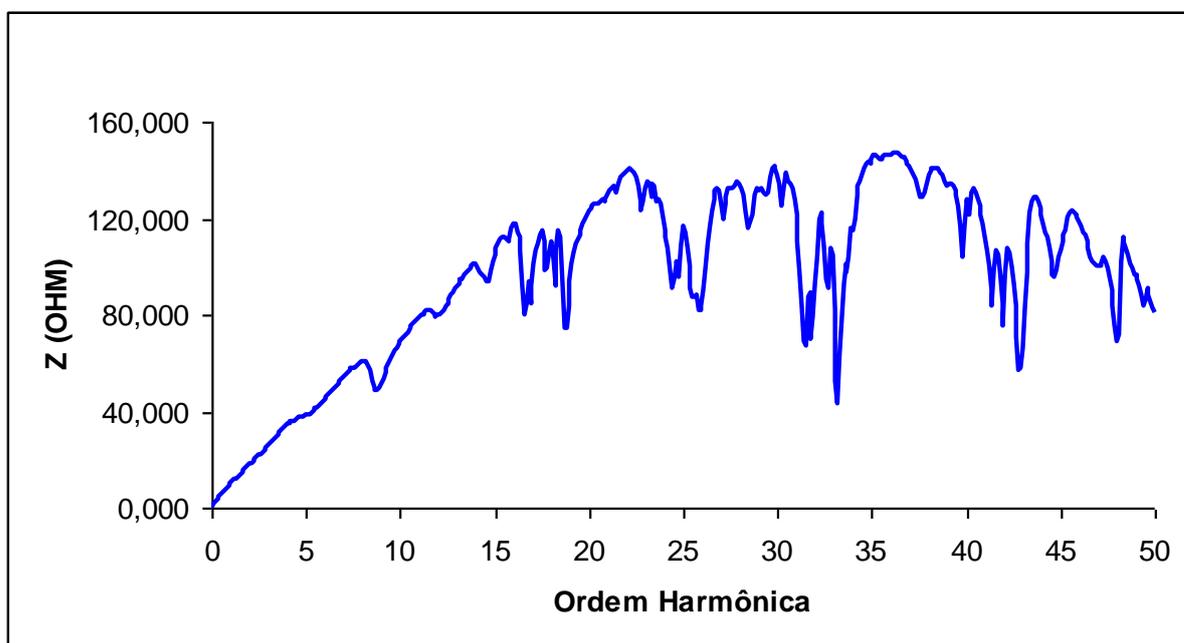
*Figura 5.35 – Diagrama unifilar simplificado do complexo elétrico escolhido.*

Os retificadores indicados na figura acima correspondem a conjuntos de retificadores formando arranjos de 36 ou 48 pulsos. Com exceção de um conjunto de retificação, todos os demais possuem filtros harmônicos para a compensação das distorções harmônicas.

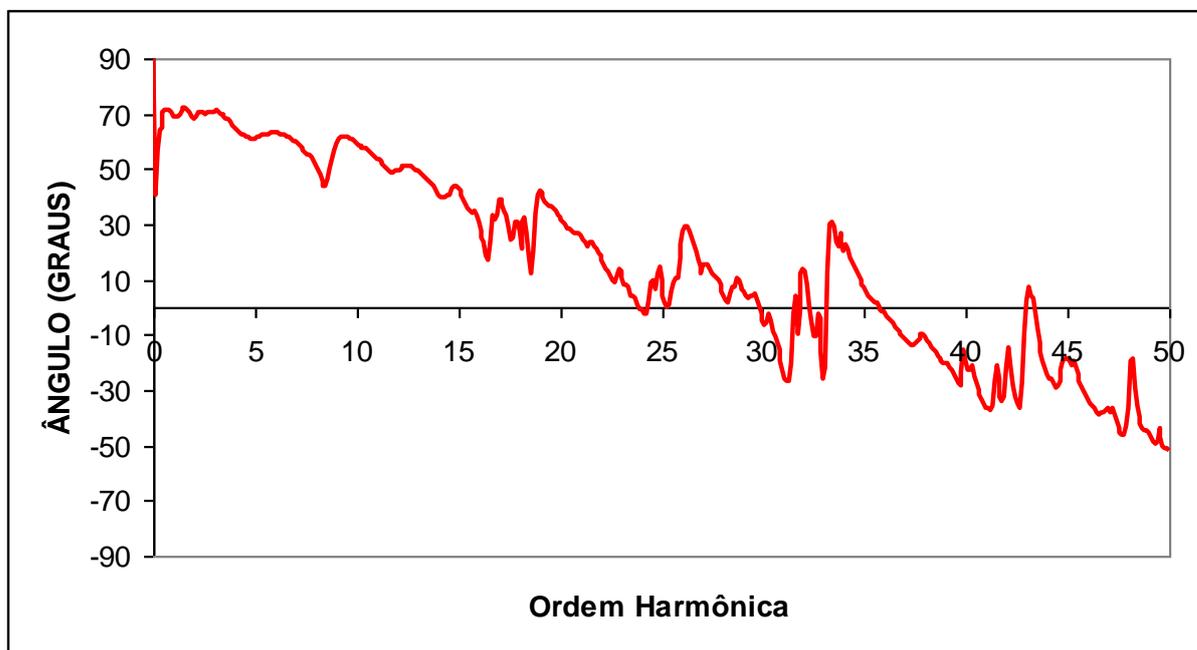
### b) Impedância Harmônica da Concessionária

Como destacado ao longo desta tese, o conhecimento da impedância harmônica da rede de suprimento da concessionária é imprescindível para a aplicação da metodologia de separação das distorções harmônicas. Como o complexo industrial analisado está conectado à rede básica, as impedâncias harmônicas do PAC, fornecidas pela concessionária, foram obtidas através do HARMZS [40] utilizando as bases para carga pesada de junho de 2007 do

Programa de Análises de Rede (ANAREDE) [41]. As figuras 5.36 e 5.37 apresentam as variações em frequência do módulo e ângulo destas impedâncias harmônicas.



*Figura 5.36 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Módulo.*



*Figura 5.37 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Ângulo.*

Conforme se observa nas figuras, as informações relativas às impedâncias e ângulos para as distintas frequências harmônicas são determinadas para uma única fase, sendo os resultados utilizados para as demais.

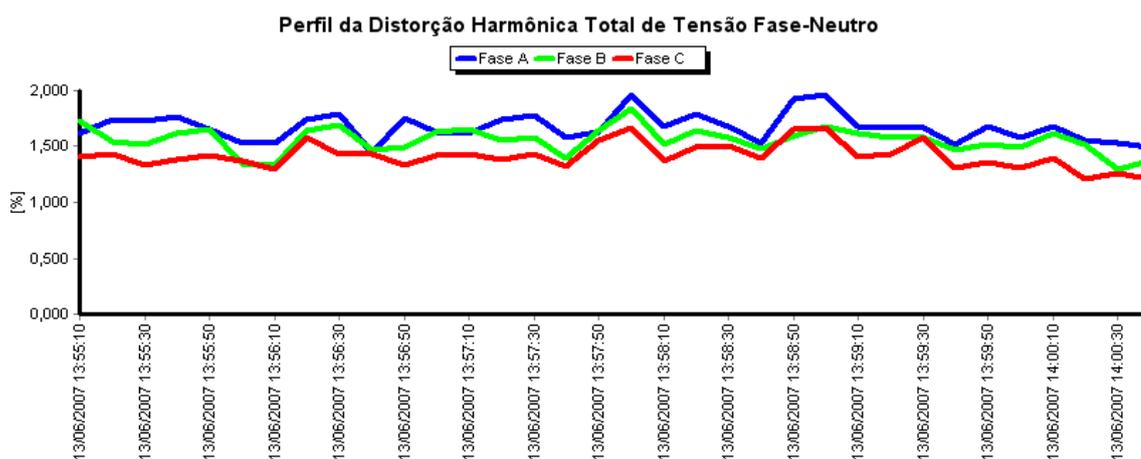
### **c) Distorções Harmônicas Medidas no PAC**

Muito embora as medições de distorções harmônicas realizadas junto ao PAC compreenderam períodos mais longos, para fins da elucidação do método, apenas um intervalo de tempo equivalente a 5 minutos de registros foi empregado para a aplicação do processo da atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas. Neste intervalo há uma garantia do funcionamento do sistema elétrico com todos os componentes indicados na figura 5.35 em operação.

A seguir apresenta-se o perfil das distorções harmônicas individuais de tensão e corrente para as harmônicas correspondentes às ordens 3, 5 e 7. Estas frequências, em conjunto com a distorção harmônica total, serão focadas no processo analítico em discussão.

#### **Distorção Harmônica Total de Tensão**

A figura 5.38 mostra o perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro durante o intervalo de tempo empregado. As grandezas referem-se ao PAC em 230 kV.



*Figura 5.38 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão.*

Os resultados para as distorções harmônicas totais de tensão, uma vez tratados segundo procedimentos clássicos da estatística, conduzem aos valores indicativos da tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões em % da fundamental.

Fase	Mín.	Méd.	Máx.	P95
A	1,44	1,67	1,97	1,94
B	1,29	1,56	1,84	1,70
C	1,21	1,42	1,67	1,66

### Distorção Harmônica Total de Corrente

A figura 5.39 mostra o perfil das distorções harmônicas totais das correntes no mesmo ponto, ou seja, no PAC.

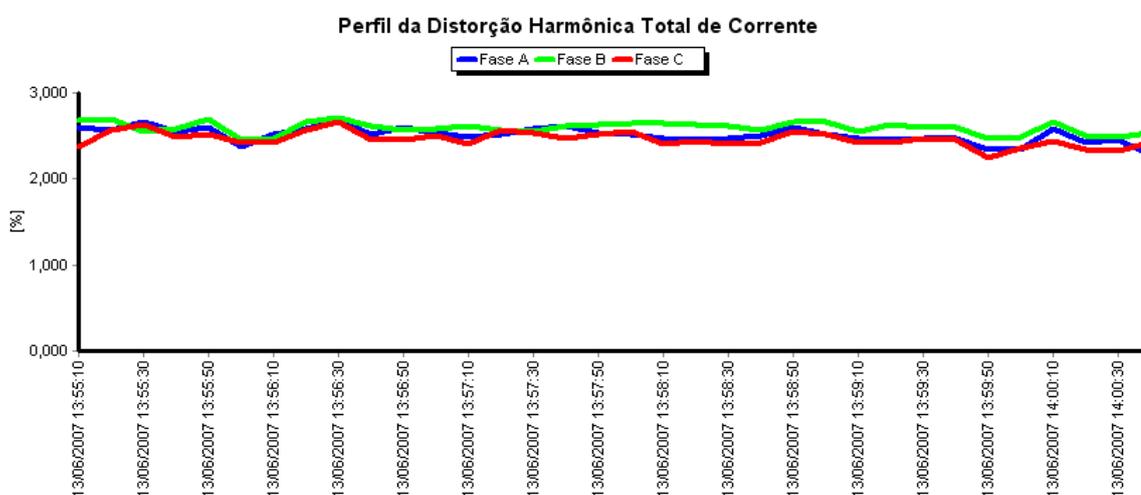


Figura 5.39 – Perfil das distorções harmônicas totais de corrente.

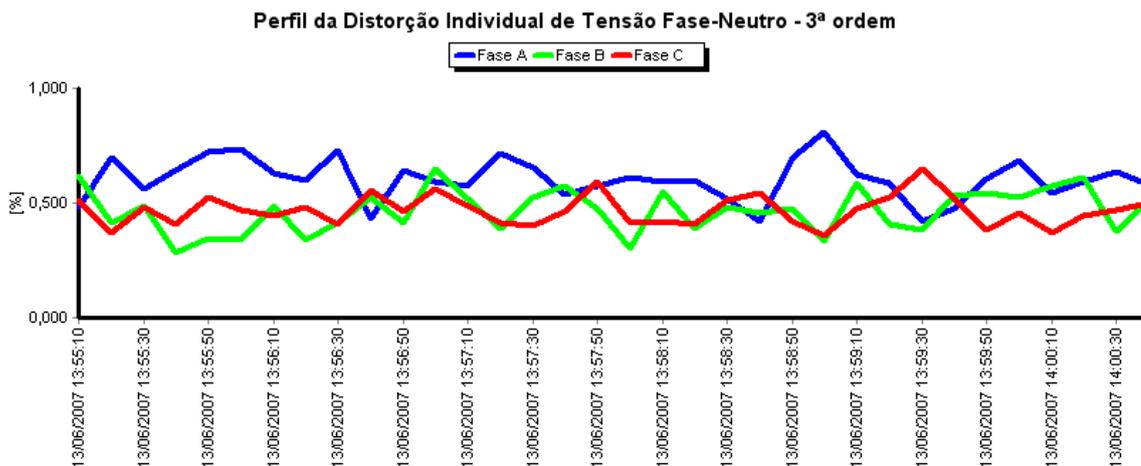
A tabela 5.10 evidencia os valores estatísticos concernentes às distorções harmônicas totais das correntes.

Tabela 5.10 – Valores estatísticos das distorções totais das correntes em % da fundamental.

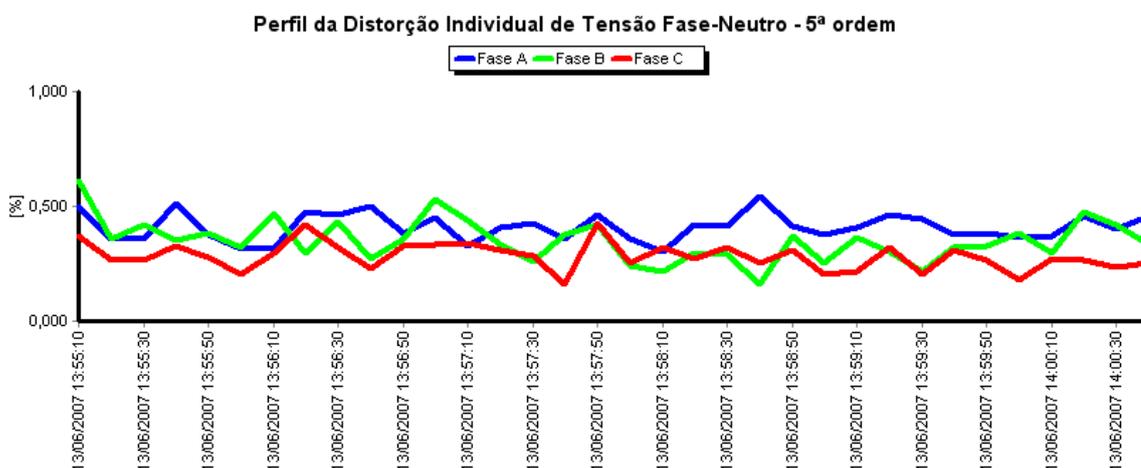
Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	2,28	2,51	2,68	2,63
B	2,46	2,59	2,71	2,69
C	2,25	2,46	2,66	2,59

### Distorções Harmônicas Individuais de Tensão

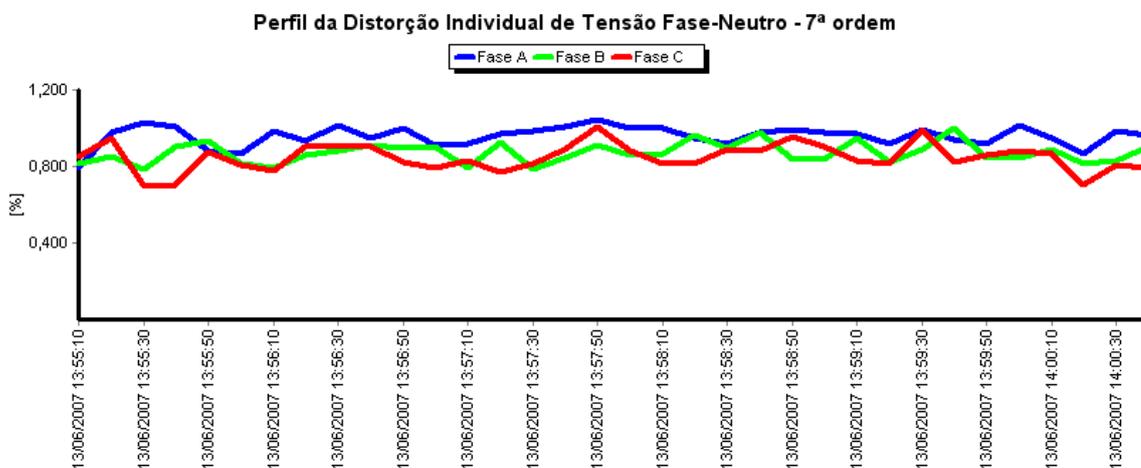
Complementarmente, as figuras 5.40 a 5.42 destacam os valores das distorções individuais associadas com as componentes de tensão de ordem 3, 5 e 7.



*Figura 5.40 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem*



*Figura 5.41 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem*



*Figura 5.42 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem*

As tabelas 5.11 a 5.13 apresentam os cálculos estatísticos referentes às distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Novamente, os valores estão expressos em percentuais das correspondentes grandezas fundamentais.

*Tabela 5.11 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem.*

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,42	0,60	0,81	0,73
B	0,28	0,47	0,65	0,61
C	0,36	0,47	0,65	0,57

*Tabela 5.12 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem.*

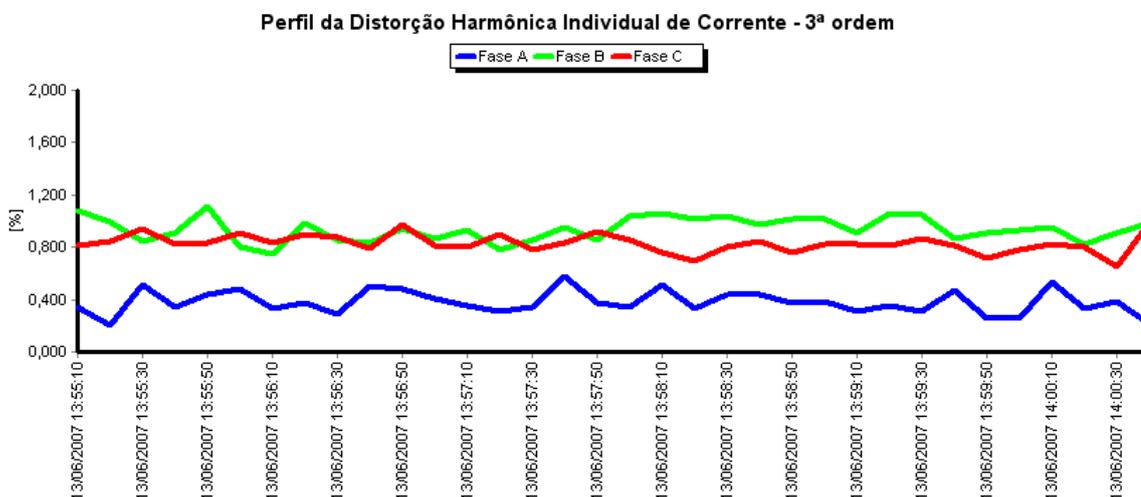
Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,30	0,41	0,54	0,51
B	0,16	0,35	0,61	0,49
C	0,16	0,28	0,42	0,39

*Tabela 5.13 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem.*

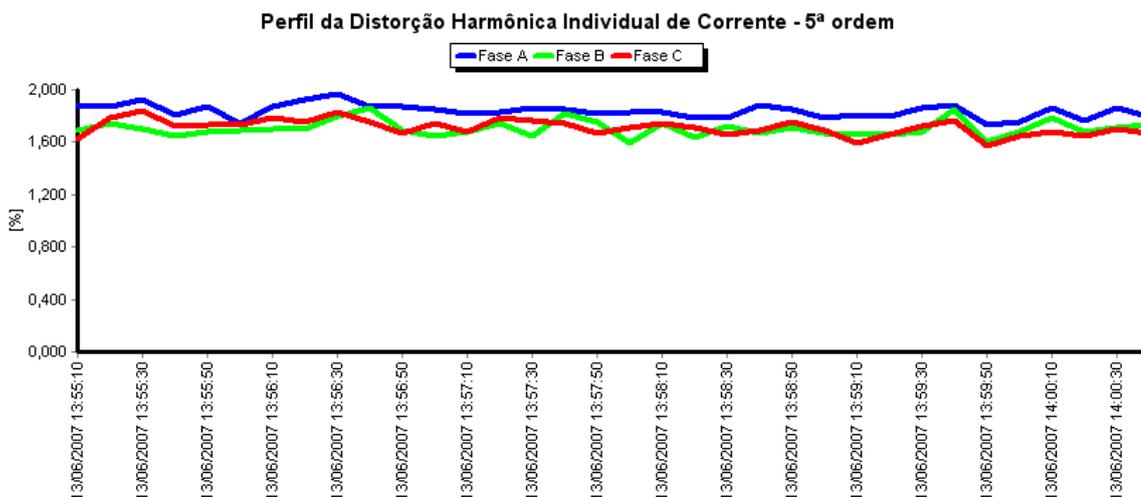
Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,80	0,96	1,04	1,02
B	0,78	0,87	1,00	0,97
C	0,70	0,85	1,01	0,97

### Distorções Harmônicas Individuais de Corrente

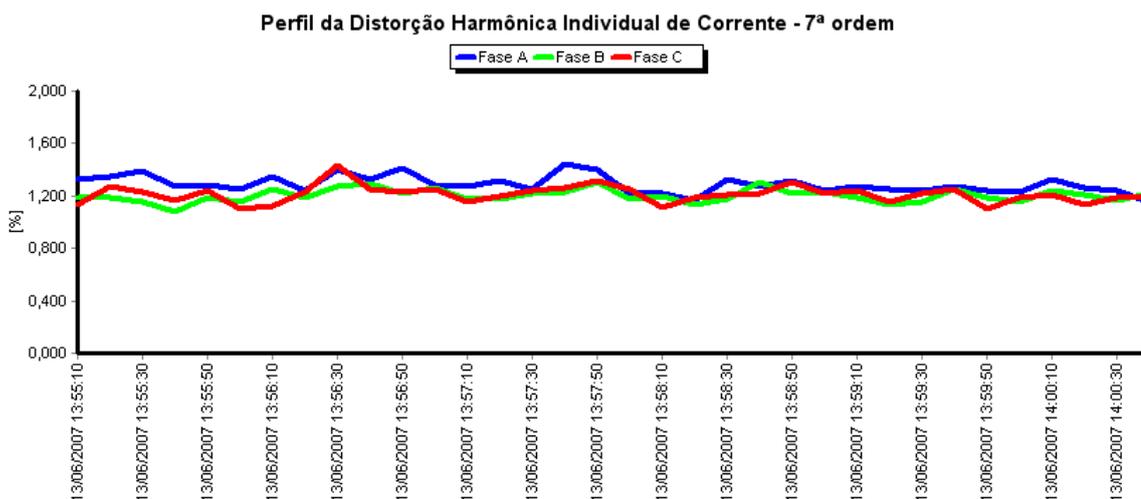
As correntes harmônicas, correspondentes às frequências acima caracterizadas, são apresentadas na sequência.



*Figura 5.43 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 3ª ordem*



*Figura 5.44 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 5ª ordem*



*Figura 5.45 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 7ª ordem*

As tabelas 5.14 a 5.16 apresentam os cálculos estatísticos referentes às distorções harmônicas individuais de corrente de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Mais uma vez, as grandezas são fornecidas em valores percentuais das suas respectivas fundamentais.

*Tabela 5.14 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 3ª ordem.*

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,20	0,38	0,58	0,52
B	0,75	0,94	1,11	1,07
C	0,65	0,83	0,98	0,95

*Tabela 5.15 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 5ª ordem.*

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
------	-----	-----	-----	-----

<b>A</b>	0,30	0,41	0,54	0,51
<b>B</b>	0,16	0,35	0,61	0,49
<b>C</b>	0,16	0,28	0,42	0,39

Tabela 5.16 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 7ª ordem.

<b>Fase</b>	<b>Mín</b>	<b>Méd</b>	<b>Máx</b>	<b>P95</b>
<b>A</b>	1,73	1,84	1,97	1,93
<b>B</b>	1,59	1,71	1,86	1,83
<b>C</b>	1,57	1,71	1,84	1,80

#### **d) Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas**

Para a separação das distorções harmônicas de tensão provenientes do consumidor e do supridor, novamente lança-se mão do programa computacional ATRES, objeto do capítulo anterior. Os resultados estão detalhados na seqüência, sendo que, para cada conjunto de informações, são apresentados gráficos de tendência, em conjunto com a respectiva tabela indicativa dos cálculos estatísticos referentes à grandeza sob análise.

#### **Distorções Harmônicas Totais de Tensão**

As figuras 5.46 e 5.47 e respectivas tabelas de tratamento estatístico apresentam, para o intervalo de tempo adotado para a aplicação do método da atribuição das responsabilidades, as parcelas das distorções totais associadas com o consumidor e com a concessionária, respectivamente.

#### **• CONSUMIDOR**

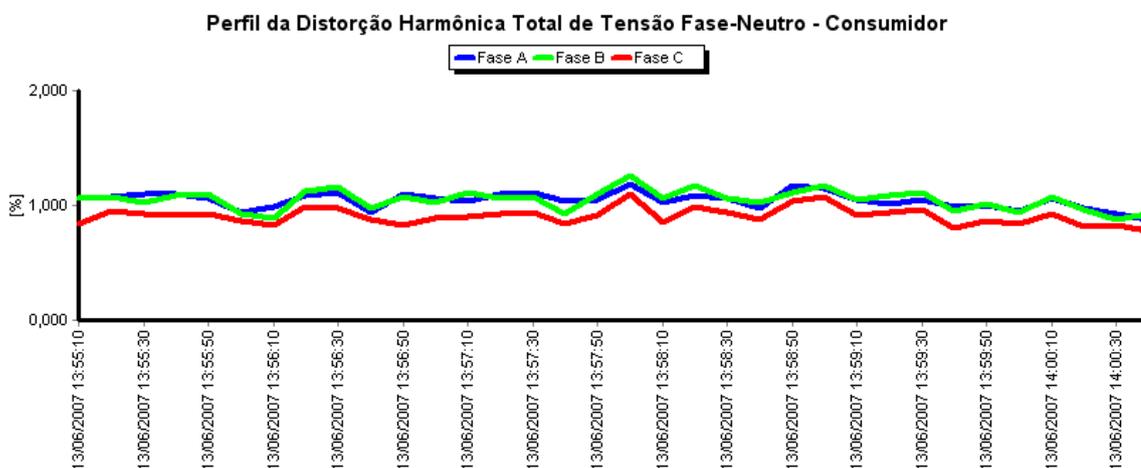


Figura 5.46 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Consumidor.

Tabela 5.17 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,88	1,04	1,19	1,16
B	0,88	1,05	1,26	1,17
C	0,78	0,91	1,10	1,05

• CONCESSIONÁRIA

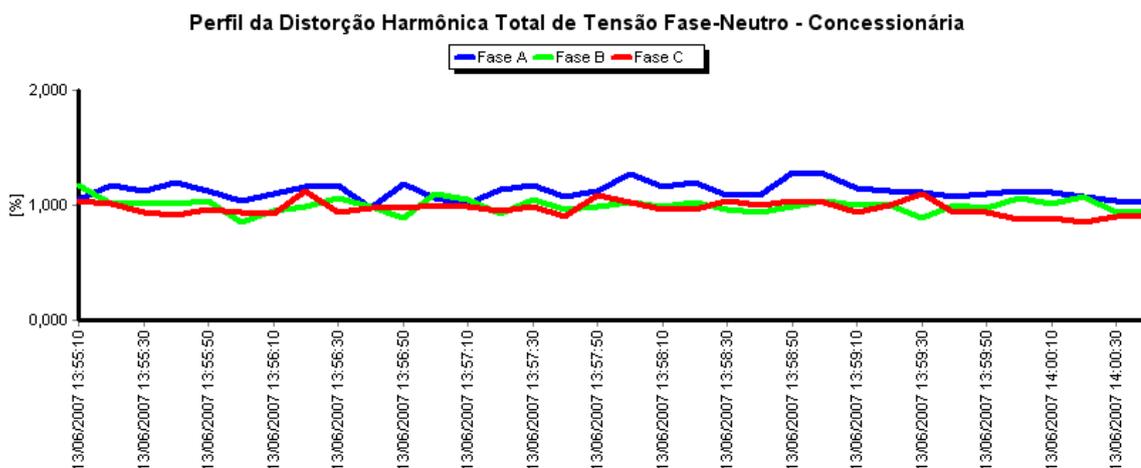


Figura 5.47 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Concessionária.

Tabela 5.18 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,98	1,12	1,28	1,28
B	0,85	1,00	1,17	1,08
C	0,85	0,97	1,12	1,09

**Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 3ª Ordem**

• CONSUMIDOR

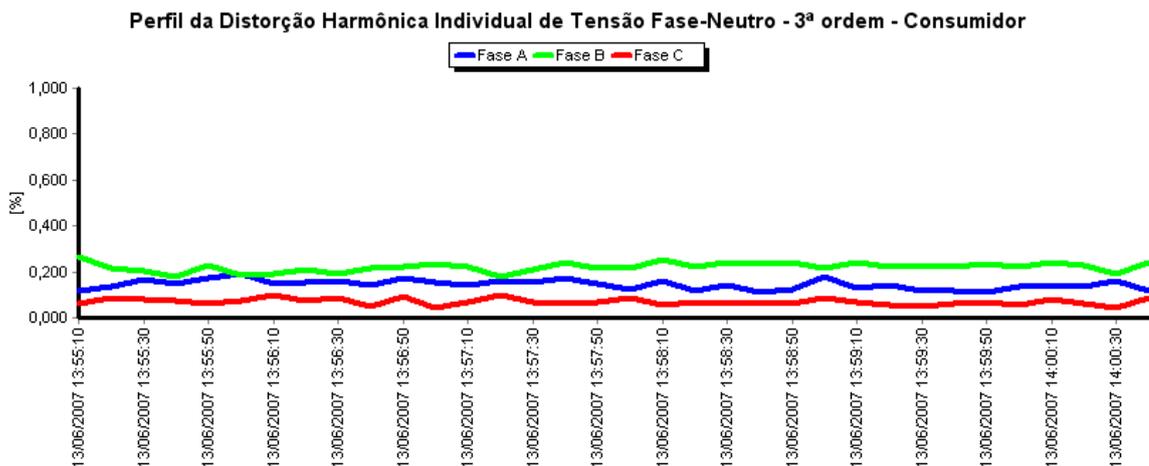


Figura 5.48 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.19 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,11	0,14	0,19	0,18
B	0,18	0,22	0,26	0,25
C	0,04	0,07	0,10	0,09

• **CONCESSIONÁRIA**

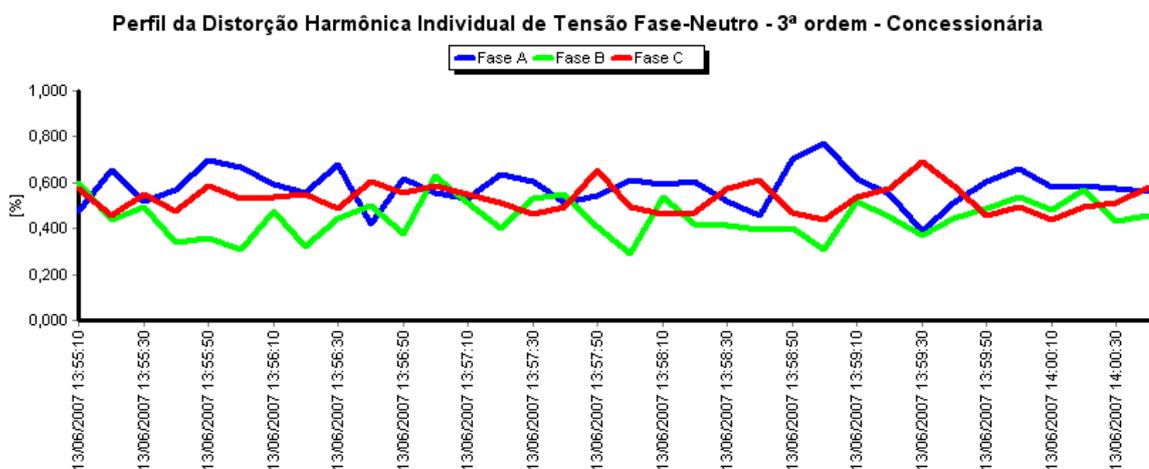


Figura 5.49 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.20 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,39	0,58	0,77	0,70
B	0,29	0,45	0,63	0,58
C	0,44	0,53	0,69	0,62

**Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 5ª Ordem**

• **CONSUMIDOR**

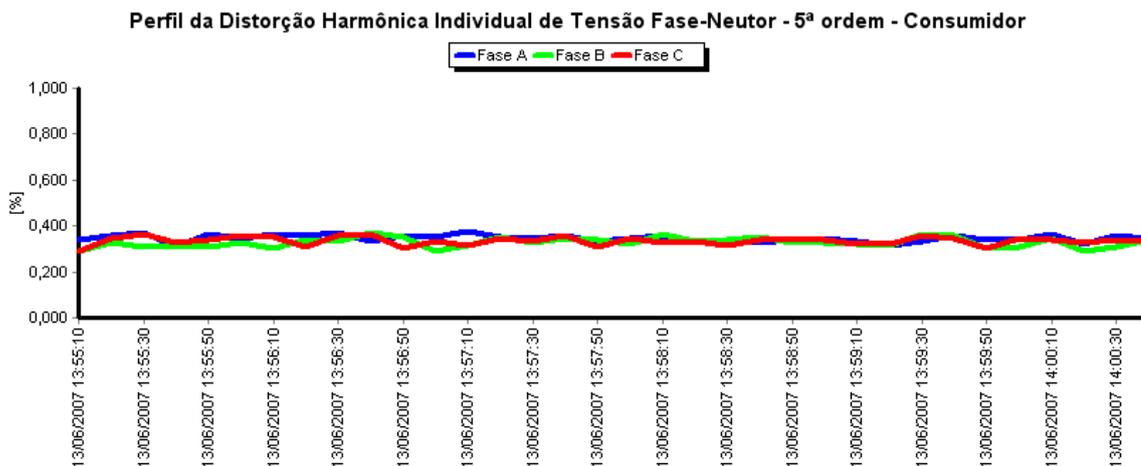


Figura 5.50 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.21 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,31	0,35	0,38	0,37
B	0,29	0,33	0,37	0,36
C	0,29	0,34	0,37	0,36

• CONCESSIONÁRIA

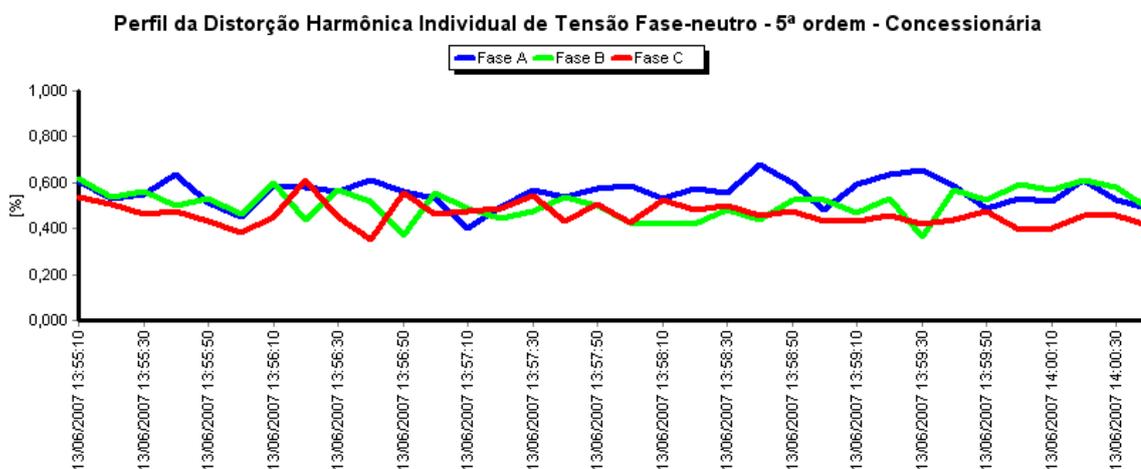


Figura 5.51 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.22 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,40	0,56	0,68	0,64
B	0,36	0,51	0,62	0,60
C	0,35	0,46	0,61	0,55

**Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 7ª Ordem**

• CONSUMIDOR

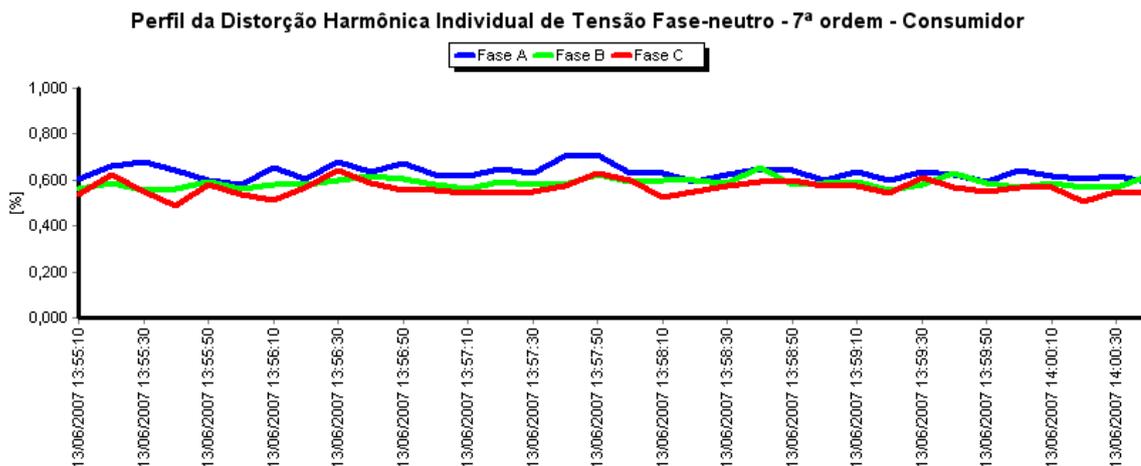


Figura 5.52 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.23 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,58	0,63	0,71	0,69
B	0,56	0,59	0,65	0,62
C	0,49	0,56	0,64	0,63

• **CONCESSIONÁRIA**

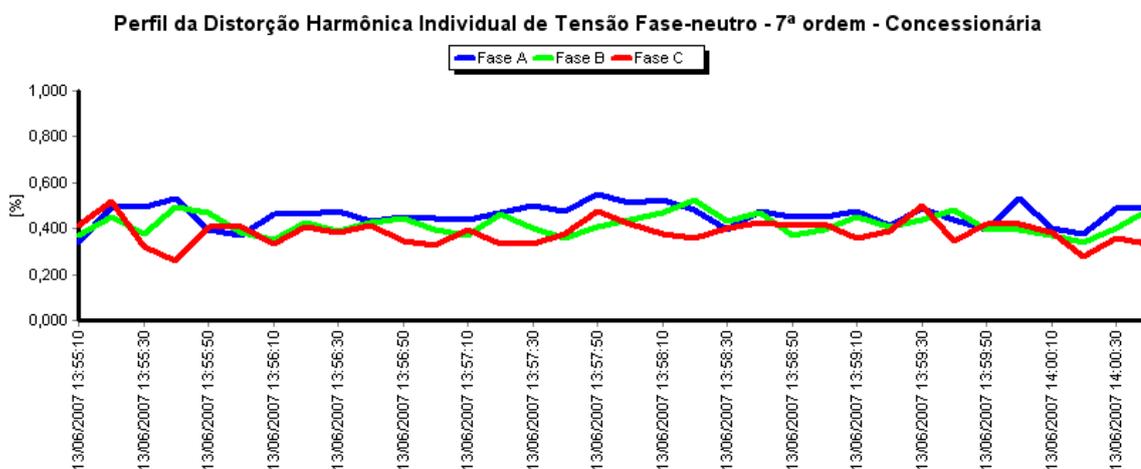


Figura 5.53 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.24 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,34	0,46	0,55	0,53
B	0,34	0,42	0,52	0,49
C	0,26	0,38	0,52	0,48

**Comentários:**

- As figuras 5.48 e 5.49 evidenciam que a concessionária se apresenta como sendo a principal fonte das distorções harmônicas de ordem 3 junto ao PAC. A diferença em relação à contribuição do consumidor é claramente observada na figura 5.54, onde as distorções para a fase A são inseridas em um mesmo gráfico de tendência.

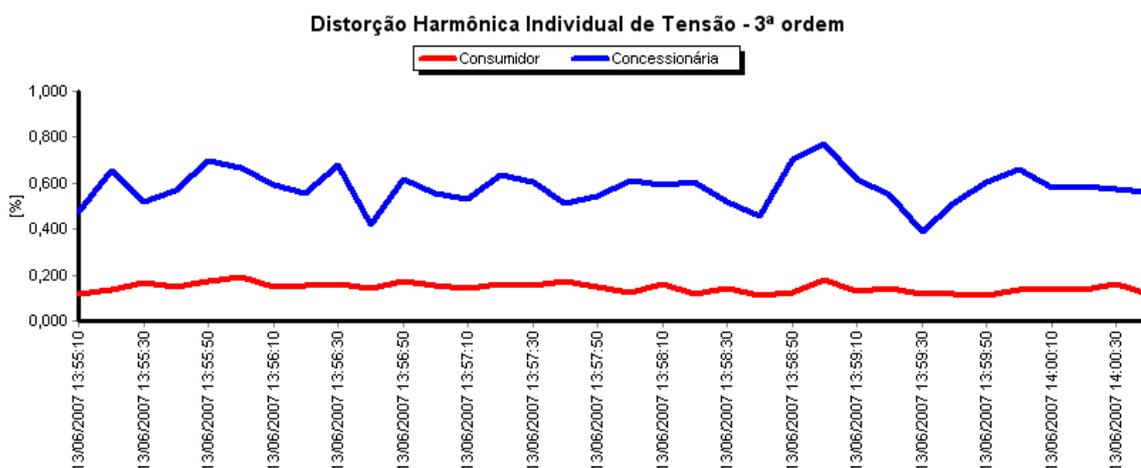
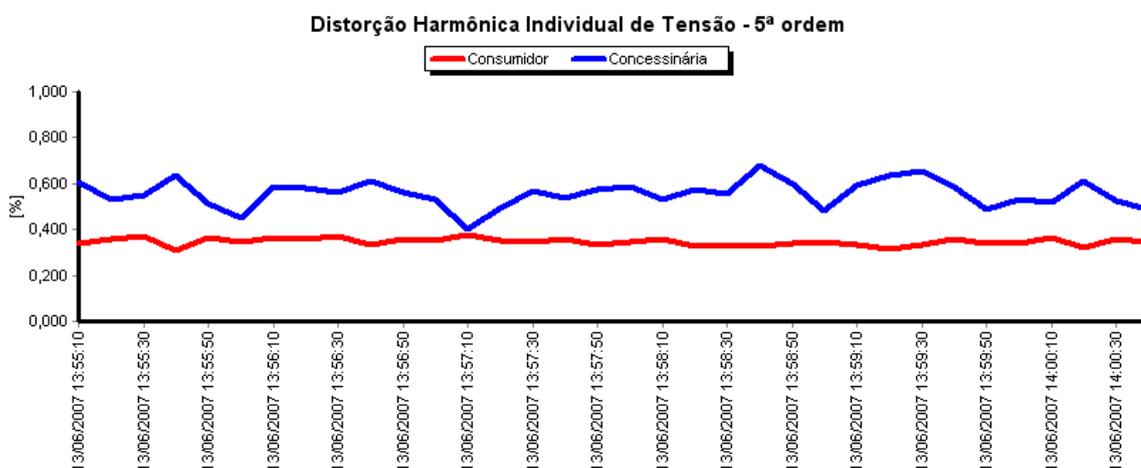


Figura 5.54 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 3 resultantes para o consumidor e para a concessionária.

Esta constatação seria esperada para este tipo de consumidor, pois a carga não-linear do mesmo é praticamente constituída por retificadores trifásicos de grande potência. Estes, em condições normais de operação não produzem correntes desta frequência, ou caso as mesmas existam, estas são de pequena magnitude.

- Os resultados enfatizam que a concessionária é também a principal responsável pelas distorções harmônicas de ordem 5, conforme evidenciado pelas figuras 5.50 e 5.51. Esta característica também seria esperada, visto que os grupos retificadores (cargas não lineares do consumidor) são conectados através de transformadores defasadores adequados à formação de arranjos de 36 ou 48 pulsos. Vale ainda ressaltar que os arranjos de retificadores, à exceção de um único conjunto, possuem filtros harmônicos sintonizados em aproximadamente 300 Hz, minimizando, assim, quaisquer correntes harmônicas decorrentes de desequilíbrios entre as unidades de cada grupo de retificação.

A figura 5.55, compondo os desempenhos das duas partes ao longo do tempo, ilustra esta tendência em uma das fases.



*Figura 5.55 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 5 resultantes para o consumidor e para a concessionária.*

- De acordo com as figuras 5.52 e 5.53, as distorções harmônicas de ordem 7 são predominantemente de responsabilidade do consumidor. Em função das características das cargas não lineares do consumidor, seria esperado que as distorções nesta frequência fossem também pequenas. Tal pressuposto seria decorrente dos arranjos dos retificadores e ainda, a presença de filtros harmônicos de 5ª ordem, que contribuem para reduzir as correntes de 7ª. No entanto, existe uma particularidade própria à instalação em questão, pois no barramento do consumidor de 88 kV encontra-se conectado um banco de capacitores, o qual amplifica as distorções desta ordem (ressonância paralela). Isto pode ser observado através das medições realizadas neste barramento e reproduzidas na figura 5.56.

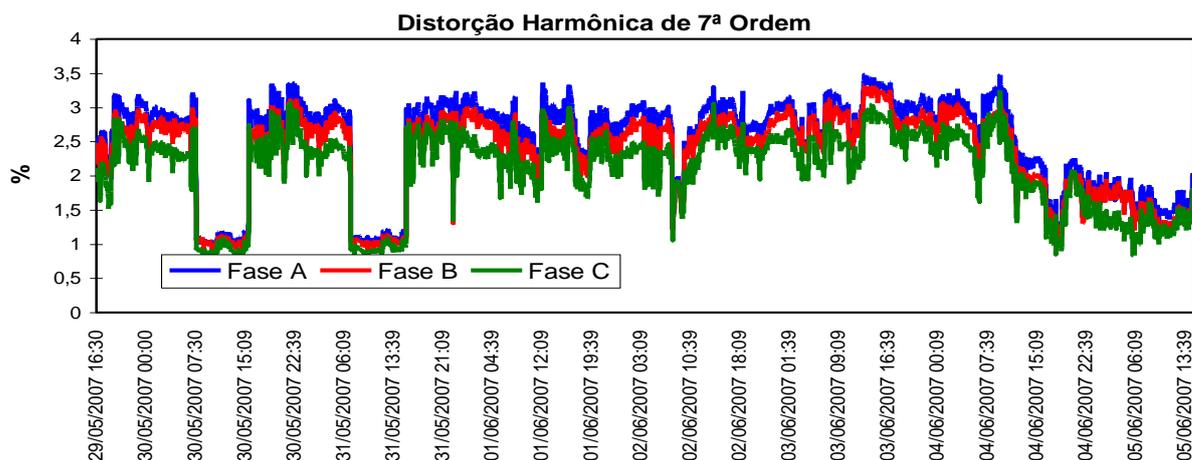


Figura 5.56 – Perfil das distorções harmônicas individuais de 7ª ordem no barramento de 88 [kV].

Na figura observa-se dois momentos em que as distorções harmônicas de 7ª ordem são reduzidas significativamente. Estes coincidem com os horários em que houve a retirada do banco de capacitores para manutenção.

Diante do exposto, a predominância do consumidor sobre a concessionária para esta frequência é justificada, pois o banco de capacitores estava conectado quando das medições em 230 kV.

A figura 5.57 sintetiza as responsabilidades das partes quanto à distorção harmônica de tensão de 7ª ordem.

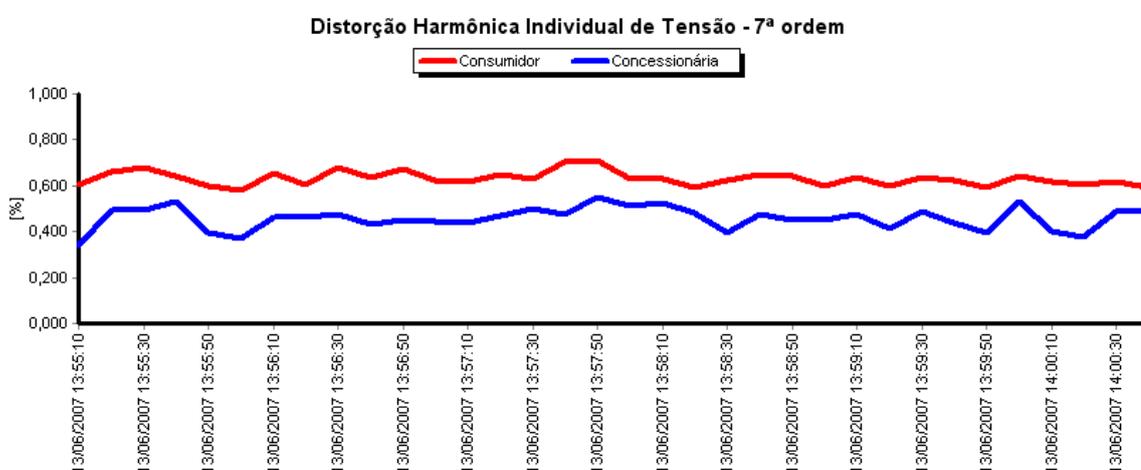
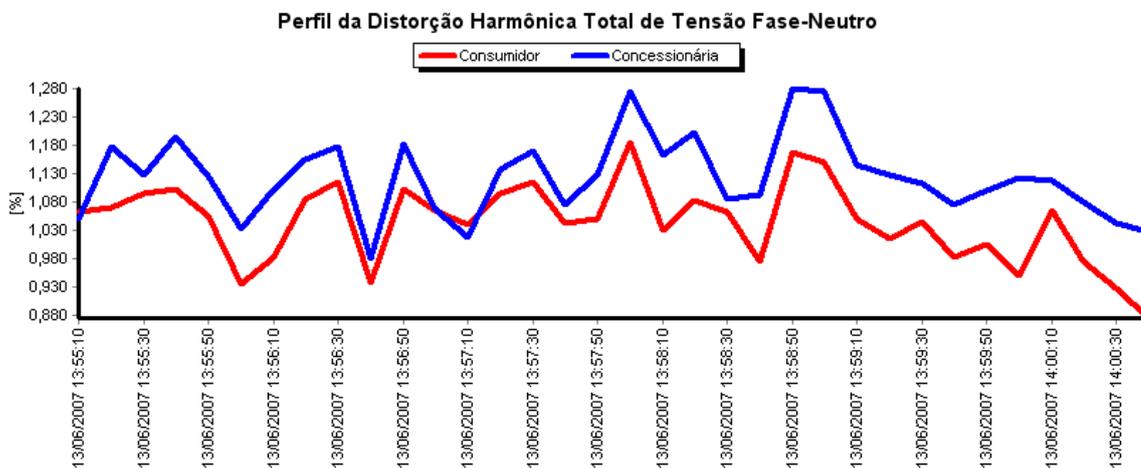


Figura 5.57 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 7 resultantes para o consumidor e para a concessionária.

- Para as distorções harmônicas totais, como evidencia a figura 5.58, há uma ligeira predominância da concessionária, o que está condizente com o domínio das componentes de ordem 3 e 5.



*Figura 5.58 – Comparação entre as distorções harmônicas totais resultantes para o consumidor e para a concessionária.*

## **5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo foi direcionado ao processo de avaliação de desempenho da metodologia proposta para o compartilhamento da responsabilidade sobre as distorções harmônicas, a qual foi materializada através do software denominado por ATRES. Neste contexto, utilizando inicialmente um arranjo laboratorial, foram executados trabalhos sob situações controladas no que tange a origem das distorções e, seqüencialmente, o processo foi aplicado a um sistema real e típico de complexos industriais contendo um expressivo número de cargas não lineares. Os resultados obtidos foram então empregados para fins da análise da consistência da proposta e do produto final desta tese.

Tendo em vista que as investigações conduzidas no ambiente de laboratório permitem o prévio conhecimento das grandezas e parâmetros atrelados ao sistema sob análise, esta estratégia permite uma evidente comparação entre os resultados oferecidos pelo processo desenvolvido e os valores de referência ou esperados. Nestes termos, a exatidão da metodologia é facilmente avaliada, conforme esclarecido no texto, através da realização de sete experimentos, cada qual com características próprias, e subsequente aplicação da proposta desta tese. De um modo geral, nesta primeira fase dos trabalhos, constatou-se uma boa correlação entre os valores esperados e os calculados e os seguintes pontos fundamentais foram observados:

- Os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciaram, de forma significativa, os resultados obtidos quanto as parcelas de responsabilidades, quando o consumidor se constitui na principal fonte geradora das distorções.
- Mesmo para os casos em que os valores numéricos das parcelas de responsabilidade obtidas pelo método se apresentaram com certos desvios dos valores esperados, não

se constatou, para qualquer condição investigada, uma inversão da responsabilidade sobre as distorções.

- A inversão de 180° no ângulo de defasagem das distorções oriundas da concessionária não afetou o desempenho da metodologia e, mais uma vez, a proposta mostrou-se satisfatória.
- A maior discrepância entre as distorções esperadas e as calculadas foi observada para ordem 7. Este fato encontra justificativa na proximidade desta frequência com uma ressonância encontrada para o arranjo utilizado. Nestas condições, qualquer imprecisão, mesmo que pequena, nos parâmetros da carga equivalente da carga pode resultar em uma diferença significativa na impedância deste ponto. Não obstante este fato, não houve maiores prejuízos ao processo de separação das responsabilidades.
- As distorções individuais de responsabilidade exclusiva do consumidor e do supridor sempre conduziram a resultados condizentes e atestaram a aplicabilidade do princípio da superposição.

Por fim, a metodologia foi aplicada a um conjunto de registros de distorções harmônicas obtidas de um sistema elétrico real, junto a um barramento de 230 kV. Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia, diferentemente da situação laboratorial controlada, não possui valores de referência ou valores esperados. Desta forma, não restou outra alternativa senão fundamentar as análises, dos valores obtidos pela utilização do aplicativo ATRES, através das características associadas com a carga do consumidor e do conhecimento operacional da rede básica na região circunvizinha ao PAC. Dentro deste cenário, o desempenho da proposta se mostrou fisicamente consistente com as expectativas, mostrando, novamente, que o processo se apresenta compatível com as metas almeçadas.

---

# CAPÍTULO VI

---

## CONCLUSÕES

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, tecer comentários gerais sobre os trabalhos e resultados obtidos, proporcionando uma visão ampla e sucinta da pesquisa e da tese como um todo.

Utilizando a estratégia de sintetizar as principais contribuições associadas a cada unidade componente deste trabalho, ressaltam-se os seguintes pontos principais:

- O Capítulo I, de caráter introdutório, ofereceu uma abordagem geral sobre o tema Qualidade da Energia Elétrica, com ênfase à sub-área Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência e, focando de modo particular, alguns aspectos relativos ao cerne desta pesquisa. Considerando, pois, a questão da separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, as principais publicações associadas ao tema abordado nesta tese foram sintetizadas e detectados os avanços e lacunas existentes no contexto do tema. Esta revisão bibliográfica permitiu verificar que, muito embora a relevância do assunto, poucos autores centraram suas atenções nesta controvertida questão do relacionamento entre consumidores e supridores. Por fim, foram estabelecidos os objetivos gerais e a estrutura desta pesquisa de doutorado;

- Na seqüência dos desenvolvimentos foi dada atenção à modelagem e análise, via princípios básicos de circuitos elétricos, do Ponto de Acoplamento Comum entre uma dada concessionária um dado consumidor. Para tanto foram utilizadas técnicas baseadas no domínio da freqüência, visto que, tradicionalmente, esta estratégia tem se mostrada útil e válida para os tipos de estudos aqui considerados. Além dos embasamentos físicos e matemáticos, foram realizados estudos computacionais para avaliação dos procedimentos de cálculo e ponderação sobre as imprecisões relativas às impedâncias harmônicas envolvidas no processo de atribuição das responsabilidades. Os estudos computacionais contidos nesta unidade permitiram concluir que a utilização de sinais de tensão e corrente medidos junto ao PAC, em conjunto com as impedâncias do sistema supridor e do consumidor, fornecem as informações necessárias ao cálculo das contribuições de cada uma das partes envolvidas na composição das distorções harmônicas totais e individuais de tensão no PAC;
- Complementarmente, o Capítulo III apresentou uma proposta para a obtenção de parâmetros representativos da impedância harmônica equivalente das cargas consumidoras contendo componentes lineares e não-lineares agregados. O modelo, baseado na associação paralela de elementos resistivos, indutivos e capacitivos, fundamentou seu processo de cálculo nos princípios da conservação da energia e injeções residuais de componentes harmônicas, objetivando o cumprimento de princípios básicos da eletricidade. A proposta feita foi seqüencialmente avaliada através de estudos computacionais que, a partir de sinais conhecidos de tensão e correntes medidos no PAC, culminaram pela determinação dos parâmetros e grandezas harmônicas equivalentes do consumidor. Estes dados, conjuntamente com

as informações relativas à impedância harmônica do supridor formaram, então, a base de dados para a utilização da proposta de compartilhamento de responsabilidade. Assim, estudos iniciais foram realizados com vistas a elucidar a aplicação do processo em arranjos hipotéticos e os resultados obtidos se mostraram apropriados aos fins desejados;

- Visando a integração da metodologia destinada à separação das responsabilidades com instrumentos de medição comerciais, o Capítulo IV propôs e desenvolveu um *software* destinado a quantificação das parcelas de distorções advindas de uma e outra parte. A estrutura computacional, além de permitir a importação de registros de harmônicos de tensão e corrente dos já mencionados equipamentos disponíveis no mercado, possibilita, ainda, o tratamento deste banco de dados, a aplicação dos procedimentos de cálculo e a disponibilização dos resultados obtidos nos termos da metodologia proposta. O aplicativo final, denominado ATRES, consiste, pois, num dos principais produtos desta tese e sua potencialidade e utilização foram ressaltadas nesta fase dos trabalhos;
- Por fim, o processo como um todo foi direcionado a duas aplicações práticas, uma de cunho laboratorial e outra voltada para um sistema real de grande porte. A primeira se justificou pelo fato das condições operacionais serem totalmente controladas e conhecidas, fornecendo, assim, uma base sólida de referência para os trabalhos de validação da proposta. A outra foi realizada com o objetivo de se atingir uma primeira etapa no processo de análise de consistência num ambiente que se apresenta com as reconhecidas aleatoriedades próprias aos complexos elétricos reais. Os resultados obtidos, de um modo geral, de mostraram compatíveis com as

expectativas, indicando, assim, que a proposta e produto desta tese evidenciam um bom caminho para a obtenção das respostas desejadas quando da aplicação de normas ou recomendações destinadas ao controle das distorções harmônicas.

Em complemento aos aspectos anteriormente abordados e atrelados à essência das unidades componentes da tese, é importante, ainda, ressaltar as seguintes conclusões gerais sobre o trabalho:

- Não obstante à reconhecida não linearidade do processo em pauta, a pesquisa demonstrou que a utilização de técnicas fundamentadas no domínio da frequência, aplicadas a sinais de tensão e correntes medidos, oferece as bases matemáticas necessárias à separação das distorções harmônicas provenientes do sistema supridor daquelas decorrentes das cargas não-lineares do consumidor;
- Embora se reconheça dificuldades na estimativa das impedâncias harmônicas do supridor e da carga, ressalta-se que a questão da carga é mais complexa em comparação com a impedância equivalente da concessionária;
- Caso haja dificuldades na determinação da impedância harmônica do supridor, esta situação poderá, em parte, ser contornada, caso as medições sejam feitas no lado secundário dos transformadores da subestação principal. Com tal procedimento, com certeza, a parcela da impedância dos transformadores será dominante, minimizando assim as imprecisões associadas com a rede de alimentação;
- Um ponto meritório de destaque refere-se ao processo de estimativa da impedância equivalente do consumidor. O processo, aqui empregado, foi baseado nas tensões e correntes medidas e, subsequente separação das parcelas ativa, reativa indutiva e capacitiva da carga do consumidor. Esta estratégia não foi encontrada em qualquer das referências consultadas e constitui-se num outro marco desta pesquisa. De um

modo geral a adequação do procedimento quanto a obtenção dos parâmetros equivalentes se mostrou efetiva e apropriada as fins desta pesquisa.

Como comentário final fica esclarecido que este trabalho, embora não tenha a pretensão de afirmar que o tema tenha sido esgotado, longe disto, procurou cumprir as expectativas de estabelecer o vínculo entre o sistema supridor e o consumidor quanto às distorções harmônicas de tensão medidas no PAC. Muito embora os indicativos positivos e reconhecidos avanços atingidos no tema central da pesquisa, o assunto deverá ainda merecer a atenção de análises futuras no sentido de minimizar os erros nos cálculos da impedância equivalente do consumidor e da impedância equivalente da concessionária, conciliando ainda um exaustivo trabalho de campo com vistas à consolidação do processo. Neste contexto, as seguintes pesquisas estão relacionadas a avanços posteriores a este trabalho:

- Estudo da impedância equivalente do consumidor através de técnicas fundamentadas em ferramentas estatísticas ou algoritmos de otimização, como por exemplo, algoritmos genéticos;
- Análise da impedância equivalente da concessionária de forma a permitir o cálculo da mesma através dos sinais medidos de tensão e corrente junto ao PAC;
- Verificação da viabilidade de implantação de metodologias de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas em equipamentos de medição específicos para este fim;
- Diagnóstico sobre o compartilhamento das distorções harmônicas em um barramento contendo diversos consumidores, com a respectiva separação das parcelas de responsabilidade.

---

## CAPÍTULO VII

---

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., “*Electrical power systems quality*”, 2ª ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] KERCHNER, R. M., CORCORAN, G. F., “*Circuitos de corrente alternada*”, Tradução: Reynaldo Resende e Ruy Pinto da Silva Sieczkowski, 3ª ed., Porto Alegre-RS, 1977.
- [3] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “*Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica*”, Dezembro 2002.
- [4] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “*Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*”, Revisão: 30 de Agosto de 2006.
- [5] IEC 61000-3-6, “*Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*”, First Edition, Publicado por IEC, 1996-10.
- [6] IEEE STD. 519-1992, “*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, Publicado por IEEE, 1992.
- [7] TANAKA, T., AKAGI, H., “*A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 10, Issue 4, pp. 1737-1742, October 1995.
- [8] XU, WILSON, “*Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection*”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 2, pp. 873-876, Seattle, WA, USA, 2000.

- [9] XU, W., LIU, X., LIU, Y., “*An Investigation on the Validity of Power-direction Method for Harmonic Source Determination*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 18, Issue 1, pp. 214-219, January 2003.
- [10] RQE-III, “*Registrador de Parâmetros de Qualidade de Energia – Guia do Usuário*”, Reason Tecnologia S.A..
- [11] LEIRIA , A., DE BARROS, M. T. C., “*Identification of harmonic content and their origin in power networks*”, IEEE Bologna Power Tech Conference, Proceedings Volume 2, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [12] CHUN LI, WILSON XU, TAYJASANAT, T. “*A “Critical Impedance” – Based Method for Identifying Harmonic Sources*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 19, Issue 2, pp. 671-678, April 2004.
- [13] SRINIVASAN, K., “*On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 11, Issue 2, pp. 1003-1012, April 1996.
- [14] SRINIVASAN, K., JUTRAS, R., “*Conforming and Non-conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 13, Issue 1, pp. 212-217, January 1998.
- [15] SRINIVASAN, K., “*Attributing Harmonics in Private Power Production*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 34, Issue 5, pp. 887-892, September/October 1998.
- [16] CHANDRA, A., MBANG, B., SRINIVASAN , K., SINGH , B. N., RASTGOUFARD, P., “*A Method of Implementation of Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions Using an Active Filter*”, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Volume 1, pp. 553-557, May 2003.
- [17] XU, WILSON, LIU, YILU, “*A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-based Harmonic Control Applications*”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 1, pp. 361-366, July 1999.
- [18] ZHANG , X., AHMED, E. E., XU, W., “*Determination of Network Harmonic Impedances Using Steady-state Measurement*”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 1, pp. 390-394, July 1999.

- [19] XU, W., AHMED, E. E., ZHANG, X., LIU, X. “*Measurement of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issues and their Solutions*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 17, Issue 1, pp. 210-216, January 2002.
- [20] XU, W., LIU, Y., “*A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Issue 2, pp. 804-811, April 2000.
- [21] MOUSTAFA, A. A., MOUSSA, A. M., EL-GAMMAL, M. A., “*Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems*”, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings Volume 3, pp. 1035-1040, October 2000.
- [22] SOLIMAN, S. A., AL-KANDARI, A. M., “*A Simple and Novel Technique for Linear and Nonlinear Load Modeling in the Time Domain*”, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, Volume 3, pp. 1616-1619, May 1996.
- [23] HARTANA, R. K., RICHARDS, G. G., “*Harmonic Source Monitoring and Identification Using Neural Networks*”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 5, Issue 4, pp. 1098-1104, November 1990.
- [24] SRINIVASAN, D., NG, W. S., LIEW, A. C., “*Neural-network-based Signature Recognition for Harmonic Source Identification*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 21, Issue 1, pp. 398-405, January 2006.
- [25] MA, H., GIRGIS, A. A., “*Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter, IEEE Transactions on Power Delivery*”, Volume 11, Issue 3, pp. 1659-1665, July 1996.
- [26] YU, K. K. C., WATSON, N. R., ARRILLAGA, J., “*An Adaptive Kalman Filter Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 20, Issue 2, pp. 1577-1584, April 2005.
- [27] SILVA, S. F. P., OLIVEIRA, J. C., “*Uma Contribuição à Questão do Compartilhamento da Responsabilidade Dobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos*”, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, Julho 2006.
- [28] SILVA, S. F. P. OLIVEIRA, J. C., “*Distorções Harmônicas Associadas com o Supridor e o Consumidor: Um Procedimento Para a Identificação das Parcelas de Responsabilidade*”, Anais XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-BA, Outubro 2006.

- [29] SILVA, S. F. P., OLIVEIRA, J. C., “*Uma Proposta de Sistematização da Atribuição de Responsabilidade Sobre Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*”, Anais VI SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Volume I, pp. 365-370, Belém-PA, Agosto 2005.
- [30] ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NÉRI, M. G. G., SOARES, R. M., COSTA, E. G., “*Contribuições da Distorção Harmônica de Tensão Entre Concessionária e Consumidor*”, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, Julho 2006.
- [31] SANTOS, I. N., “*Uma contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas*”, Uberlândia: UFU, 2007 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [32] CEMIG ND-5.3, “*Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão, Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea*”, Normas técnicas, Belo Horizonte, Outubro de 2005.
- [33] ARRILAGA, J., WATSON, N. R., “*Power System Harmonics*”, John Wiley & Sons, Second Edition, 2003.
- [34] SSEP, “*Simulador de Sistemas Elétricos de Potência - Manual do Usuário*”, Versão V2, QUALITY Engenharia e Sistemas Ltda, www.qes.com.br.
- [35] UFU/ANEEL, “*Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica*”, Relatório Parcial 4, Julho de 2000.
- [36] MAKRAM, E. B., VARADAN, S., “*A Generalized Load Modeling in Presence of Harmonics and Distortion*”, Proceedings Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 124-128, March 1993.
- [37] EL ARINI, M. M. M., “*A Time Domain Load Modeling Technique and Harmonics Analysis*”, 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Proceedings Volume II, pp. 930-938, Athens.
- [38] MARH 21, “*Analisador de Redes – Manual do Usuário*”, RMS Sistemas Eletrônicos Ltda.
- [39] BUDEANU, C. I., “*Reactive and Fictitious Powers*”, Publ. no. 2 of the Rumanian National Institute of Energy, Bucharest, Romania, 1927.
- [40] HARMZS, “*Estudo do Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas*”, CEPEL.

[41] ANAREDE, “Sistema Integrado de Análise de Rede”, CEPEL.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)