

---

**Universidade Federal de Itajubá**

**Dissertação de Mestrado**

**UTILIZAÇÃO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES  
COMPACTAS (LFCs) ASSOCIADAS A OUTRAS  
CARGAS NÃO LINEARES – SEUS IMPACTOS EM  
UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

José Eugenio Lopes de Almeida

Itajubá, Outubro de 2004

---

**Universidade Federal de Itajubá**

**Dissertação de Mestrado**

**UTILIZAÇÃO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES  
COMPACTAS (LFCs) ASSOCIADAS A OUTRAS  
CARGAS NÃO LINEARES – SEUS IMPACTOS EM  
UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Por:

José Eugenio Lopes de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcio da Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu

Itajubá, 18 de Outubro de 2004

---

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, nosso Pai, pela vida, pelo amor e misericórdia;
- Aos meus pais, José e Consuelo, pelo amor e dedicação;
- A minha esposa, Cida e a meus filhos, Guilherme, Vinícius e Aline, por serem parte fundamental de minha vida;
- Aos professores Paulo Marcio, José Policarpo e Hector Arango, pelo apoio, ensinamentos e confiança;
- Ao professor Luiz Eduardo Borges, por ter-me incentivado a dar continuidade ao mestrado, iniciado em 1984;
- Ao professor Eduardo Hermeto, pelo apoio através do Departamento de Eletrotécnica;
- Aos colegas Marcel Parentoni e Francisco Galvão, pela grande ajuda na confecção e também pela importante contribuição a esta dissertação;
- Ao aluno de graduação Yuri Cândido, pela importante contribuição a este trabalho;
- Aos amigos, colegas e professores do Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE), pelo apoio e amizade;
- Aos funcionários da Pró-diretoria de Pesquisa e Pós-graduação (PPG), Departamento de Registros Acadêmicos (DRA) e Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE), pelo trabalho realizado com seriedade, dedicação e responsabilidade;
- À Light Serviços de Eletricidade S.A., por confiar este estudo à Universidade Federal de Itajubá;
- Ao GQEE e Capes, pelo apoio financeiro;

---

## RESUMO

Esta dissertação apresenta resultados de uma pesquisa que avalia os efeitos da utilização em larga escala de lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de um sistema de distribuição

Sabe-se que nas residências existe uma composição de cargas lineares e cargas não-lineares que, associadas das mais diversas formas e quantidades, irão influenciar o perfil de funcionamento de um sistema de distribuição, incluindo a presença dos harmônicos de corrente e de tensão. Assim, o uso crescente das LFCs é um dos fatores de preocupação.

Após medições laboratoriais, simulações computacionais foram desenvolvidas buscando-se o comportamento das distorções harmônicas de tensão e de corrente, incluindo a corrente de neutro, os fatores de potência e as diversas potências. Uma rede de distribuição alimentando condomínios prediais tem sido modelada e simulada, sendo que cargas típicas e hábitos de consumo foram considerados.

Como as cargas possuem perfis totalmente aleatórios, um programa utilizando técnicas estatísticas (método de Monte Carlo) foi desenvolvido. Conseqüentemente, neste caso, o desequilíbrio das cargas acaba sendo contemplado.

As distorções dos sinais aumentam com o aumento das cargas não-lineares. Em muitos casos os efeitos de tais distorções mostram-se irrelevantes frente à redução da corrente eficaz, no entanto, deve-se ter especial atenção em certos horários, à corrente de neutro e ao fator de potência verdadeiro.

<b>I - INTRODUÇÃO 12</b>	
I.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	12
I.2. RELEVÂNCIA DO TEMA E MOTIVAÇÃO.....	13
I.3. OBJETIVOS .....	15
I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	15
<b>II. NOVOS CONCEITOS DE POTÊNCIA E FATOR DE POTÊNCIA 17</b>	
II.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	17
II.2. HARMÔNICOS .....	17
II.3. CONCEITOS DE POTÊNCIA COM CARGAS NÃO LINEARES EQUILIBRADAS E/OU FONTES DISTORCIDAS, EQUILIBRADAS E SIMÉTRICAS.....	19
II.4. CONCEITOS DE POTÊNCIAS COM CARGAS NÃO LINEARES DESEQUILIBRADAS E/OU FONTE DISTORCIDA, DESEQUILIBRADA E/OU ASSIMÉTRICA .....	22
II.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	24
<b>III. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFC) - ESTADO DA ARTE – LEVANTAMENTO DE DADOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25</b>	
III.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
III.2. LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES.....	25
III.3. REATORES – TECNOLOGIAS EMPREGADAS .....	27
III.4. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFCS).....	33
III.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
<b>IV. LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS LFCS E DE OUTROS EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS DE USO DOMÉSTICO 40</b>	
IV.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	40
IV.2. DESCRIÇÃO DA BANCADA AUXILIAR DE MEDIÇÃO E DEMAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	41
IV.3. ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO .....	47
IV.4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO .....	50
IV.5. RESULTADOS DE MEDIÇÕES EM CAMPO .....	64
IV.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
<b>V. MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LFCS E OUTRAS CARGAS NÃO LINEARES 67</b>	
V.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	67
V.2. MODELO COMPUTACIONAL DE CARGA NÃO LINEAR.....	67
V.3. PARAMETRIZAÇÃO E APERFEIÇOAMENTO DOS MODELOS.....	68
V.4. SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE CARGAS – RESULTADOS E COMENTÁRIOS.....	72
V.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
<b>VI. PROSPECÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM DAS CARGAS E DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO 81</b>	
VI.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	81
VI.2. PROSPECÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM DO AMBIENTE ELÉTRICO RESIDENCIAL	81
VI.3. TIPOS DE RESIDÊNCIAS E SUAS RESPECTIVAS CARGAS .....	84
VI.4. MODELOS DE RESIDÊNCIAS, RAMAIS, ALIMENTADORES E SISTEMAS.....	85
VI.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	93

**VII. SIMULAÇÕES DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE DOS  
RESULTADOS 94**

VII.1. CONDIÇÕES INICIAIS .....	94
VII.2. SIMULAÇÕES COM CARGAS EQUILIBRADAS.....	94
VII.3. SIMULAÇÕES CONSIDERANDO A ALEATORIEDADE DAS CARGAS.....	106
VII.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122

**VIII. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 123**

VIII.1. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS .....	125
--	-----

**IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 127**

## LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 - Tetraedro de potências .....	20
Figura III.1 – Produção de luz em uma lâmpada fluorescente [CaSy].....	26
Figura III.2 – Reator eletromagnético básico .....	27
Figura III.3 – Reator eletromagnético – forma de onda de corrente e espectro harmônico [OI02] .....	27
Figura III.4 – circuitos para correção do fator de potência de deslocamento.....	28
Figura III.5 – Esquema de um sistema de iluminação fluorescente com reator eletrônico [Bro99] .....	29
Figura III.6 – Reator eletrônico - forma de onda de corrente e espectro harmônico [OI02].....	30
Figura III.7 – Forma de onda e espectro harmônico de corrente de uma LFC marca Osram 23 W .....	36
Figura IV.1 – Instalação Elétrica da Bancada Auxiliar de Medição .....	42
Figura IV.2 – Diagrama de conexão dos equipamentos para medições.....	42
Figura IV.3 – Bancada auxiliar de medição .....	43
Figura IV.4 - Bancada auxiliar com vista da fonte Pacific Power e outros instrumentos de medição.....	43
Figura IV.5 – Medidor PM300 da Voltech e Medidor Marh-21 992 da RMS.....	43
Figura IV.6 – Variação do DHTi com o DHTv de uma FLC 20 W.....	48
Figura IV.7 – Formas de onda da tensão e da corrente – LFC Osram 23 W.....	52
Figura IV.8 – Corrente da LFC Osram 23 W (a) espectro de amplitude (b) espectro de fase .....	52
Figura IV.9 – 01 LFC GE 15 W - (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude .....	54
Figura IV.10 – 06 LFCs GE 15 W - (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude .....	55
Figura IV.11 – 07 LFCs diferentes – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude .....	55
Figura IV.12 – 03 LFCs FLC 20 W – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude .....	56
Figura IV.13 – 03 FLC 20 W + 1 LI 100 W – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude .....	57
Figura IV.14 – Formas de onda e espectros harmônicos – (a) TV 20” (b) TV 29” (c) microcomputador.....	58
Figura IV.15 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) geladeira (b) LFC (c) microondas .....	59
Figura IV.16 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) máquina de lavar (b) ar condicionado (c) liquidificador .....	60
Figura IV.17 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) videocassete (b) aparelho de som (c) <i>notebook</i> .....	61
Figura IV.18 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da associação .....	62
Figura IV.19 – Formas de onda das tensões e das correntes para LFCs diferentemente distribuídas nas três fases do sistema. ....	63
Figura IV.20 – Espectro de amplitude das correntes de LFCs distribuídas desigualmente nas 3 fases.....	64
Figura V.1 - Modelagem da LFC .....	68
Figura V.2 – Parametrização de cada elemento da LFC .....	68
Figura V.3 - Visualização da forma de onda através do osciloscópio.....	69
Figura V.4 – Forma de onda amplificada da corrente .....	69
Figura V.5- Bloco correspondente à LFC .....	70

Figura V.6 – Sistema com diversas cargas representadas .....	70
Figura V.7 - Fonte de tensão distorcida.....	71
Figura V.8 – Bloco correspondente à fonte de tensão distorcida .....	71
Figura V.9 – Circuito de simulação.....	72
Figura V.10 – Comparativo: medição x simulação – (a) formas de onda (b) espectro de amplitude (c) espectro de fase .....	75
Figura V.11 – tensão e corrente de 5 LFCs – (a) medição (b) simulação .....	76
Figura V.12 – espectro de corrente 5 LFCs – (a) medição (b) simulação .....	76
Figura V.13 – tensão e corrente de 7 LFCs diferentes – (a) medição (b) simulação .....	78
Figura V.14 – espectros de corrente 7 LFCs (a) medição (b) simulação .....	78
Figura V.15 – tensão e corrente 3 LFCs + 1 LI – (a) medição (b) simulação .....	79
Figura V.16 – espectros de corrente 3 LFCs + 1 LI (a) Medição (b) simulação.....	79
Figura VI.1 – Perfil de utilização mais provável de eletrodoméstico (fonte – pesquisa Cemig – Fev/2000).....	83
Figura VI.2 – Residência tipo 1 .....	85
Figura VI.3 – Residência tipo 2.....	86
Figura VI.4 – Residência tipo 3.....	86
Figura VI.5 – modelo de um grupo residencial.....	87
Figura VI.6 – modelo de ramal secundário .....	88
Figura VI.7 - Transformador de distribuição .....	90
Figura VI.8 – ramal secundário com transformador .....	91
Figura VI.9 – modelo de alimentador primário.....	92
Figura VI.10 – modelo de sistema.....	93
Figura VII.1 – Formas de onda da tensão e corrente da MT e BT para (a) 100% LI (b) 50% LI e 50% LFC (c) 100% LFC.....	96
Figura VII.2 – Formas de ondas - período 6 – lado MT e lado BT: (a) 100% LI ; (b) 50% LI e 50% LFC ; (c) 100% LFC .....	101
Figura VII.3 – Forma de onda - corrente de neutro - período 6 - (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC .....	102
Figura VII.4 – Formas de ondas - - lado MT e lado BT: (a) 100% LI ; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC.....	104
Figura VII.5 – Forma de onda - corrente de neutro - período 7 - (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC .....	105
Figura VII.6 – Função densidade de probabilidade do uso diário de LFCs.....	107
Figura VII.7 – Função densidade acumulada do uso diário de LFCs.....	107
Figura VII.8 – Curva de carga gerada pelo programa .....	108
Figura VII.9 - Curvas de carga de diversos eletrodomésticos.....	111
Figura VII.10 - Formas de ondas – lado MT <sub>i</sub> e BT (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC ; (c) 100% LFC .....	113
Figura VII.11 - formas de onda – correntes de neutro – (a) 100% LI; (b) 50%-50%; (c) 100% LFC .....	114
Figura VII.12 - Perfis da corrente na fase C – 100% LFC (a) MT (b) BT .....	118
Figura VII.13 - Perfis da corrente na fase C – 100% LI (a) MT (b) BT .....	119
Figura VII.14 - Perfil da corrente de neutro – (a) 100% LI (b) 100% LFC .....	119
Figura VII.15 - Perfis da tensão na fase C – 100% LFC – (a) MT (b) BT.....	119
Figura VII.16 - Perfis da tensão na fase C – 100% LI – (a) MT (b) BT .....	120
Figura VII.17 - Perfis de $DHT_i$ da corrente na fase C – 100% LFC – (a) MT (b) BT .....	120
Figura VII.18 - Perfis de $DHT_i$ da corrente na fase C – 100% LI – (a) MT (b) BT .....	120
Figura VII.19 - Perfis de $DHT_v$ da tensão na fase - 100% LFC – (a) MT (b) BT.....	121
Figura VII.20 - Perfis de $DHT_v$ da tensão na fase - 100% LI – (a) MT (b) BT.....	121



**LISTA DE TABELAS**

Tabela III.1 – Harmônicos individuais segundo IEC 555-2.....	33
Tabela III.2 – Características das LFCs.....	35
Tabela III.3 – Comparativo de potências entre LFCs e LIs.....	35
Tabela III.4 – DHT de corrente de lâmpadas fluorescente compactas.....	36
Tabela IV.1– LFCs utilizadas nas medições .....	47
Tabela IV.2 – Harmônicos de tensão de uma LFC Osram 23 W .....	50
Tabela IV.3 - Parâmetros de uma LFC Osram 23 W .....	51
Tabela IV.4 – Harmônicos de corrente de uma LFC Osram 23 W .....	51
Tabela IV.5 – DHT <sub>i</sub> e FP das LFCs utilizadas .....	53
Tabela IV.6 - Dados resultantes da associação de cargas não lineares .....	62
Tabela IV.7 – Valores de DHT <sub>v</sub> (%) e distorções harmônicas individuais de 3º, 5º e 7º harmônicos, fases a, b e c.....	64
Tabela IV.8 - Distorções harmônicas totais e individuais (%) da tensão em medição Light – fase a.....	65
Tabela IV.9 - DHT <sub>v</sub> e DHT <sub>i</sub> em cada fase, em cada ponto de medição, às 11:44 de 06/02/04.....	65
Tabela IV.10 – Potências, fatores de potência e fatores de desequilíbrios de corrente e tensão - 11:44 h de 06/02/04 .....	66
Tabela IV.11 - Potências, fatores de potência e fatores de desequilíbrios de corrente e tensão – 22:00 h de 06/02/04.....	66
Tabela V.1 – Comparação entre simulação e medição para LFC Osram 23 W .....	73
Tabela V.2 – Medição – Osram 23 W .....	74
Tabela V.3 – Simulação – Osram 23 W .....	74
Tabela V.4 – Ângulos de fase de harmônicos de diversas LFCs e de sua associação .....	79
Tabela VI.1 – Posse de eletrodomésticos .....	83
Tabela VII.1 – Resultado comparativo - sistema com LIs e LFCs.....	95
Tabela VII.2 – Períodos para simulação.....	98
Tabela VII.3 – Cargas selecionadas por período.....	98
Tabela VII.4 – Percentuais de cargas ligadas em cada horário .....	99
Tabela VII.5 – Resultados de simulação no período 6.....	100
Tabela VII.6 – Resultados de simulação no período 7 .....	102
Tabela VII.7 - Comparativo entre corrente eficaz, corrente fundamental e corrente harmônica .....	103
Tabela VII.8 – cargas ligadas – 23:00 hs .....	112
Tabela VII.9 – Valores eficazes de tensão e corrente, corrente de neutro e distorções de tensão e corrente – 23:00 h.....	112
Tabela VII.10 – Distribuição das potências trifásicas e fator de potência – 23:00 h .....	112
Tabela VII.11 – Fatores de potência conforme seção II.3.1– 100% LFC – 23:00 h.....	116

**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

A – Potência não-ativa de assimetria ou de desequilíbrio  
Aac – Corrente alternada  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AFP – Alto fator de potência  
ANSI – *American National Standards Institute*  
ASCII – Formato para banco de dados  
ASD – *Adjustable Speed Drive*  
BFP – Baixo fator de potência  
BT – Baixa tensão  
CA – Corrente alternada  
CE – Conservação de energia  
Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais  
Cesp – Companhia Energética de São Paulo  
Cos  $\phi$  - Fator de potência de deslocamento  
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz  
D – Potência de distorção  
DHT<sub>i</sub> - Distorção harmônica total de corrente  
DHT<sub>v</sub> – Distorção harmônica total de tensão  
DH<sub>i(h)</sub> - Distorção harmônica de corrente do harmônico de ordem h  
DH<sub>v(h)</sub> – Distorção harmônica de tensão do harmônico de ordem h  
DSM – *Demand Side Management*  
DY11 – Transformador com conexão delta-estrela 11  
EL – Eficiência luminosa  
Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.  
IEM – Interferência eletromagnética  
ENCE – Etiqueta de conservação de energia  
EPR – Borracha etileno propileno  
EUA – Estados Unidos da América  
FCC – *Federal Communications Commission*  
FP – Fator de potência  
FP<sub>d</sub> – Fator de potência de deslocamento ou fator de deslocamento  
FP<sub>s</sub> – Fator de potência do sistema ou total  
FP<sub>v</sub> – Fator de potência vetorial  
GE – General Electric  
GQEE – Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica  
HO – *Hight output*  
IEC – *International Electrotechnical Committee*  
IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia  
ISEE – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia  
K – Kelvin  
LFCs – Lâmpadas fluorescentes compactas  
LFTs – Lâmpadas fluorescentes tubulares  
LIs – Lâmpadas incandescentes  
lm – lúmen – unidade de fluxo luminoso  
MT – Média tensão  
P – Potência ativa  
P<sub>1</sub> – Potência ativa da componente fundamental  
PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

---

PC – Computador pessoal  
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
Q – Potência reativa (não ativa de deslocamento)  
 $Q_1$  - Potência reativa da componente fundamental  
QD – Quadro principal  
QEE – Qualidade da Energia Elétrica  
RFI – Interferência de radio frequência  
RMS/rms – Valor eficaz  
RS232 – Porta serial  
S – Potência aparente  
 $S_s$  – Potência aparente do sistema  
 $S_v$  – Potência aparente vetorial  
TC – Transformador de corrente  
TCC – Temperatura de cor correlata  
TP - Transformador de potencial  
TV – Televisor  
UNIFEI – Universidade Federal de Engenharia de Itajubá  
UF-I – Fator de desequilíbrio de corrente  
UF-V – Fator de desequilíbrio de tensão  
Vac – Tensão alternada  
Vcc – Tensão contínua  
VUF – Fator de desequilíbrio de tensão  
X/R – Relação entre a reatância e a resistência de um componente  
XLPE – Composto polietileno reticulado

## I - INTRODUÇÃO

### I.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O constante aumento da demanda de energia elétrica tem levado os governos e empresas concessionárias de energia a buscarem formas de reduzir o impacto de grandes investimentos em construções de novas usinas geradoras e de novas linhas de transmissão. Uma das formas encontradas é o incentivo à redução do consumo, através de técnicas de conservação de energia.

Em muitos países vêm se desenvolvendo programas de gerenciamento pelo lado da demanda (DSM – *Demand Side Management*) onde o foco é reduzir o carregamento dos sistemas elétricos, reduzindo a demanda de energia, atendendo assim às necessidades imediatas das concessionárias. É normalmente assumido que, para cada kW de redução de consumo de potência no pico, um kW de construção de nova planta geradora é adiado.

Nos EUA, principalmente na década de 90, o governo incentivou diversos programas do tipo DSM. Dentre eles, a substituição de reatores eletromagnéticos por reatores eletrônicos, a utilização de lâmpadas fluorescentes mais eficientes e também a substituição de lâmpadas incandescentes (LIs) por lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs).

No Brasil, algumas concessionárias desenvolveram projetos de conservação de energia na década de 90, com suporte técnico e financeiro do Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), como é o caso da Cemig em 1990, 1995 e 1996, da CPFL em 1992, 1994 e 1995 e da CESP em 1993 [Po00]. Estes primeiros projetos, apesar de modestos, incentivaram o aumento do uso de lâmpadas fluorescentes e LFCs que decuplicaram de 1990 a 1997, atingindo o patamar de 7 milhões de unidades em 1997, representando 2% das vendas de lâmpadas incandescentes, mostrando assim o enorme potencial destas substituições.

A iluminação representa cerca de 17% do consumo de energia elétrica no Brasil (fonte: Procel 1998).

No setor residencial, a iluminação representa 24%, no comercial, 44% e no industrial 2% [Ga98].

Em termos mundiais, estima-se que a iluminação represente 20% do consumo total de energia elétrica [Ro91] e, aplicando-se novas tecnologias e sistemas de iluminação mais eficientes, estima-se uma possível economia de cerca de 30% da energia gasta com iluminação.

No Brasil, de modo a incentivar o cliente final à substituição das LIs por LFCs, foram dados substanciais descontos nos preços das LFCs, bem mais caras que as LIs. Devido à crise de energia em 2001, o governo promoveu grandes doações de LFCs para os consumidores de baixa renda. Neste ano, foi necessário um racionamento de energia elétrica, quando, de certo modo, os consumidores foram obrigados a reduzir o consumo de energia elétrica para não serem penalizados com multas. Assim, incentivado pelo governo federal, ocorreu um grande número de substituições das LIs por LFCs em residências e estabelecimentos comerciais.

As LFCs foram adotadas como alternativa imediata de substituição das LIs devido ao reduzido consumo de potência ativa (75% menor em relação às incandescentes para o mesmo fluxo luminoso), vida útil 8 vezes maior<sup>1</sup>, dimensões reduzidas, reator incorporado e à praticidade da operação de substituição com bocal de rosca E-27, idêntico ao das LIs. Desta forma, a substituição é imediata e rápida, ao passo que, a opção pelas lâmpadas fluorescentes tubulares (LFTs) tradicionais, levaria à substituição de luminárias, refletores, lustres, instalação de reatores, onerando o processo.

### **I.2. RELEVÂNCIA DO TEMA E MOTIVAÇÃO**

Conforme mencionado, os programas e ações visando a conservação de energia (CE), procuram melhorar a eficiência na utilização da energia elétrica, retardar investimentos e reduzir a possibilidade de racionamento [Ab98]. Porém estes mesmos programas, em sua grande parte, podem contribuir para o aumento dos problemas de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A causa disto é que os equipamentos utilizados na CE, como é o caso das LFCs, reatores eletrônicos, e outros, apresentam características de não-linearidade além de vulnerabilidade aos distúrbios da rede. Ao mesmo tempo, que podem contribuir para o acréscimo dos problemas de QEE, são vulneráveis aos mesmos.

---

<sup>1</sup> A vida útil das LIs gira em torno de 1.000 horas e das LFCs, em torno de 8.000 horas [Ro91]

Na maioria dos casos, os equipamentos eletrônicos sensíveis não aparecem sozinhos. Em um mesmo local pode-se encontrar computadores pessoais (PCs), *scanners*, detectores diversos, *dimmers*, equipamentos de comunicação, equipamentos de iluminação (LFCs, reatores eletrônicos), rádios elétricos, aparelhos de som, TVs, equipamentos chaveados em geral, e até *ASDs* (*Adjustable Speed Drive*). Estes equipamentos, dentre outros, podem causar distúrbios de QEE, principalmente no que diz respeito à deformação das ondas de corrente.

Uma das metas buscadas pelas concessionárias e por diversos estudos é determinar metodologias para quantificar os efeitos destes equipamentos no sistema elétrico.

Com este foco, foram estudados diversos experimentos e levantamentos realizados no Brasil e no exterior nestes últimos 20 anos, buscando-se o estado da arte atual do assunto.

Os primeiros trabalhos se limitaram a analisar as LFCs e suas características particulares em laboratórios, sem estarem ainda inseridas nos sistemas elétricos [To93]. Em 1989, Etezadi-Amoli, EUA [Et89], afirmou que o uso intensivo de LFCs iria, no futuro, resultar em custos adicionais consideráveis para as concessionárias. Também em 1989, Kalinowsky [Ma89] alertou que a influência de outras cargas, em paralelo com as lâmpadas fluorescentes, poderia afetar o conteúdo total harmônico no secundário dos transformadores de distribuição. Em 1981, Zavadil [Jo91] analisou o impacto de cargas não lineares na QEE e observou que correntes harmônicas indesejáveis e suas interações com o sistema supridor de energia poderiam resultar em inaceitáveis níveis de distorção harmônica de tensão, sobrecarregamento de condutores de fase e neutro em circuitos de distribuição, sobreaquecimento de transformadores e motores e interferências na operação de equipamentos eletrônicos sensíveis.

Verderber [Ve91], em 1991, simulou o efeito da substituição de LIs por LFCs em edifício comercial, concluindo que mesmo as LFCs atingindo 26% da carga total do edifício, o  $DHT_v$  não ultrapassava o limite de 5%. Por sua vez, Emanuel [Pi93], EUA, em 1992, modelando 3 alimentadores de 13,8 kV concluiu que as LFCs poderiam prejudicar a confiabilidade e a qualidade da energia elétrica dos sistemas de distribuição e que a máxima carga de LFC, com  $DHT_i$  de 140%, no alimentador deveria ser de apenas 1% para não ultrapassar a distorção total de tensão ( $DHT_v$ ) de 5%. Esta conclusão contrasta com a conclusão anterior de Verderber [Ve91] e foi explicada pela maior complexidade da rede, quantidade maior de variáveis contempladas e pela existência prévia de cargas não

lineares na simulação do Prof. Emanuel. Outros trabalhos [Be93, Du01, Go99] concluíram que a inclusão de LFCs afetam pouco os sistemas elétricos chegando a ser benéfica tanto para o consumidor como para a concessionária de energia elétrica. A maioria dos estudos consideram os sistemas e cargas equilibradas.

Estes diferentes resultados, aliados à situação de uso crescente das LFCs, que apresentam um fator de carga mais elevado que a maioria dos eletrodomésticos e altas distorções totais de corrente, serviram de motivação para este estudo, levando a diversos questionamentos.

Até que nível o sistema elétrico pode ter estas cargas não lineares, sem mitigação de seus efeitos e sem comprometer a confiabilidade do sistema? Quais os métodos de mitigação mais eficientes? Quais os parâmetros mínimos que devem ser exigidos destes equipamentos em termos de distorção harmônica, fator de potência, compatibilidade eletromagnética? Qual o efeito real das LFCs nos sistemas elétricos existentes? Os estudos normalmente consideram o sistema equilibrado. Qual o real efeito das distorções harmônicas em um sistema desequilibrado?

### **I.3. OBJETIVOS**

Assim, as LFCs, por serem cargas não lineares e utilizarem, em sua grande maioria, reatores eletrônicos, apesar de reduzirem o consumo de energia ativa, causam distorções nas formas de onda da corrente elétrica, o que pode conduzir a problemas associados à QEE. Estas distorções, representadas pelos harmônicos, levam a um acréscimo da potência aparente exigida do sistema devido à componente distorcida da potência. Como consequência haverá uma redução do fator de potência verdadeiro do sistema. Estes efeitos, associados aos já conhecidos pela presença de harmônicos tais como sobreaquecimento em transformadores, carregamento do fio neutro, distorções na tensão, e outros, nos levam a este estudo o qual tem como objetivo analisar estes impactos causados pelo uso em larga escala das LFCs no sistema de distribuição, associadas a outras cargas não lineares de uso normal pelos consumidores.

### **I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Visando atingir os objetivos descritos, esta dissertação foi dividida em 7 capítulos sendo o primeiro reservado para introdução, com detalhamento da relevância do tema, motivação, objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo foi elaborado com o objetivo de apresentar novos conceitos relativos às potências elétricas, conceitos estes que serão necessários para o entendimento do texto desta dissertação.

O terceiro capítulo apresenta uma visão geral das características de alguns tipos de lâmpadas, reatores eletromagnéticos e eletrônicos, com o enfoque para as LFCs, incluindo-se aí comentários sobre a legislação brasileira atual.

O quarto capítulo se destina a mostrar como foram feitos os levantamentos das características elétricas das LFCs e outros equipamentos eletroeletrônicos utilizados em residências, detalhando a bancada auxiliar de testes construída para este fim e os resultados destas medições, incluindo associações de LFCs e outras cargas lineares e não lineares.

O quinto capítulo mostra como foi realizada a modelagem das LFCs e de outras cargas não lineares. Qual o método e qual o *software* utilizados, bem como analisa a validade dos modelos.

O sexto capítulo apresenta uma das contribuições desta dissertação. Ele foi destinado à prospecção de dados para modelagem dos sistemas de distribuição. Foram utilizados dados de pesquisas realizadas no Brasil pela Eletrobrás-Procel para se configurar modelos de residências típicas. Além disto, este capítulo apresenta as considerações feitas para se definir parâmetros elétricos dos componentes dos sistemas tais como cabos, transformadores e potência de curto-circuito do próprio sistema.

O sétimo capítulo é o principal, pois ele trata das simulações propriamente ditas e seus resultados. É o capítulo que encerra importante contribuição desta dissertação, ou seja, o programa computacional, baseado no Método de Monte Carlo, que leva em conta a aleatoriedade de funcionamento das cargas, as simulações com cargas desequilibradas e os perfis das grandezas elétricas ao longo do dia.

O capítulo 8 encerra as conclusões gerais desta dissertação e sugestões para futuros trabalhos.

Após o capítulo 8, são apresentadas as principais referências bibliográficas utilizadas ao longo desta dissertação.



## II. NOVOS CONCEITOS DE POTÊNCIA E FATOR DE POTÊNCIA

### II.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho de dissertação tem recorrido a alguns novos conceitos de potência e de fator de potência, os quais são ainda pouco usuais na prática. Tais conceitos têm sido apresentados na literatura especializada ao longo destes últimos anos.

Sendo assim, este capítulo tem por objetivo introduzir tais questões, sem intenção de aprofundá-las, mas tão somente inseri-las no contexto deste trabalho.

### II.2. HARMÔNICOS

A distorção na forma de onda de tensão e/ou corrente da rede não é um fenômeno recente. Cargas fortemente não lineares, tais como fornos a arco e equipamentos utilizando núcleos ferromagnéticos saturáveis, existem desde as primeiras redes de distribuição em corrente alternada. No entanto, o desenvolvimento e a crescente utilização de dispositivos a semicondutores para alimentação e controle de equipamentos de potência têm contribuído significativamente para a degradação das ondas senoidais.

#### II.2.1. FONTES DE HARMÔNICOS E SEUS EFEITOS

As principais fontes de harmônicos nos sistemas elétricos são [Ga02, Ee04]:

- Sistemas de retificação e acionamentos de corrente contínua.
- Fontes de alimentação monofásicas chaveadas (*SMPS – switch mode power supply*).
- Conversores trifásicos de potência e acionamentos de corrente alternada.
- Reatores eletrônicos para iluminação.
- Dispositivos a arco elétrico.
- Dispositivos com núcleos magnéticos (saturáveis).

A presença de harmônicos contribui para a redução da vida útil do sistema e dos equipamentos a ele ligados [Ga02]. Entre os diversos efeitos dos harmônicos nos sistemas elétricos, pode-se citar:

- Redução do fator de potência verdadeiro.

- Possíveis ressonâncias entre cargas indutivas e capacitivas, provocando danos por sobretensão.
- Interferência em sistemas de comunicação, circuitos de controle e telefônicos.
- Aumento nas perdas do condutor de neutro.
- Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores.
- Erros em instrumentos convencionais.
- Aumento de perdas em condutores de fase.
- Aumento de perdas em transformadores por histerese e correntes parasitas e efeito Joule (*Derating*).
- Alteração das características de operação dos relés de proteção.

### II.2.2. FATORES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

O valor eficaz de uma forma de onda distorcida, por exemplo, de corrente, é dado pela expressão:

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_h^2} \quad (1)$$

Sendo:

$I_1, I_2, I_3, \dots, I_h$  – são os valores eficazes da componente fundamental e dos harmônicos nas diversas frequências múltiplas da fundamental.

A forma mais usual de exprimir o conteúdo harmônico de uma onda é através da distorção harmônica é a distorção harmônica total (*DHT*). Este índice, normalmente em valor percentual, é calculado pela expressão (2).

$$DHT_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Sendo:

$DHT_i$  – Distorção harmônica total de corrente;

$h$  – ordem harmônica;

$I_h$  – harmônico de corrente de ordem  $h$ , valor eficaz;

$I_1$  – componente fundamental da corrente em valor eficaz.

A mesma formulação é utilizada para a tensão, obtendo-se a  $DHT_v$  (Distorção harmônica total de tensão).

Caso seja necessário determinar a distorção individual provocada por um harmônico específico, as seguintes expressões são usadas:

$$DH_{v(h)} = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$DH_{i(h)} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

onde:

$DH_{v(h)}$  – distorção harmônica de tensão do harmônico de ordem h;

$DH_{i(h)}$  - distorção harmônica de corrente do harmônico de ordem h.

### II.3. CONCEITOS DE POTÊNCIA COM CARGAS NÃO LINEARES EQUILIBRADAS E/OU FONTES DISTORCIDAS, EQUILIBRADAS E SIMÉTRICAS

Com a introdução das cargas não lineares no sistema elétrico, não cabe mais falar apenas em potência ativa ( $P$ ) e “reativa” ( $Q$ ), mais recentemente denominada de potência não ativa de deslocamento [Ae04]. Assim, quando da existência de harmônicos, uma terceira parcela de potência que não produz trabalho irá aparecer. Esta parcela tem sido denominada de potência não ativa de distorção ( $D$ ).

Em um sistema elétrico trifásico equilibrado/simétrico, tem sido utilizada a seguinte equação que relaciona a potência aparente ( $S$ ), a potência  $P$  e a potência  $Q$ :

$$S = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_k)^2} \quad (5)$$

Sendo  $k = 1,2,3$  (as fases do sistema)

Porém, em se tratando de cargas não lineares, a terceira parcela de potência passa a existir e a expressão deve ser:

$$S = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_k)^2 + (\sum_k D_k)^2} \quad (6)$$

Esta nova situação pode ser visualizada através do chamado tetraedro de potências, conforme Figura II.1.

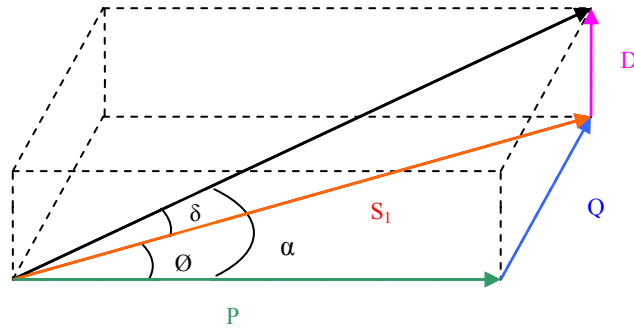


Figura II.1 - Tetraedro de potências

A potência aparente  $S$  é também pode ser calculada pela expressão:

$$S = \left| \sum_{k=1,2,3} \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* \right| \quad (7)$$

Onde:

$\dot{V}_k$  – tensão elétrica da fase  $k$ ;

$\dot{I}_k$  – corrente elétrica da fase  $k$ .

Como a potência aparente total do sistema trifásico pela soma vetorial das potências  $S$  de cada fase, ela é geralmente denominada de potência aparente vetorial ( $S_v$ ).

Dentre as várias proposições para cálculo da potência de distorção ( $D$ ), a fórmula (8) de Budeanu modificada [Yi99, Df03] tem conseguido resultados satisfatórios e tem sido bastante utilizada. Esta expressão é resultante do produto cruzado entre os harmônicos de tensão e os harmônicos de corrente de uma mesma fase.

$$D = \sum_{k=1,2,3} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_{km}^2 I_{kn}^2 + V_{kn}^2 I_{km}^2 - 2 \cdot V_{km} I_{kn} V_{kn} I_{km} \cos(\gamma_{km} - \gamma_{kn})} \quad (8)$$

Sendo que  $\gamma_m$  é o ângulo formado entre a tensão e a corrente do harmônico de ordem  $m$  e  $\gamma_n$  é o ângulo formado entre a tensão e a corrente do harmônico de ordem  $n$ :

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \phi_m - \varphi_m \\ \gamma_n &= \phi_n - \varphi_n \end{aligned} \quad (9)$$

### II.3.1. FATORES DE POTÊNCIA

O fator de potência tem sido historicamente abordado como sendo a eficiência em se realizar um trabalho, com uma potência ativa  $P$ , a partir de uma certa ocupação do sistema elétrico traduzida como potência aparente  $S$ .

O fator de potência ( $FP$ ) é universalmente conhecido como:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Para um sistema elétrico equilibrado, simétrico e com cargas lineares e equilibradas, o fator de potência ( $FP$ ) coincide com o  $\cos\phi$  ( $\phi$  é o ângulo entre tensão e corrente), quando pode ser então denominado de fator de potência de deslocamento ( $FP_d$ ) ou, simplesmente, fator de deslocamento.

Particularmente, para o caso de um sistema trifásico, uma vez que os ângulos entre tensão e corrente em cada fase podem ser diferentes, definiu-se o fator de potência vetorial ( $FP_v$ ), apresentado pela expressão a seguir, onde  $S_v$  é dada pela equação (5):

$$FP_v = \frac{\sum P_k}{S_v} \quad (11)$$

Sendo  $k = 1,2,3$

No caso do sistema possuir cargas equilibradas porém não lineares e/ou fontes distorcidas equilibradas e simétricas, a expressão para o fator de potência continua sendo dada pela expressão (11) porém, a potência  $S_v$  a ser utilizada é aquela calculada pela expressão (6) ou (7), contemplando a potência de distorção ( $D$ ). Assim, conforme mostra a Figura II.1, tem-se agora os seguintes fatores:

Fator de deslocamento  $FP_d = \frac{P}{S_1} = \cos\phi \quad (12)$

Fator de distorção  $F_d = \frac{S_1}{S} = \cos\delta \quad (13)$

Fator de potência verdadeiro  $FP = \frac{P}{S} = \cos\alpha = \cos\phi \cdot \cos\delta \quad (14)$

De forma geral, o fator de deslocamento é um componente do fator de potência e representa a razão entre a potência ativa da fundamental e a potência aparente da fundamental [St92], o que coincide com o cosseno do ângulo entre as fundamentais de corrente e tensão.

Cabe, entretanto ressaltar que, se houver o mesmo harmônico tanto na corrente como na tensão, o ângulo  $\phi$  não será necessariamente o ângulo entre as fundamentais.

### **II.4. CONCEITOS DE POTÊNCIAS COM CARGAS NÃO LINEARES DESEQUILIBRADAS E/OU FONTE DISTORCIDA, DESEQUILIBRADA E/OU ASSIMÉTRICA**

#### **II.4.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DE CORRENTE**

O conceito de desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico aplica-se a uma condição em que as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo. No caso de defasagens angulares entre as tensões diferentes de  $120^\circ$  elétricos, costuma-se dizer que a fonte é assimétrica. Em outras palavras, uma fonte pode ser desequilibrada, assimétrica ou ambas.

O grau de desequilíbrio/assimetria de tensão de um sistema elétrico pode ser definido de diversas maneiras sendo que a forma mais aceita é a relação entre os módulos da tensão fundamental de seqüência negativa e da tensão fundamental de seqüência positiva [Du02, Ja00], conforme a expressão (15). Esta definição está baseada no fato de que um conjunto trifásico de tensões simétricas e equilibradas possui apenas componentes de seqüência positiva.

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \% \quad (15)$$

Onde:

$VUF$  – fator de desequilíbrio de tensão;

$V_2$  – módulo da tensão de seqüência negativa;

$V_1$  – módulo da tensão de seqüência positiva.

Tensões desequilibradas são prejudiciais ao funcionamento de alguns equipamentos elétricos tais como motores de indução e conversores estáticos, comprometendo o seu desempenho e sua vida útil.

O cálculo do desequilíbrio da corrente é realizado da mesma forma. Devido ao desequilíbrio das cargas, as correntes podem apresentar percentuais de desequilíbrio bem altos, da ordem de 10 a 20%, porém dependendo da rigidez do sistema (potência de curto-circuito) o reflexo na tensão pode ser bastante atenuado.

Os sistemas de distribuição convivem com um certo grau de desequilíbrio/assimetria de tensão e desequilíbrio de corrente em razão, principalmente, de grande quantidade de cargas monofásicas.

#### II.4.2. POTÊNCIA DE DESEQUILÍBRIO/ASSIMETRIA E FATOR DE POTÊNCIA

Neste ponto, alguns autores, dentre eles Emanuel [Ae04], têm demonstrado também o aparecimento de uma outra parcela de potência não ativa (oscilante, com valor médio nulo), causada pelo desequilíbrio das cargas e/ou desequilíbrio/assimetria das tensões.

É claro que, esta questão passa pela discussão sobre a melhor forma de definir o conceito de potência aparente, de onde deriva toda a noção de ocupação do sistema elétrico.

Assim, há na literatura especializada a proposta de que a potência aparente de um sistema trifásico deva também contemplar a possibilidade do desequilíbrio/assimetria. Neste caso, a potência aparente, agora denominada potência aparente do sistema ( $S_s$ ), passa a ser traduzida como sendo a multiplicação da tensão trifásica equivalente pela corrente trifásica equivalente [Ja00], indicada em (16).

$$S_s = V_{eq} \cdot I_{eq} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \cdot \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (16)$$

Onde:

$S_s$  – potência aparente do sistema;

$V_{eq}$  - tensão eficaz trifásica;

$I_{eq}$  - corrente eficaz trifásica;

$V_a, V_b, V_c, I_a, I_b$  e  $I_c$  – tensões e correntes eficazes de fase.

Nesta nova situação, mesmo se não houver distorções harmônicas, porém sendo a carga desequilibrada e/ou a fonte desequilibrada/assimétrica, não bastam as potências  $P$  e  $Q$  para que o valor da potência aparente seja encontrado, como na expressão (5).

Um novo conceito de potência, denominado de potência de assimetria ou de desequilíbrio ( $A$ ) [Ie95, Cz96] passa então a ser necessário. Uma formulação para o cálculo da potência  $A$  pode ser encontrada em [Df03].

Com isso, para o caso de cargas lineares e fontes sem distorção, a nova relação entre as potências passa a ser:

$$S_s = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_k)^2 + A^2} \quad (17)$$

No caso da existência de cargas não lineares e/ou fontes com distorção, tem-se:

$$S_s = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_k)^2 + (\sum_k D_k)^2 + \sum_h A_h^2} \quad (18)$$

Sendo  $h$  é o índice de cada harmônica presente e  $k = 1,2,3$ , as fases do sistema.

É importante ressaltar que no caso da existência de harmônicos de mesma ordem na tensão e na corrente, parcelas de potência  $P$  e  $Q$ , devido a estes harmônicos, também poderão existir [Ae04].

Como consequência destas definições, o fator de potência irá assumir diferentes valores dependendo da definição adotada para a potência aparente, se vetorial ( $S_v$ ) ou do sistema ( $S_s$ ), conforme as expressões a seguir:

$$FP_v = \frac{P_{3\phi}}{S_v} \quad (19)$$

$$FP_s = \frac{P_{3\phi}}{S_s} \quad (20)$$

Se o sistema for equilibrado/simétrico, ambas as formulações de fator de potência resultarão em valores iguais. Caso contrário, sempre  $FP_s$  será menor que  $FP_v$ .

## II.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de novas definições de potência vêm avançando nestes últimos anos. Autores como Emanuel, Czarnecki, Ferrero e tantos outros [Wp03] vêm apresentando resultados de suas pesquisas na tentativa de se alcançar um ponto comum quanto às formulações matemáticas e possíveis significados físicos. Por ora, os conceitos apresentados neste capítulo serão suficientes para balizar alguns resultados encontrados neste trabalho.



### **III. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFC) - ESTADO DA ARTE – LEVANTAMENTO DE DADOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **III.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Uma vez que o princípio de funcionamento das LFCs é o mesmo das LFTs, descrever-se-á o funcionamento básico e as principais características destas últimas, de modo a esclarecer os conceitos que nos serão necessários no decorrer do trabalho. Além disso, serão analisados os princípios de funcionamento dos reatores eletromagnéticos e eletrônicos, estes últimos utilizados com as LFCs.

#### **III.2. LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES**

A LFT é a clássica forma para uma iluminação econômica sendo uma de suas vantagens mais importantes, a sua alta eficiência luminosa<sup>2</sup>. Enquanto uma lâmpada incandescente produz de 10 a 15 (lm/W), uma fluorescente trabalha na faixa de 50 a 80 (lm/W). Esta alta eficiência e a sua longa durabilidade garantem sua aplicação nas mais diversas áreas comerciais e industriais [CaOs].

##### **III.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO / CARACTERÍSTICAS**

A LFT é uma lâmpada de descarga de baixa pressão, na qual a luz é predominantemente produzida por pós fluorescentes ativados pela energia ultravioleta da descarga. A lâmpada, geralmente em forma de bulbo tubular longo, com um eletrodo em cada extremidade, contém vapor de mercúrio sob baixa pressão, com uma pequena quantidade de gás inerte para facilitar a partida [MaPh]. Quando a lâmpada é ligada, a passagem de corrente elétrica através dos filamentos causa o aquecimento dos mesmos e a liberação de elétrons. Esses elétrons se movimentam de um catodo para o outro em altíssima velocidade, estabelecendo uma descarga elétrica (arco) no vapor de mercúrio. Esta descarga emite quase que totalmente radiação ultravioleta (invisível ao olho humano) que por sua vez, será convertida em luz visível pelo pó fluorescente ou pó de fósforo que reveste a superfície interna do bulbo. É a composição deste pó fluorescente que determina

---

<sup>2</sup> Eficiência luminosa é o quociente do fluxo luminoso total emitido por uma fonte de luz, em lúmens (lm), e a potência por ela consumida, em Watts (lm/W)

a qualidade e a quantidade de luz, as alternativas de cor e a eficiência na reprodução de cor [CaOs].

Os eletrodos são constituídos de um filamento de tungstênio espiralado (catodo) revestido com material emissivo de elétrons.

A Figura III.1 ilustra a produção de luz visível em uma lâmpada fluorescente.

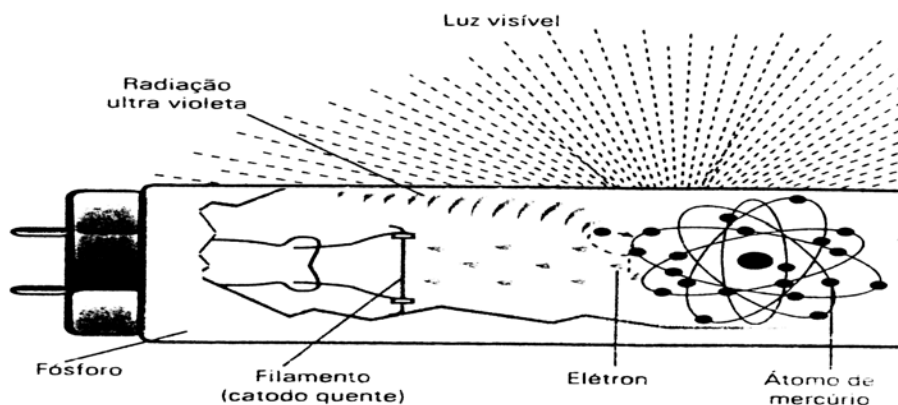


Figura III.1 – Produção de luz em uma lâmpada fluorescente [CaSy]

### III.2.2. LÂMPADAS FLUORESCENTES DE ÚLTIMA GERAÇÃO

A grande evolução das lâmpadas fluorescentes ao longo dos anos tem ficado por conta da redução do diâmetro dos bulbos. Quanto menor for o bulbo, maior a possibilidade de aproveitamento óptico dos refletores, pois haverá maior área livre para reflexão, permitindo melhor eficiência das luminárias. Além disso, o menor diâmetro torna maior a probabilidade de colisões entre os elétrons livres e os átomos de mercúrio e diminui a corrente elétrica da lâmpada [Ka91, Ro91].

Outro fato importante foi, para alguns tipos de lâmpadas, a substituição do fósforo comum, com eficiência luminosa de até 70 (lm/W) pelo trifósforo, elevando-a para até 100 (lm/W).

Esta nova geração de lâmpadas fluorescentes tem sua melhor eficiência traduzida por um menor consumo. Computando as reduções da potência da lâmpada, perdas no reator e nas luminárias, podemos chegar a uma economia de aproximadamente 30%, em relação às lâmpadas tradicionais.

Encontramos no mercado várias lâmpadas fluorescentes econômicas com as potências de 16 W e 32 W com 26 mm de diâmetro, que substituem respectivamente as convencionais de 20 W e 40 W com 38 mm, com a mesma eficiência luminosa.

### III.3. REATORES – TECNOLOGIAS EMPREGADAS

As lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de descarga onde se estabelece um arco entre os eletrodos. Elas apresentam características não lineares de impedância negativa, isto é, quanto mais corrente no arco, menor a resistência. Isto requer o uso de reatores que atuem limitando a sua corrente para evitar a destruição das lâmpadas por correntes excessivas [Vi98]. Deste modo, as lâmpadas fluorescentes não são conectadas diretamente à rede elétrica e sim a um reator e, por este motivo, não há uma tensão específica associada a qualquer lâmpada fluorescente, mas sim aos reatores tais como 127 V, 220 V.

#### III.3.1. REATORES ELETROMAGNÉTICOS

Para solucionar o problema de limitação de corrente são utilizados os reatores eletromagnéticos, alimentados na frequência da rede (50 Hz / 60 Hz). O reator é constituído de uma bobina com núcleo de ferro ( $L$ ) e é ligado em série com um dos eletrodos da lâmpada fluorescente, como mostra a Figura III.2 [MaPh], onde S é a representação do *starter* (dispositivo de partida). A função do reator é controlar e estabilizar a corrente elétrica estabelecida entre os eletrodos da lâmpada. Isto é conseguido por causa da saturação que ocorre no núcleo de ferro. Por sua vez, tal saturação do campo magnético irá provocar distorções na forma de onda da corrente, como se pode observar na Figura III.3.

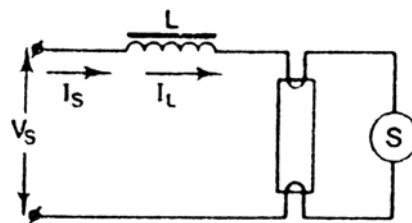


Figura III.2 – Reator eletromagnético básico

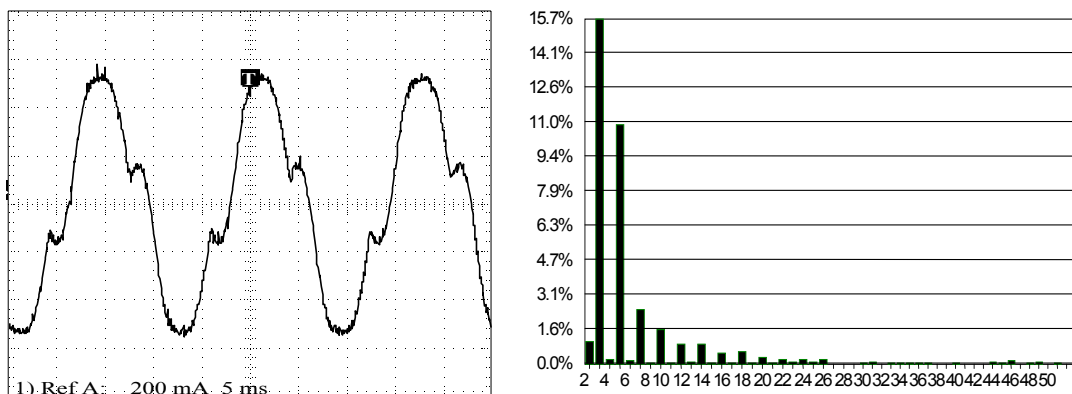


Figura III.3 – Reator eletromagnético – forma de onda de corrente e espectro harmônico [OI02]

Além da distorção harmônica, reatores eletromagnéticos apresentam outras características não desejáveis [Ya98, Ka94, Pa01, Vi98], tais como:

- Grande peso e volume
- Baixo fator de potência
- Efeito Flicker<sup>3</sup>
- Efeito estroboscópico
- Ruído audível (zumbido)
- Perdas / aquecimento

É possível corrigir o fator de potência de deslocamento através da inclusão de capacitores e indutores. A Figura III.4 apresenta dois exemplos desta correção. Também através da inclusão de filtros, pode-se corrigir a distorção harmônica, reduzindo-a significativamente. As demais características não desejáveis dos reatores eletromagnéticos não podem ser solucionadas por serem inerentes aos aspectos construtivos.

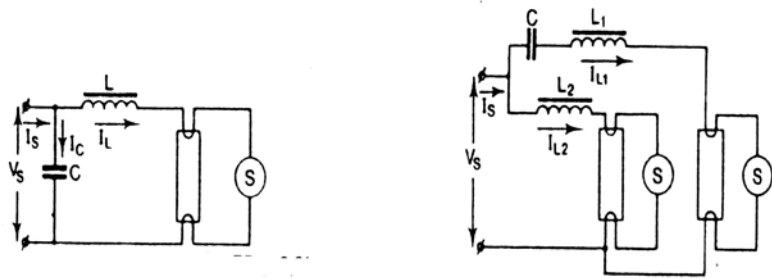


Figura III.4 – Circuitos para correção do fator de potência de deslocamento

### III.3.2. REATORES ELETRÔNICOS [Ka94, Ro91, Bro99]

O reator eletrônico consiste de um circuito retificador-inversor que eleva a frequência do sinal para uma faixa entre 20 e 50 kHz. As altas frequências de operação proporcionam aumento geral de eficiência, redução de ruídos e aumento da vida útil.

A Figura III.5 mostra um esquema elétrico simplificado de um sistema de iluminação fluorescente com reator eletrônico.

<sup>3</sup> Efeito Flicker, também chamado cintilação luminosa, pode ser definido como sendo a sensação visual (incômodo) resultante das variações do fluxo luminoso das lâmpadas incandescentes e fluorescentes. O Flicker é observado na faixa de frequência de 0 a 30 Hz.

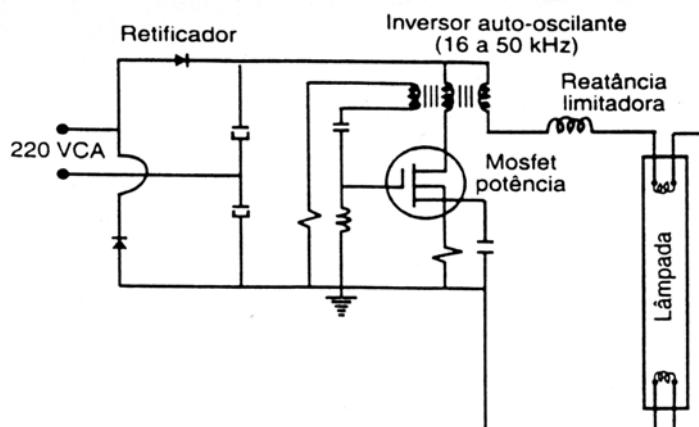


Figura III.5 – Esquema de um sistema de iluminação fluorescente com reator eletrônico [Bro99]

Conforme a Figura III.5, o reator eletrônico pode ser dividido em três blocos funcionais:

- Fonte retificadora (conversor não controlado)
- Inversor
- Circuitos de partida e estabilização

Seguem alguns comentários sobre estes elementos:

(i) Fonte retificadora

A fonte retificadora converte a tensão alternada de 50/60 Hz em tensão contínua com valores médios e de ondulação compatíveis para operação adequada do inversor.

Simultaneamente o circuito de entrada pode desempenhar outras quatro funções, dependendo da complexidade do reator:

- Limitar a injeção de componentes harmônicas de corrente na rede de alimentação em níveis abaixo dos especificados pelas normas correspondentes.
- Suprimir sinais de interferência em rádio-freqüência para compatibilizar o equipamento com as classes de interferências especificadas pelas normas correspondentes.
- Proteger os componentes eletrônicos do conversor contra surtos de tensão de rede e descargas atmosféricas.

(ii) Inversor

O inversor basicamente é um oscilador alimentado por tensão contínua que gera uma tensão alternada de alta freqüência (20 a 50 kHz) com amplitude adequada para que as lâmpadas funcionem nas suas condições normais. Já em freqüências entre 3 e 5 kHz há

aumento da eficiência das lâmpadas fluorescentes pois, devido às altas frequências, a coluna de gás não se desioniza, não ocorrendo a interrupção do arco. Porém, como esta faixa está inserida na faixa de áudio, é comum encontrarmos reatores eletrônicos cuja frequência de trabalho esteja entre 20 e 50 kHz, minimizando-se a geração de interferências audíveis.

(iii) Circuito de partida e estabilização

Este circuito, freqüentemente, é parte integrante do inversor e utiliza indutâncias e capacitâncias associadas. Em função da frequência elevada, as dimensões do indutor se tornam bastante reduzidas. Um indutor de 1 Henry em 50 Hz, será de apenas 1 mili-Henry (1000 vezes menor) em 50 kHz, mantendo a mesma reatância, o que permite componentes muito menores, levando a uma redução significativa no peso dos reatores. Através de circuitos ressonantes série, é possível estabelecer a tensão necessária para a partida.

Por sua vez, também os reatores eletrônicos, sendo estes cargas não lineares, causam a distorção da forma de onda da corrente, injetando componentes harmônicas na rede.

A Figura III.6 apresenta a forma de onda da corrente e o respectivo espectro harmônico de um reator eletrônico alimentando uma lâmpada fluorescente.

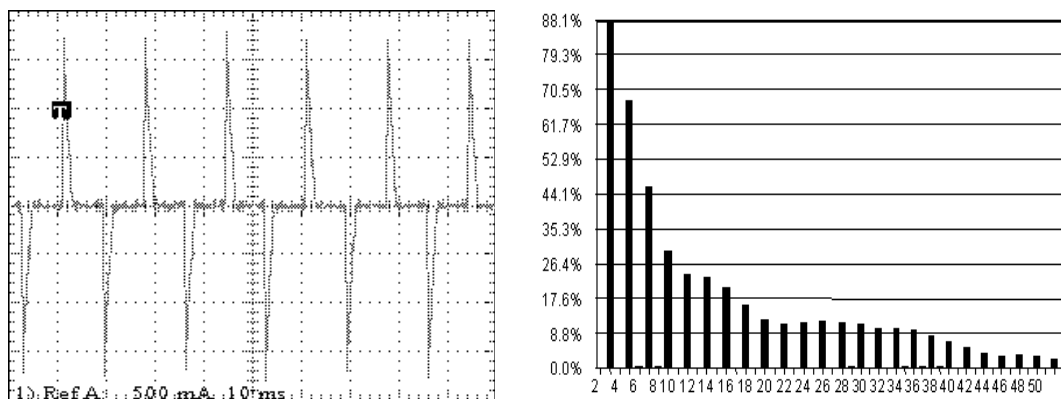


Figura III.6 – Reator eletrônico - forma de onda de corrente e espectro harmônico [OI02]

Os harmônicos de ordem par podem ser desconsiderados para os cálculos práticos. Nota-se com clareza que o conteúdo harmônico advindo da utilização do reator eletrônico é consideravelmente maior que o do reator eletromagnético (Figura III.3).

### III.3.2.1 CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DO FATOR DE POTÊNCIA VERDADEIRO PARA REATORES ELETRÔNICOS [Ka94]

Os sistemas de iluminação que utilizam reatores eletrônicos normalmente possuem fator de potência de deslocamento alto (0,90 a 0,95), porém, devido à distorção da forma de onda da corrente, o fator de potência verdadeiro é baixo, normalmente na faixa de 0,46 a 0,57 [Pa01]. No entanto, a flexibilidade oferecida pelos circuitos eletrônicos possibilita elaborar configurações que permitem operar o conversor eletrônico com elevado fator de potência e dimensionar o circuito de entrada de forma a limitar os harmônicos injetados na rede.

Encontramos no mercado os reatores eletrônicos de baixo fator de potência verdadeiro – BFP (valores entre 0,46 e 0,57) e os reatores eletrônicos com alto fator de potência verdadeiro – AFP (valores de 0,9 a 0,99) sendo que estes últimos custam de 2 a 3 vezes o valor dos primeiros, variando em função do fabricante e das características de correções tais como transientes, DHT e fator de potência verdadeiro.

No mercado brasileiro, setor residencial, normalmente se adquire o reator de BFP, devido ao custo, ao desconhecimento técnico, bem como pelo fato de não haver taxaço do consumo de energia não ativa para estes consumidores.

Existem inúmeros circuitos que executam a correção de distorção harmônica e do fator de potência verdadeiro através de componentes passivos (capacitores e indutores). Alguns destes podem ser encontrados nas referências [Be91, Ve91].

Há também a correção do fator de potência verdadeiro de forma ativa, através de conversor de reforço (*Boost converter*) que utiliza circuito integrado comercial com esta função específica, tais como da Motorola, Siemens, Silicon General [Be91]. A correção ativa tem um custo mais elevado em relação à correção passiva.

### III.3.3. COMPARATIVO ENTRE REATORES ELETRÔNICOS E ELETROMAGNÉTICOS

A principal vantagem dos reatores eletrônicos em relação aos eletromagnéticos é a economia de energia devido ao aumento da eficiência da lâmpada (alimentada em alta frequência) e do conversor/inversor (pela flexibilidade e elevada eficiência intrínseca dos circuitos eletrônicos). Alguns autores estimam que esta economia de energia pode chegar a 30% [Ro91] além da economia indireta de energia, pois luminárias com reatores

eletrônicos aquecem menos em virtude da menor potência dissipada, proporcionando uma redução considerável na carga térmica do sistema de ar condicionado.

A alimentação em alta frequência reduz a oscilação do fluxo luminoso na lâmpada e elimina quase por completo o efeito estroboscópico. Em alta frequência, este efeito praticamente desaparece devido à inércia do revestimento de fósforo das lâmpadas fluorescentes, que não consegue mais acompanhar as variações de excitação impostas pela frequência de operação.

Também, a eficiência em alta frequência implica corrente menor pela lâmpada, cuja vida útil, conseqüentemente, passa a ser mais longa, estimada em 50% [Ro91].

Outras vantagens do reator eletrônico sobre o reator eletromagnético são a redução do efeito Flicker, a redução dos ruídos audíveis, pequenas perdas, dimensões e peso reduzidos.

Dentre as desvantagens do reator eletrônico, as altas frequências de chaveamento dos transistores geram harmônicos no espectro de altas frequências que podem causar interferência em comunicação de rádios, equipamentos médicos sensíveis e computadores.

Porém, a maior desvantagem do reator eletrônico é o custo de 2,3 a 3 vezes maior em relação ao eletromagnético de AFP.

Tecnologias estão disponíveis para resolver problemas de proteção dos reatores contra transientes na rede, correção do fator de potência, redução do nível de harmônicos e redução de interferência eletromagnética e radiointerferência. Porém, o custo dos equipamentos fica elevado, tornando o seu *payback* bastante longo [Je91].

Assim, para o usuário residencial no Brasil, que não é penalizado pelo baixo fator de potência e/ou por injeção de harmônicos na rede, a utilização de reatores eletrônicos de alto custo não tem sido traduzida em vantagens, continuando o foco apenas na redução do consumo de potência ativa.

### **III.3.4. REGULAMENTAÇÃO**

A falta de uma especificação mais rígida de limites para o nível de harmônicos nas normas vigentes para equipamentos de iluminação, bem como a falta de dispositivos legais que limitem a comercialização de produtos elétricos sem correção do fator de potência, podem contribuir para a degradação da QEE em sistemas de distribuição.



No Brasil, a legislação mais recente para reatores eletrônicos é a Norma NBR 14418 de Dez/1999 [No99], válida a partir de 31/01/2000, sendo que a exigência a respeito de valor máximo de  $DHT_i$  e do fator de potência verdadeiro entrou em vigor em Fevereiro de 2003. A norma NBR 14418 - “Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrições de desempenho” foi baseada na norma européia IEC 60929:1990 e é válida para LFTs com reatores com potência total do circuito maior que 60 Watts , a qual estabelece:

1. Fator de potência verdadeiro  $\geq 0,92$
2.  $DHT_i \leq 32\%$
3. Valores de harmônicos individuais conforme IEC 555-2 [Ie82], mostrados na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Harmônicos individuais segundo IEC 555-2

Harmônicos de ordem n	Valores expressos em % da corrente fundamental
2	2
3	30 x fator de potência
5	10
7	7
9	5
$39 \geq n \geq 11$	3

#### III.4. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFCs)

Em 1983, os dois maiores fabricantes de lâmpadas da Europa, Philips e Osram, introduziram um novo tipo de lâmpada no mercado, que se tornou a base para uma nova e bem sucedida família de novos produtos na tecnologia de iluminação: a LFC, com as designações PL da Philips e Dulux da Osram.

Na década que se seguiu, ocorreram muitos aperfeiçoamentos nas LFCs, como o desenvolvimento das lâmpadas com reatores e *starters* integrados e os avanços nos circuitos eletrônicos de controle. Atualmente é possível encontrar LFCs na faixa de 5 a 55 Watts e 250 a 4800 lumens respectivamente, proporcionando um aumento nas aplicações destas lâmpadas.

As LFCs com reatores integrados apareceram pela primeira vez em 1986, com um projeto muito compacto e bocal de rosca E-27, abrindo o caminho para a substituição das lâmpadas incandescentes.

Quatro fatores contribuíram enormemente para o atual estado da arte das LFCs:

- As características e novos desenvolvimentos das lâmpadas fluorescentes comuns.

- A tecnologia dos reatores eletrônicos.
- As tecnologias de iluminação em bulbos menores e de menor diâmetro.
- A miniaturização dos componentes eletrônicos.

### III.4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LFCs

A LFC tem o mesmo princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescentes tubulares, acrescentando-se a alta eficiência e longa durabilidade.

Apesar de existirem LFCs com reatores eletromagnéticos, as LFCs, em sua grande maioria, operam com reator eletrônico que trabalha na faixa de 20 a 50 kHz.

Atualmente as LFCs são disponíveis com bocal E-14 e E-27 além das baionetas tipo B22, com tensões de 100 a 240 V. Alguns modelos podem ser operadas em corrente contínua. Para a grande maioria das LFCs não se recomenda a operação em circuitos com *dimmers*, *timers* eletrônicos e fotocélulas [CaOs]. Para tais aplicações, deve-se verificar com o fabricante as possibilidades.

As LFCs apresentam excelente reprodução de cores, com índices de 85% o que garante seu uso em locais onde a fidelidade é fundamental. Apresentam ainda tonalidade de cor adequada para cada ambiente, obtida graças à tecnologia do pó trifósforo, com opções de 2700 K (Kelvin<sup>4</sup>), semelhante às LIs e 4000 K, com aparência de cor mais branca, indicada para ambientes ativos onde se pretende estimular a produtividade e o consumo.

Como nas fluorescentes, as LFCs necessitam de valores elevados de tensão para a partida da lâmpada. Isto é conseguido através de um circuito ressonante série, pois o indutor existente, que é de dimensões muito reduzidas (1 mH em 50 kHz), quando comparado ao indutor do reator eletromagnético (1 H em 50 Hz), não tem capacidade de energia suficiente para a ignição das lâmpadas.

São inúmeros os tipos, modelos e também as características das LFCs. A Tabela III.2 ilustra algumas características importantes que normalmente constam dos catálogos dos fabricantes.

---

<sup>4</sup> Kelvin (K) é unidade da temperatura de cor correlata (TCC) que descreve a cor de uma fonte de luz. Abaixo de 3300 K, a lâmpada tem aparência quente, entre 3300 K e 5000 K, tem aparência neutra.

Tabela III.2 – Características das LFCs

Potência (W)	Tensão (V)	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência (lm/W)	Vida Útil Média (h)	Fator de Potência (FP <sub>v</sub> )	Distorção Harmônica Total (DHT <sub>i</sub> )
5	220	240	60	15000	<0.6	170
15	127	900	60	8000	<0.6	170
15	127	900	60	10000	> 0,9	< 32
16	127	900	60	8000	<0.6	170
20	127	1100	55	8000	<0.6	170
25	127	1500	60	8000	<0.6	170

### III.4.2. COMPARATIVO ENTRE LFCs E LÂMPADAS INCANDESCENTES

As LFCs consomem em torno de 75% a menos de potência ativa em comparação com as lâmpadas incandescentes para um mesmo fluxo luminoso, conforme Tabela III.3. Cabe observar que estes são valores médios, podendo existir variações para mais ou para menos de acordo com cada fabricante [Ca0s].

Tabela III.3 – Comparativo de potências entre LFCs e LIs

Potência - LFC (tensão 127 V)	Potência - lâmpada incandescente
10Watts	40 Watts
15 Watts	60 Watts
20 Watts	75 Watts
23 Watts	100 Watts
Potência - LFC (tensão 220 V)	Potência - lâmpada incandescente
5 Watts	25 Watts
15Watts	75 Watts
20 Watts	100 Watts
23 Watts	120 Watts

A praticidade de substituição imediata da LI pela LFC conseguida pelas dimensões reduzidas e bocal de rosca E-27, é um grande diferencial a favor das LFCs em comparação com as lâmpadas fluorescentes tubulares. Porém, o fator preponderante para a recomendação de substituição das LIs pelas LFCs é a eficiência luminosa. Uma maior eficiência luminosa significa que, comparativamente, uma menor potência elétrica ativa é consumida pela lâmpada para produzir determinado iluminamento, liberando assim, capacidade nos sistemas de distribuição.

### III.4.3. FORMAS DE ONDA E ESPECTRO HARMÔNICO

Independentemente do fabricante e da potência da lâmpada, a corrente elétrica de uma LFC típica, no mercado brasileiro, apresenta um alto índice de distorção harmônica.

A Tabela III.4 contém alguns valores obtidos em medições efetuados em 2001 [Pa01].

Tabela III.4 – DHT de corrente de lâmpadas fluorescente compactas

FABRICANTE	POTÊNCIA (W)	DHT (%)
Osram	21	121.70
Osram	15	174.29
Neonda	15	161.66
Philips	11	124.57
Niko	11	173.50
Niko	9	181.37
Crown	9	157.60

A Figura III.7 apresenta as formas de onda de tensão e corrente de uma LFC com alto  $DHT_i$  e mostra o espectro harmônico de corrente da mesma.

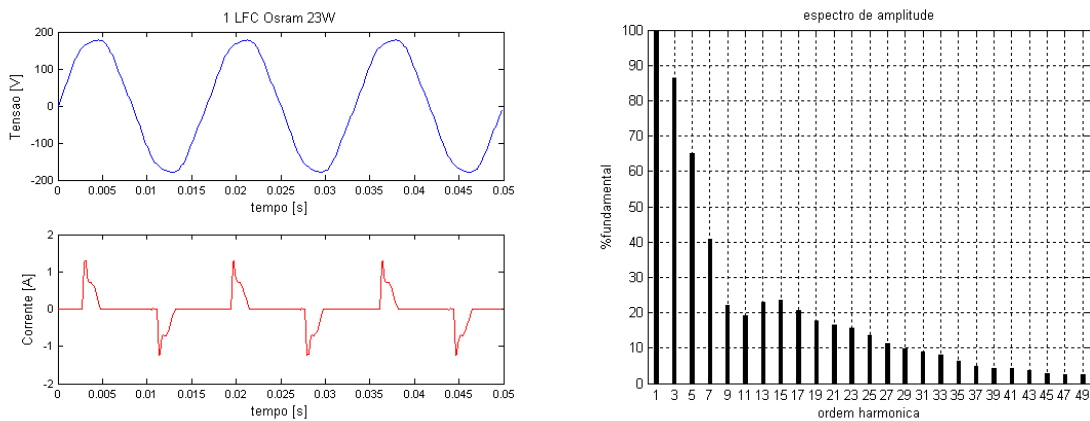


Figura III.7 – Forma de onda e espectro harmônico de corrente de uma LFC marca Osram 23 W

Verifica-se pelo espectro a forte presença do terceiro harmônico e de seus múltiplos, característica esta geral em muitas cargas não lineares baseadas em retificadores eletrônicos.

Quanto à Tabela III.4, este é apenas uma amostra de inúmeras referências e catálogos de fabricantes que apresentam  $DHT_i$  alto para as LFCs, valores estes que se situam normalmente acima de 100%. A grande maioria das lâmpadas comercializadas no Brasil nem ao menos apresenta na embalagem os valores de  $DHT_i$ , prática comum já há muitos anos nos EUA e Europa. Como efeito direto da alta distorção de corrente, o fator de potência verdadeiro destas LFCs fica na faixa de 0,46 a 0,57 enquanto o fator de potência de deslocamento está acima de 0,90, o que configura um maior carregamento do sistema elétrico.

#### III.4.4. NORMAS REGULAMENTADORAS

No Brasil, as LFCs comercializadas apresentam altos valores de  $DHT_i$  (acima de 100%) e baixo fator de potência verdadeiro. Um dos fatores que contribuem para isso é a falta de uma legislação mais rígida nesta questão. Por sua vez, os grandes fabricantes argumentam que, apesar de disporem da tecnologia, não implementam tal correção ( $DHT_i$ ,  $FP$ ) devido à limitação de volume, peso e, principalmente, custo.

Fora do Brasil, além das opções normais de mercado, os grandes fabricantes oferecem LFCs com  $DHT_i$  menores que 20% e fatores de potência verdadeiros maiores que 90%. Nos EUA, já em 1991, havia um consenso pela “*ANSI Fluorescent Lamp and Ballast Committee*” para lâmpadas fluorescentes tubulares de 120 cm e 240 cm, que recomendava  $DHT_i$  máximo de 32,5% e nível de 3º harmônico máximo de 27.5% [Ve91].

Na Europa, as prescrições de desempenho para reatores eletrônicos, alimentados por tensão entre 100 V e 250 V, nas frequências de 50 Hz ou 60 Hz e potência até 60 Watts, são estabelecidas pela IEC – 60969:1998 – “*Self-ballasted lamps for general lighting services – performance requirements*”.

No Brasil, o que existe na realidade é o PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem. Um programa estabelecido pela Eletrobrás, através do PROCEL, e que em parceria com o INMETRO, fornece um selo de qualidade e uma etiqueta de conservação de energia (ENCE). Este selo, chamado SELO PROCEL, e a etiqueta são concedidos aos equipamentos que atendem a requisitos mínimos estabelecidos e verificados em laboratório pelo INMETRO/Cepel.

No caso das LFCs, existe o “Anexo I – Padrão PROCEL - INMETRO para lâmpadas fluorescentes compactas e circulares – LFC – N° 008/2002” [PaPr], que estabelece especificações mínimas para: fluxo luminoso, durabilidade, temperatura de cor, fator de potência verdadeiro, potência, eficiência luminosa e interferência eletromagnética (esta última, opcional para o fabricante).

Em termos de fator de potência, o conjunto lâmpada reator obtém o selo e a etiqueta se o fator de potência verdadeiro for maior ou igual a 0,5. Caso se deseje que a lâmpada contenha a indicação “Alto Fator de Potência”, este deverá ser igual ou superior a 0,92. O mesmo anexo I estabelece também, como características opcionais aos fabricantes, os seguintes dados:

Lâmpadas circulares de qualquer potência e LFCs de potência inferior a 30 W:

- Baixa distorção harmônica total  $\leq 33\%$
- Alto fator de potência verdadeiro  $\geq 0,92$

Estabelece também que, a partir de 1º de Julho de 2003, é obrigatório para as LFCs de potência igual ou superior a 30 W, os mesmos valores dos percentuais acima.

É importante observar que este padrão PROCEL - INMETRO é apenas sugestão, ou seja, o fabricante não é obrigado a atendê-lo para poder colocar seus produtos no mercado a menos que seja de seu interesse a obtenção da etiqueta de conservação e o selo PROCEL. De qualquer forma, não deixa de ser um avanço rumo a uma normalização, o que ocorre no Brasil sempre com um razoável atraso em relação à Europa e aos EUA.

### **III.4.5. QUALIDADE DAS LFCs NO BRASIL**

Apesar dos esforços do PROCEL - INMETRO, a falta de legislação no Brasil, sobre as LFCs e outros equipamentos eletroeletrônicos de uso doméstico, facilita a proliferação de uma grande quantidade de equipamentos de baixa qualidade no que tange às grandezas elétricas. Isto pode ser comprovado pela proliferação de LFCs asiáticas e de outras origens que inundam nosso mercado. Os grandes e tradicionais fabricantes ficam sem opção a não ser fornecer produtos similares para continuarem competitivos. Alguns fabricantes, inclusive de origem asiática, estão atendendo aos requisitos do PROCEL - INMETRO de forma a serem mais competitivos no mercado, pois apresentam o selo e etiqueta de qualidade, além de garantirem seus produtos por 1 ano. Outros fabricantes, que não possuem o selo Procel, garantem suas lâmpadas por apenas 6 meses ou até menos.

Apesar do avanço conseguido, os parâmetros exigidos pelos PROCEL - INMETRO, são ainda pouco exigentes, sendo necessária a implementação de uma normalização o mais breve possível.

Infelizmente, o brasileiro não tem o perfil de avaliar os equipamentos por outras características que não sejam o preço e o retorno imediato. Assim, ele não compara a qualidade dos produtos e, no caso das LFCs, não tem a preocupação de verificar a durabilidade das mesmas, de forma a exigir um produto melhor e de maior vida útil.

### **III.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

São inegáveis os benefícios das LFCs, principalmente no que diz respeito à conservação da energia. Por outro lado, viu-se que tais lâmpadas podem, se cuidados não forem tomados, produzir altas taxas de distorção de corrente e apresentar baixo fator de potência verdadeiro. Assim, enquanto legislações mais rígidas não existirem, deve-se dar especial atenção ao impacto do uso intensivo destas lâmpadas nas redes de distribuição.

No decorrer desta dissertação, serão analisados estes impactos, avaliando o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente e tensão, da corrente de neutro e do fator de potência, procurando-se associar LFCs a outras cargas não lineares tais como TVs, computadores pessoais, microondas, aparelhos de som, LFTs, etc.

## IV. LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS LFCs E DE OUTROS EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS DE USO DOMÉSTICO

### IV.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como já descrito na introdução, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto da utilização em larga escala das LFCs, associadas a outras cargas lineares e não lineares, nos sistemas de distribuição. Para auxiliar na execução desta tarefa, uma bancada para medições foi implementada nas dependências do laboratório do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE) da Universidade Federal de Itajubá. A partir de então, diversas medições foram realizadas com o objetivo de se fazer um levantamento das características elétricas de diferentes LFCs, bem como de outras cargas residenciais. Medidores eletrônicos de grandezas elétricas foram utilizados.

Assim, este capítulo apresenta os detalhes técnicos da bancada auxiliar de medição, os instrumentos utilizados, bem como os resultados das medições efetuadas.

Com o intuito de obter maiores informações sobre as LFCs, diversos fabricantes foram consultados fazendo-se a eles solicitações de catálogos, diagramas, informações técnicas, bem como de exemplares de suas LFCs para serem testadas. Dentre os fabricantes citam-se: General Electric (GE), Osram, Philips, FLC, Peconic, Avant, Empalux, Lightex, Apolo, etc, num total de 15, que em maior ou menor grau contribuíram com a pesquisa. Somando-se às doações angariadas, outras LFCs foram adquiridas pelo Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE) perfazendo um total de mais de cinquenta lâmpadas que foram utilizadas para as medições em laboratório. Os demais eletroeletrônicos analisados foram tomados como empréstimos. Cabe ressaltar que sendo este trabalho apoiado pela *Light Serviços de Eletricidade Ltda.*, procurou-se enfatizar as lâmpadas mais comercializadas na cidade do Rio de Janeiro. Isto foi conseguido através de uma pesquisa com distribuidores e revendedores daquela região.

As principais grandezas elétricas de uma carga, no que diz respeito a sua influência na QEE de um sistema de distribuição, são: potência ativa, “reativa” e aparente, fator de potência, corrente elétrica (RMS), espectro harmônico de corrente (amplitude e ângulo de fase) e a distorção harmônica total ( $DHT_i$ ) de corrente. Um vez disponibilizado este conjunto de dados, torna-se possível a interpretação e a manipulação matemática do



mesmo, viabilizando assim encontrar modelos computacionais que correspondam às características dos sinais solicitados pelas LFCs e pelos eletroeletrônicos. Neste processo, torna-se importante medir também as características da tensão de alimentação, principalmente no que diz respeito ao nível de distorção harmônica. A tensão de alimentação terá influência e, ao mesmo tempo, poderá ser influenciada pelos sinais de corrente das cargas, tendo em vista a capacidade da fonte.

Considerando a predominância das LFCs com reatores incorporados e que as LFCs com reatores separados (não integrados) são utilizadas apenas em aplicações específicas, este trabalho teve seu foco direcionado para as primeiras. Portanto, tanto na etapa de medição quanto na etapa de modelagem, as LFCs foram tratadas como um elemento único (reatores mais tubos de descargas).

Também serão apresentados alguns resultados de medições em campo realizadas em Itajubá e na Light-Rio.

### **IV.2. DESCRIÇÃO DA BANCADA AUXILIAR DE MEDIÇÃO E DEMAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

#### **IV.2.1. – BANCADA AUXILIAR DE MEDIÇÃO**

Trata-se de um sistema simples que disponibiliza um circuito trifásico a quatro fios em baixa tensão, para alimentação de LFCs e de outras cargas lineares e não lineares.

O acesso aos terminais de alimentação foi viabilizado pela utilização de bornes tipo Joto, através dos quais podem ser inseridas as bobinas de potencial e de corrente do equipamento utilizado, como mostra a Figura IV.1. A bancada permite uma combinação de até 8 lâmpadas por fase, associadas ou não a outras cargas, lineares e/ou não lineares, que podem ser ligadas através das tomadas instaladas.

A alimentação elétrica da bancada é feita diretamente pela rede local (Cemig) através de um transformador delta – estrela 13,8/0,220 kV. Opcionalmente esta alimentação pode ser realizada através de uma fonte de tensão estabilizada (PACIFIC POWER) que fornece uma tensão senoidal quase pura (distorção de tensão em torno de 0,15%) ou, mediante ajustes desta fonte, tensões distorcidas com valores previamente definidos.

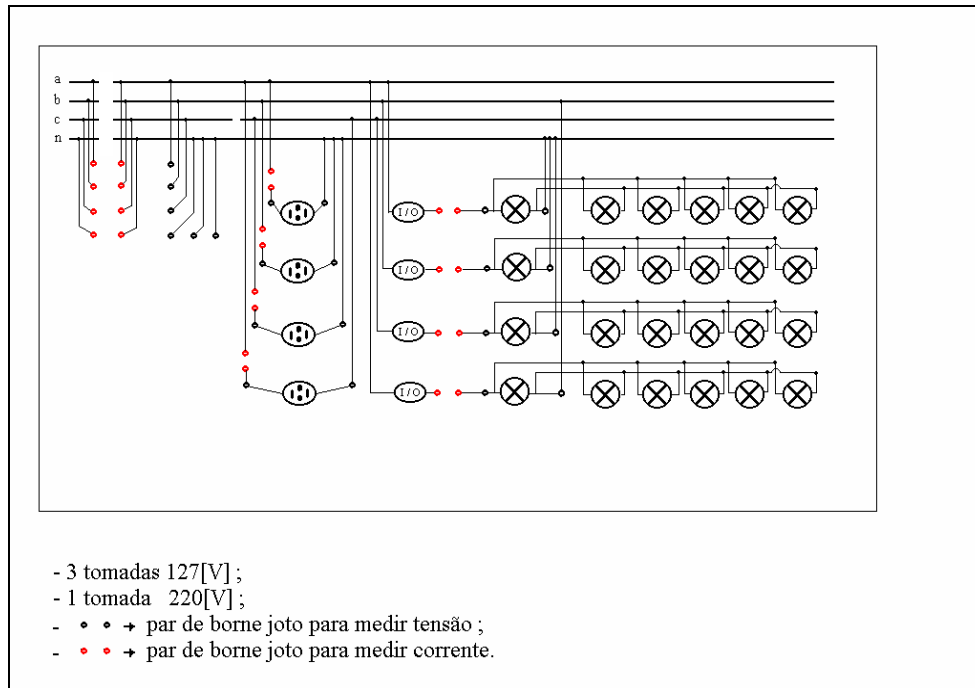


Figura IV.1 – Instalação Elétrica da Bancada Auxiliar de Medição

A Figura IV.2 representa o esquema de conexão dos instrumentos de medição utilizados para o levantamento das características elétricas das LFCs e dos outros equipamentos.

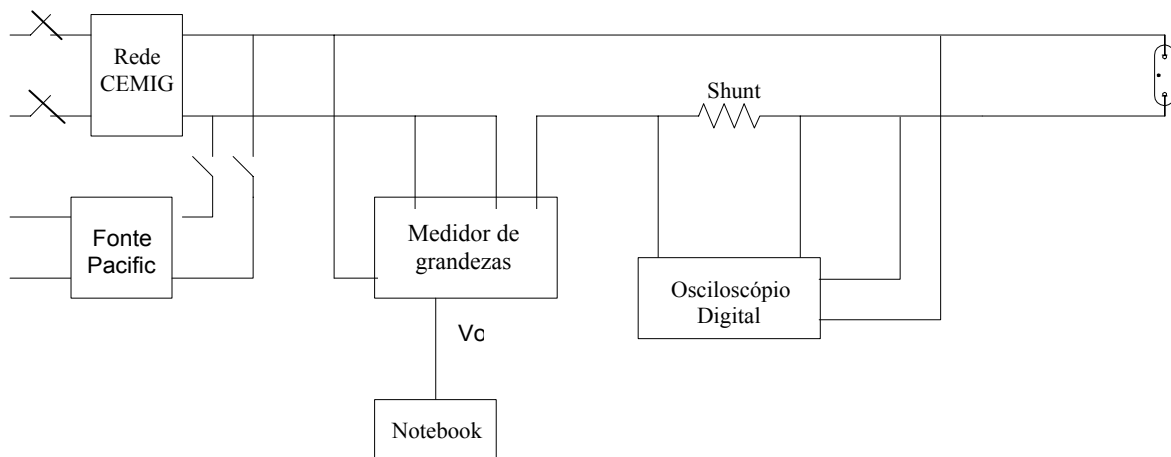


Figura IV.2 – Diagrama de conexão dos equipamentos para medições

A seguir são apresentadas três fotos da bancada auxiliar para medição de grandezas elétricas das cargas, destacando-se o seu aspecto construtivo, bem como alguns dos equipamentos de medição (*notebook*, medidor Voltech, medidor RMS, fonte de tensão Pacific Power, etc.).



Figura IV.3 – Bancada auxiliar de medição

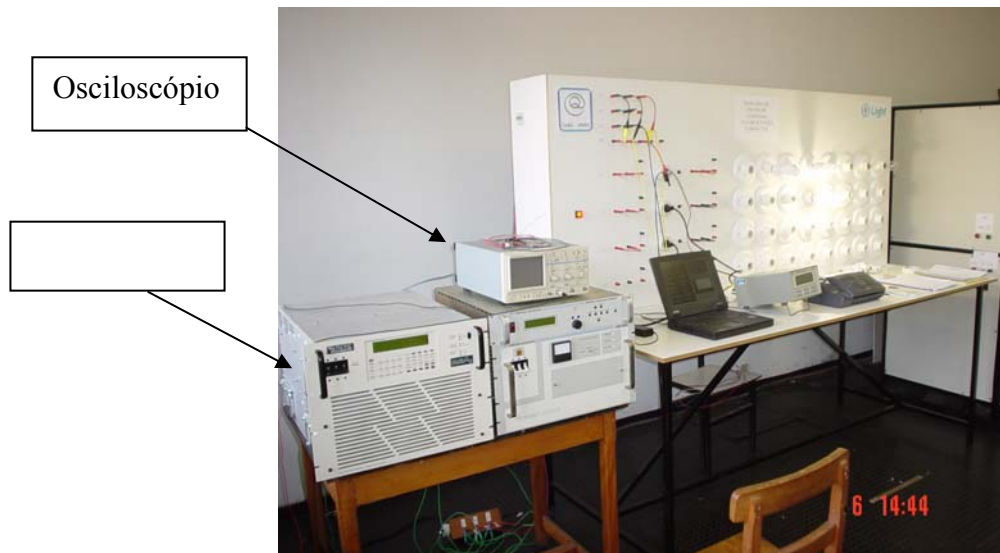


Figura IV.4 - Bancada auxiliar com vista da fonte Pacific Power e outros instrumentos de medição.



Figura IV.5 – Medidor PM300 da Voltech e Medidor Marh-21 992 da RMS

Para a obtenção das grandezas requeridas, foram utilizados quatro equipamentos de medição que serão descritos nos itens a seguir.

### **IV.2.2. MEDIDOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS/MEDIDOR DE HARMÔNICOS**

Fabricante: Voltech Instruments Ltda.

Modelo: PM300

Nº de série: 4061

Procedência: Inglaterra

Tensões de operação: 110/220 VAC

Número de canais: 6 sendo 3 canais de corrente e 3 de tensão (CH1, CH2 e CH3)

Potência máxima de consumo: 25 VA

O equipamento PM300 permite a obtenção simultânea das seguintes grandezas elétricas:

- Valores eficazes das componentes fundamentais das tensões;
- Valores eficazes das componentes fundamentais das correntes;
- Valores eficazes verdadeiros (*true rms*) das tensões e das correntes;
- Potências ativa ( $P$ ), não ativa de deslocamento ( $Q$ ) e aparente ( $S$ );
- Fator de potência verdadeiro e fator de deslocamento (II.3.1);
- Harmônicos individuais de corrente e de tensão até 50ª ordem, em módulo e ângulo de fase;
- Distorção harmônica total de corrente e tensão ( $DHT_i$  e  $DHT_v$ );
- Frequência;

Além das grandezas citadas, o equipamento disponibiliza os espectros harmônicos de tensão e de corrente e os valores dos componentes harmônicos (amplitude e ângulo de fase) de tensão e de corrente. Os dados podem ser exportados em formato ASCII para um microcomputador e armazenados em arquivo texto para posterior manipulação.

Para o tratamento dos dados e exportação destes através de porta serial RS232, o equipamento possui um software próprio, denominado *VPAS Lite*.

### **IV.2.3. REGISTRADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS MARH-21 992 DA RMS**

É um registrador que permite o acompanhamento das tensões, correntes, potência ativa, não ativa de deslocamento e aparente, fator de potência e de deslocamento, distorção harmônica total de tensão e de corrente e harmônicos individuais. Permite ainda visualizar

e salvar as formas de ondas das tensões e das correntes, tanto em modo *on-line* como *off-line*.

As tensões e correntes de cada fase são amostradas continuamente. A cada período de tempo programado (intervalo de integração ou intervalo de registro em memória de massa), os valores médios “*true rms*” das grandezas, consideradas todas as amostras obtidas no intervalo, são calculados e registrados em memória. Desta forma, para cada período de integração será obtido um único valor numérico (médio rms) para cada grandeza. Os períodos de integração podem ser programados desde 100 milissegundos a 60 segundos. Para as grandezas elétricas, a taxa de amostragem é de 64 amostras por ciclo.

Para a captação da forma de onda é utilizada uma janela de 2 ciclos, a cada intervalo programado. Todas as amostras lidas em cada janela de dois ciclos são registradas para reproduzir, via software ANAWIN, a forma de onda dos sinais. A amostragem de sinal monofásico utiliza 128 amostras por ciclo e de sinal trifásico, 64 amostras por ciclo.

Fabricante: RMS Indústria de Equipamentos Eletrônicos Ltda.

Procedência: Rio Grande do Sul – Brasil.

Modelo: MARH 21 992.

Tensão de alimentação: 65 a 600 Vac ou 11 a 60 Vcc.

Consumo: 2,5 a 8,0 VA.

Medição: 3 canais de tensão, 0 a 600 Vac direto ou via TPs; 3 canais de corrente 0 a 11 Aac direto ou via TCs e entradas separadas para alicates.

Medição de harmônicos até 25<sup>a</sup> (3 fases) ou 61<sup>a</sup> (1 fase).

Apresentação de gráfico e espectro harmônico na tela do computador.

Gravação de arquivos em formato público ASCII.

Programação pelo PC, via RS232 ou direto pelo teclado do registrador.

Para o tratamento dos dados e exportação destes através de porta serial RS232, o equipamento possui um software próprio, denominado *ANAWIN*.

#### **IV.2.4. FONTE DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL (PACIFIC)**

Fonte de Potência AC da divisão *Pacific Power Source*.

Fabricante: Thermo Voltek Corporation - Califórnia – EUA.

Modelo: 345 – AMX

Tensões de operação: 208 Vac (+/- 10%), 47-63 Hz à 270/480 Vac (+/- 10%), 47-63Hz.

Tensão de saída: 0 – 135 Vac (fase-neutro).

Potência máxima de saída: 4,5 KVA.

Corrente de saída: 1Ø - 36[A] - 3Ø - 12[A].

Este equipamento é uma fonte de tensão, com controle de frequência, permitindo operação monofásica ou trifásica equilibrada ou desequilibrada e simétrica ou assimétrica. No caso de geração de uma onda senoidal, sua distorção harmônica da tensão de saída é menor que 0,25 % para uma faixa de frequência de 20 a 5000 Hz. Esta fonte também tem a capacidade de gerar tensões distorcidas através de programação dos componentes harmônicos (módulo e ângulo), bem como ondas do tipo triangular, dente de serra, quadrada, etc.

Assim, através desta fonte, foi possível alimentar as LFCs/outras cargas com tensão senoidal quase pura ou com tensões distorcidas programáveis, possibilitando a análise do comportamento das cargas não-lineares quando alimentadas por sinais de tensão mal comportados.

### **IV.2.5. ALICATE-AMPERÍMETRO E MULTÍMETRO**

Fabricante: Minipa

Modelo: ET-3200A

Corrente máxima: 1000[A]

Tensão máxima (AC): 750[V]

Tensão máxima (DC): 5000[V]

Resistência máxima: 2000 [Kohm]

O alicate-amperímetro foi utilizado como instrumento auxiliar na conferência das tensões quando das montagens de circuitos.

### **IV.2.6. OSCILOSCÓPIO DIGITAL**

Fabricante: Agilent

Modelo: 54621 A, digital com 2 canais, com *drive* de saída 31/2”

Tensão de entrada: 120/240 Vac

Potência: 120 [W]

Frequência: 47- 440 [Hz]

O osciloscópio foi utilizado para a visualização das formas de onda das tensões de alimentação da rede ou da fonte Pacific, bem como para a visualização e a impressão das formas de onda das correntes das LFCs e de outras cargas não-lineares, in loco.

### IV.3. ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO

Nas medições efetuadas em laboratório, levou-se em consideração várias combinações de LFCs de diversos fabricantes, potências e cores da fonte de luz, conforme apresentado Tabela IV.1

Tabela IV.1– LFCs utilizadas nas medições

Fabricante	Potência [W]	Temperatura [K]	Nº de Lâmpadas
GE	15/20	4100/2700	18
Osram	23	4000	3
Philips	15/20	6500	8
FLC	20/25	2700/6400	10
Taschibra	20	6400	1
Empalux	15/20	2700/6400	12

Porém, antes que qualquer medição fosse efetuada, a LFC em teste permanecia ligada durante 5 minutos. Tal procedimento era adotado tendo em vista questões de estabilização de suas características termoeletrônicas.

Um outro fator importante verificado no início das medições era o nível de distorção da tensão da rede.

Sabe-se que a distorção da tensão de alimentação de uma carga não linear terá influência direta nas distorções de corrente. Esta dinâmica ainda é pouco compreendida e tem sido tema de pesquisas [Gr95].

Em um levantamento realizado em laboratório, utilizando-se a fonte Pacific Power, obteve-se o “retrato” das variações das distorções harmônicas de corrente para diferentes valores de distorção de tensão. O resultado desse levantamento para uma LFC marca FLC 20 W está apresentado na Figura IV.6. Pode-se observar que a  $DHT_i$  e as distorções harmônicas individuais ( $DH_{i(h)}$  conforme item II.2.2) aumentam com o aumento da  $DHT_v$ .

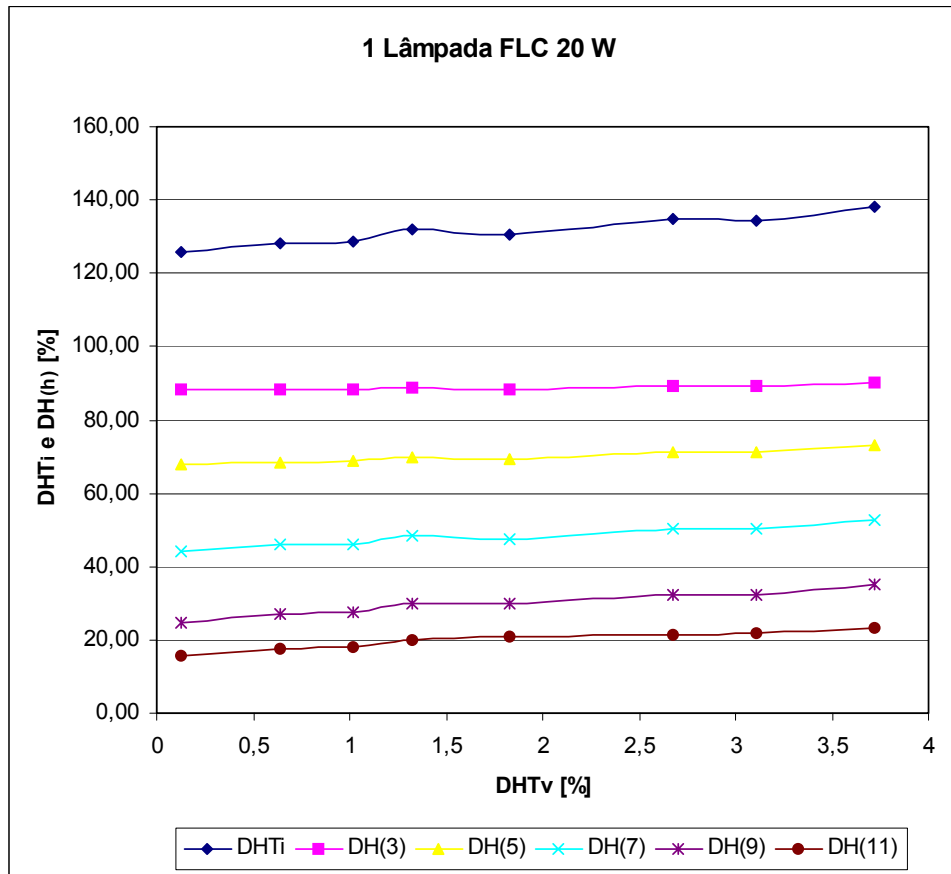


Figura IV.6 – Variação do DHTi com o DHTv de uma LFC FLC 20 W

Certamente outros fatores podem influenciar nas características da corrente absorvida por cargas não lineares tais como:

- A forma de onda do sinal de alimentação, principalmente no que diz respeito ao fator de crista (valor de pico dividido pelo valor eficaz da onda) e aos ângulos de fase dos harmônicos contidos na tensão.
- A diversidade dos ângulos de fase dos harmônicos de corrente gerados pelas cargas.

W.M. Grady refere-se, em diversos trabalhos [Gr02, Gr95, Gr94, Gr98], às atenuações e cancelamentos de harmônicos em função da combinação destes fatores, dentre outros.

Uma vez que os procedimentos iniciais eram executados, iniciava-se a seqüência de medições das grandezas elétricas das LFCs, quais sejam: correntes, tensões, potências, fator de potência, fator de deslocamento e distorções harmônicas.



Cabe mencionar que cada LFC era trabalhada separadamente, considerando a marca, a potência, a cor e a tensão nominal. Desse modo, constituiu-se um banco de dados das diversas LFCs estudadas.

Um segundo banco de dados foi formado contendo resultados de diversas associações de LFCs, tais como:

- LFCs de mesmo fabricante e mesma potência.
- LFCs de diferentes fabricantes e potências.
- LFCs associadas à lâmpadas incandescentes.

Dados de medições elétricas de diversas outras cargas de uso doméstico formaram um terceiro banco de dados. Neste aparecem LFTs, ar condicionado, geladeira, máquina de lavar, TVs, aparelhos de som, computadores, etc.

Com intuito de simular algo semelhante a uma carga residencial, distribuiu-se, nessa etapa das medições, as lâmpadas no sistema trifásico da bancada, avaliando-se somente as LFCs, bem como associando-as a outras cargas não lineares como TV, aparelho de som, computador, fax, etc...e a cargas lineares, tais como lâmpadas incandescentes e ferro elétrico. Para fins comparativos, estas cargas foram distribuídas nas fases, ora de forma equilibrada, ora de forma desequilibrada.

Todas as medições foram efetuadas em temperatura ambiente, a qual variou entre 20 e 25 graus Celsius.

#### IV.4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

A fim de se compreender melhor o conjunto de dados resultante das medições executadas em laboratório, alguns exemplos serão apresentados. Estes consistirão de valores numéricos de grandezas elétricas e de formas de onda (tensão e corrente) com seus respectivos harmônicos. Serão apresentados comentários relativos aos dados obtidos.

##### IV.4.1. RESULTADO DA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UMA LFC MARCA OSRAM, POTÊNCIA 23 W E TENSÃO DE 127 V

Cada arquivo texto obtido com o medidor PM300 apresenta um conjunto de grandezas elétricas e todos os valores de amplitude e de fase dos harmônicos de tensão e de corrente até 49ª ordem. Um exemplo com dados de uma LFC Osram, 23 W, 127 V é apresentado a seguir através de tabelas, sendo que a Figura IV.7 fornece as formas de onda da tensão e da corrente e a Figura IV.8, os espectros de amplitude e de fase respectivamente.

Tabela IV.2 – Harmônicos de tensão de uma LFC Osram 23 W

Harmônicos de tensão							
Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo	Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo
VHdc	-152.6m			VH25	50.97 m	0.0398	-225.0
VH 1	127.95	100.000	0.0	VH26	17.069m	0.0133	-225.0
VH 2	57.01 m	0.0446	-270.0	VH27	60.63 m	0.0474	0.0
VH 3	456.2 m	0.3565	-268.6	VH28	0.000 n	0.0000	0.0
VH 4	0.000 n	0.0000	0.0	VH29	24.47 m	0.0191	-90.0
VH 5	3.676	2.8730	-143.6	VH30	0.000 n	0.0000	0.0
VH 6	0.000 n	0.0000	0.0	VH31	34.99 m	0.0273	-225.0
VH 7	83.33 m	0.0651	-106.0	VH32	12.437m	0.0097	0.0
VH 8	25.62 m	0.0200	-333.4	VH33	27.96 m	0.0219	-26.6
VH 9	58.48 m	0.0457	-11.3	VH34	12.582m	0.0098	-90.0
VH10	0.000 n	0.0000	0.0	VH35	0.000 n	0.0000	0.0
VH11	34.54 m	0.0270	0.0	VH36	12.738m	0.0100	0.0
VH12	11.535m	0.0090	-180.0	VH37	18.125m	0.0142	-225.0
VH13	134.78m	0.1053	-329.0	VH38	12.905m	0.0101	-270.0
VH14	16.376m	0.0128	-315.0	VH39	18.376m	0.0144	-45.0
VH15	92.91 m	0.0726	0.0	VH40	13.083m	0.0102	-90.0
VH16	0.000 n	0.0000	0.0	VH41	0.000 n	0.0000	0.0
VH17	66.07 m	0.0516	-45.0	VH42	18.770m	0.0147	-45.0
VH18	11.714m	0.0092	-270.0	VH43	18.912m	0.0148	-225.0
VH19	0.000 n	0.0000	0.0	VH44	13.484m	0.0105	0.0
VH20	0.000 n	0.0000	0.0	VH45	27.17 m	0.0212	-90.0
VH21	71.93 m	0.0562	-9.5	VH46	0.000 n	0.0000	0.0
VH22	0.000 n	0.0000	0.0	VH47	13.818m	0.0108	-180.0
VH23	47.66 m	0.0372	-90.0	VH48	0.000 n	0.0000	0.0
VH24	0.000 n	0.0000	0.0	VH49	0.000 n	0.0000	0.0

Obs.: A letra “m” significa milivolt, “u” significa microvolt e “n” significa nanovolt. Foram assim mantidos por ser a forma como são apresentados pelo equipamento de medição.

Tabela IV.3 - Parâmetros de uma LFC Osram 23 W

Parâmetros	Canal 1	Parâmetros	Canal 1
Watts(RMS)	25.48	Amps(RMS)	345.7 m
Watts(Fund.)	25.95	Amps(Fund.)	208.6 m
VA(RMS)	44.25	PowerFactor	0.576
VA(Fund.)	26.69	Cos Phi(Phase)	0.972
VAr(RMS)	36.17	Volts DHT	2.899%
VAr(Fund.)	-6.240	Amps DHT	132.72%
Volts(RMS)	128.00	Frequency	59.96
Volts(Fund.)	127.95		

Tabela IV.4 – Harmônicos de corrente de uma LFC Osram 23 W

Harmônicos de corrente							
Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo	Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo
AHdc	271.9 u			AH25	28.68 m	13.7488	-120.1
AH 1	208.6 m	100.000	-346.5	AH26	1.0982m	0.5265	-240.3
AH 2	128.68u	0.0617	-90.0	AH27	23.91 m	11.4621	-248.9
AH 3	182.29m	87.3873	-138.8	AH28	824.8 u	0.3954	0.0
AH 4	288.0 u	0.1381	-206.6	AH29	20.57 m	9.8610	-13.2
AH 5	137.28m	65.8102	-288.6	AH30	878.2 u	0.4210	-108.4
AH 6	516.2 u	0.2475	0.0	AH31	18.841m	9.0321	-140.4
AH 7	85.99 m	41.2224	-71.7	AH32	1.5183m	0.7279	-236.3
AH 8	466.2 u	0.2235	-146.3	AH33	16.653m	7.9832	-270.5
AH 9	46.43 m	22.2579	-194.0	AH34	1.9314m	0.9259	-17.1
AH10	788.8 u	0.3781	-279.5	AH35	13.190m	6.3231	-39.7
AH11	40.11 m	19.2282	-293.1	AH36	2.058 m	0.9866	-167.9
AH12	791.9 u	0.3796	-80.5	AH37	10.200m	4.8897	-161.8
AH13	48.62 m	23.3078	-56.3	AH38	1.7779m	0.8523	-305.0
AH14	653.5 u	0.3133	-216.9	AH39	9.210 m	4.4151	-279.2
AH15	49.56 m	23.7584	-191.1	AH40	1.0441m	0.5005	-81.9
AH16	394.3 u	0.1890	0.0	AH41	8.726 m	4.1831	-44.3
AH17	43.38 m	20.7958	-324.5	AH42	1.0485m	0.5026	-180.0
AH18	186.96u	0.0896	-45.0	AH43	7.570 m	3.6290	-175.4
AH19	37.40 m	17.9291	-91.6	AH44	1.5668m	0.7511	-299.1
AH20	678.6 u	0.3253	-168.7	AH45	5.898 m	2.8274	-297.9
AH21	34.73 m	16.6491	-217.7	AH46	1.8613m	0.8923	-85.2
AH22	1.1367m	0.5449	-315.0	AH47	5.061 m	2.4262	-56.3
AH23	32.80 m	15.7239	-348.4	AH48	1.7800m	0.8533	-225.0
AH24	1.3576m	0.6508	-95.7	AH49	4.923 m	2.3600	-178.2

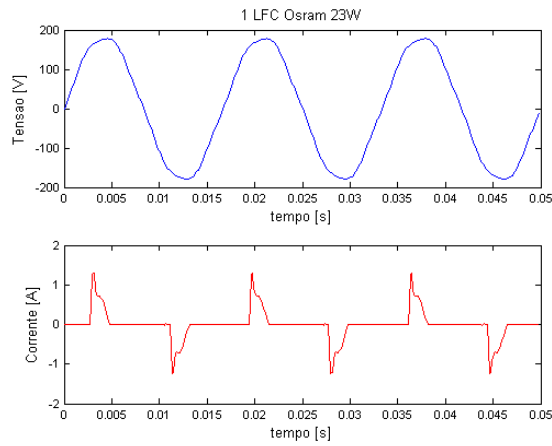


Figura IV.7 – Formas de onda da tensão e da corrente – LFC Osram 23 W.

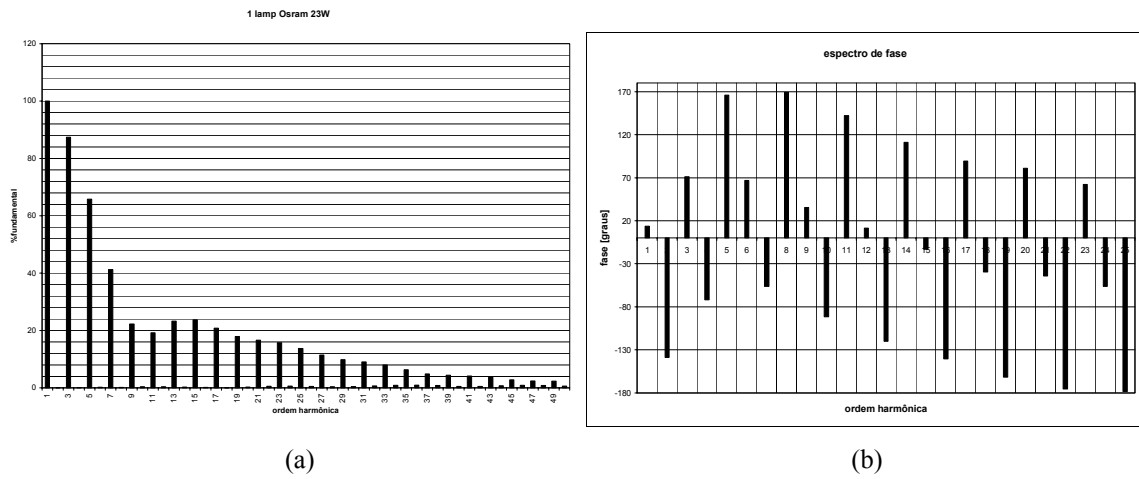


Figura IV.8 – Corrente da LFC Osram 23 W (a) espectro de amplitude (b) espectro de fase

Para as demais LFCs trabalhadas, os resultados são similares, porém variações nas distorções harmônicas irão existir. Para efeitos comparativos, a Tabela IV.5 apresenta os valores médios de  $DHT_i$  e fator de potência verdadeiro para um conjunto de LFCs analisadas.

Tabela IV.5 –  $DHT_i$  e FP das LFCs utilizadas

Fabricante	Potência (W)	$DHT_i$	FP
Osram	23	132,20	0,583
FLC 220 V	25	168,27	0,498
GE 2700 K	15	138,48	0,585
Philips	15	116,79	0,597
Philips	20	130,41	0,564
FLC	25	111,75	0,635
GE	20	123,24	0,592
Empalux	15	102,29	0,623
Empalux	20	126,42	0,575
GE 4100 K	15	122,24	0,584

Pelos resultados apresentados da LFC Osram 23 W, observa-se que para uma potência ativa de 25,48 W, a LFC exige da rede uma potência aparente de 44,25 VA. Apesar da corrente fundamental ser 208,6 mA, a corrente total exigida da rede é de 345,7 mA, caracterizando a forte não linearidade das LFCs e, conseqüentemente, o forte conteúdo harmônico ( $DHT_i$  de 132,7%). Por esta razão, o fator de deslocamento é de 0,972 enquanto que o fator de potência verdadeiro é de 0,572.

Quanto aos harmônicos, os de ordem ímpar são os predominantes, sendo os harmônicos pares desprezíveis. O 3º harmônico fica em torno de 75% a 85% da componente fundamental, sendo que seus múltiplos ímpares (9º, 15º, 21º), também estarão presentes de forma significativa no espectro de amplitude. Estes harmônicos de seqüência zero (3º, 9º, 15º, 21º,...), também denominados homopolares, somar-se-ão no ponto neutro da carga (Y) e terão grande influência na corrente de neutro.

Quanto à tensão de alimentação do laboratório da Universidade, a mesma apresenta uma oscilação na  $DHT_v$  ao longo do dia. Este valor tem variado de 2,5% a 4,3%. Como esperado, a tensão de alimentação apresenta uma predominância do 5º harmônico.

**IV.4.2. FORMAS DE ONDA E ESPECTRO HARMÔNICO DE ASSOCIAÇÕES DE LFCs DE MESMA MARCA**

Como já mencionado, procurou-se comparar as formas de onda de corrente e os respectivos espectros harmônicos de LFCs de mesma marca, associando-as gradativamente desde 2 lâmpadas até um total de 6. Percebeu-se que não houve variações substanciais, a menos obviamente dos valores absolutos das correntes que se somam e alguns componentes harmônicos com valores percentuais alterados. A atenuação dos harmônicos de maior ordem (acima do 15º) foi verificada.

Deve-se levar em consideração que as LFCs não são perfeitamente iguais e, portanto, suas componentes harmônicas apresentam pequenas variações em módulo e ângulo. Assim, quando associadas, a forma de onda resultante se apresentará com alterações nas componentes harmônicas.

A Figura IV.9 e a Figura IV.10 ilustram as diferenças ocorridas entre uma LFC e a associação de 6 LFCs marca GE 15 W.

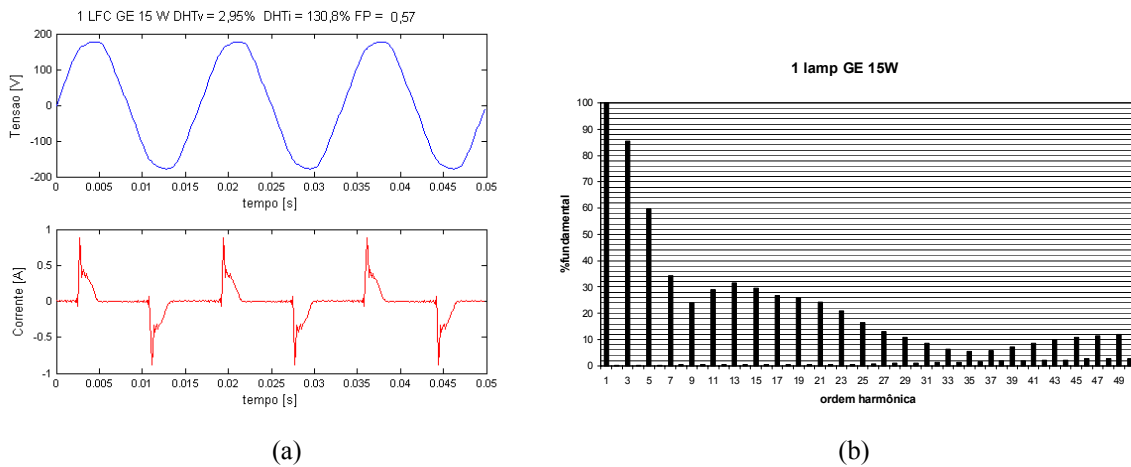


Figura IV.9 – 01 LFC GE 15 W - (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude

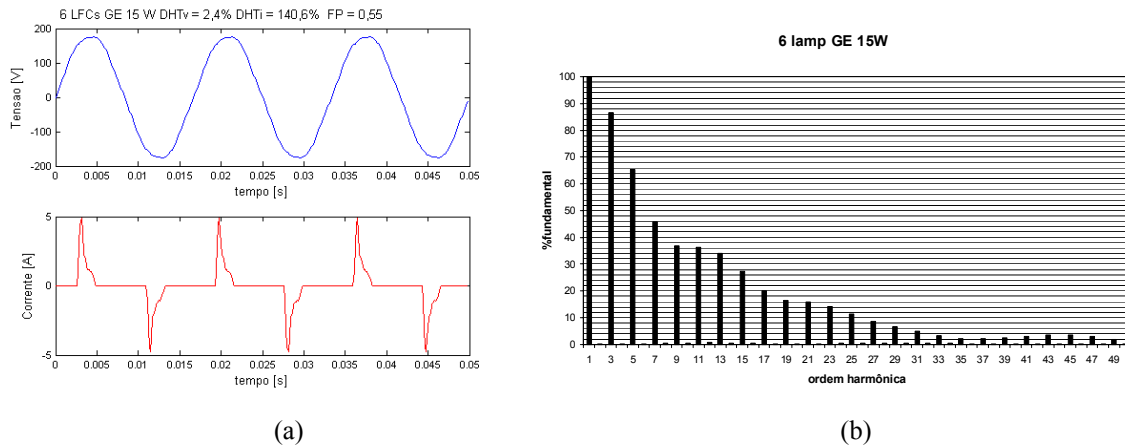


Figura IV.10 – 06 LFCs GE 15 W - (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude

### IV.4.3. ASSOCIAÇÕES DE LFCs DE DIFERENTES MARCAS

A associação de LFCs de diferentes marcas é uma ocorrência comum nas residências, bem como em estabelecimentos comerciais. Sendo assim, procurou-se analisar, através de medições, os sinais resultantes deste tipo de associação.

Dentre diversas associações efetuadas, alterando-se a quantidade, marcas e potências de LFCs, apresentamos, como exemplo, os resultados da associação em que foram ligadas a uma mesma fase as seguintes LFCs: 2 Osram 23 W, 1 GE 20 W, 1 Philips 20 W, 1 FLC 20 W, 1 Empalux 20 W e 1 Tashibra 20 W.

Os valores de  $DHT_i$  e fator de potência verdadeiro encontrados nesta associação foram de 122,6% e 0,59, respectivamente. A Figura IV.11 ilustra o comportamento da corrente.

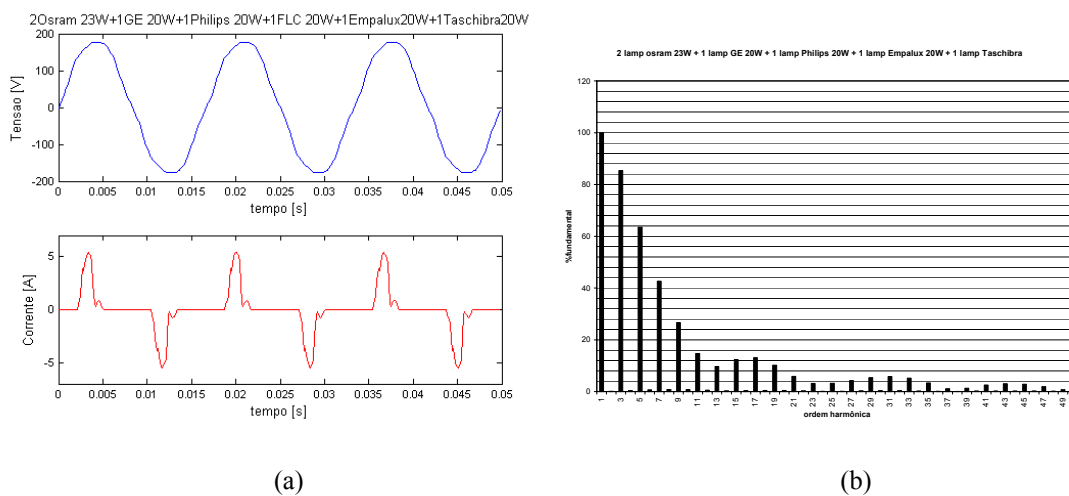


Figura IV.11 – 07 LFCs diferentes – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude

Pode-se observar um comportamento semelhante às LFCs individuais, porém, com uma forma de onda mais arredondada, sendo a  $DHT_i$  da associação menor que a  $DHT_i$  das LFCs medidas individualmente. Conclui-se que, na composição final das harmônicas existe uma atenuação dos componentes, principalmente aqueles de maior ordem (acima da 9ª). Em outras palavras o cancelamento e atenuação dos harmônicos é mais acentuado na associação de LFCs de diferentes marcas do que na associação de LFCs de um mesmo fabricante.

#### IV.4.4. FORMAS DE ONDA E ESPECTRO HARMÔNICO DE LFCs ASSOCIADAS A LIs (LÂMPADAS INCANDESCENTES)

Uma outra ocorrência constante nas residências é a associação de LFCs com lâmpadas incandescentes (LIs). Esta prática é até incentivada, pois as LFCs não são muito aconselhadas em locais onde há uma grande quantidade de acendimentos/desligamentos. Tal procedimento reduz a vida útil da LFC [Du01]. Para fins comparativos, mostra-se a seguir as formas de onda e espectro de amplitude de 3 (três) LFCs marca FLC 20 W e estas associadas a uma LI de 100 W.

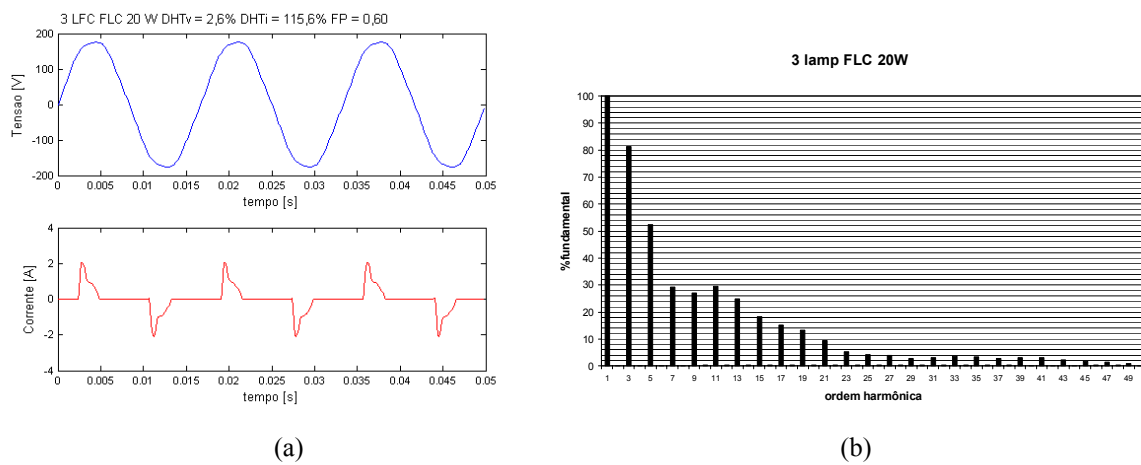


Figura IV.12 – 03 LFCs FLC 20 W – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude



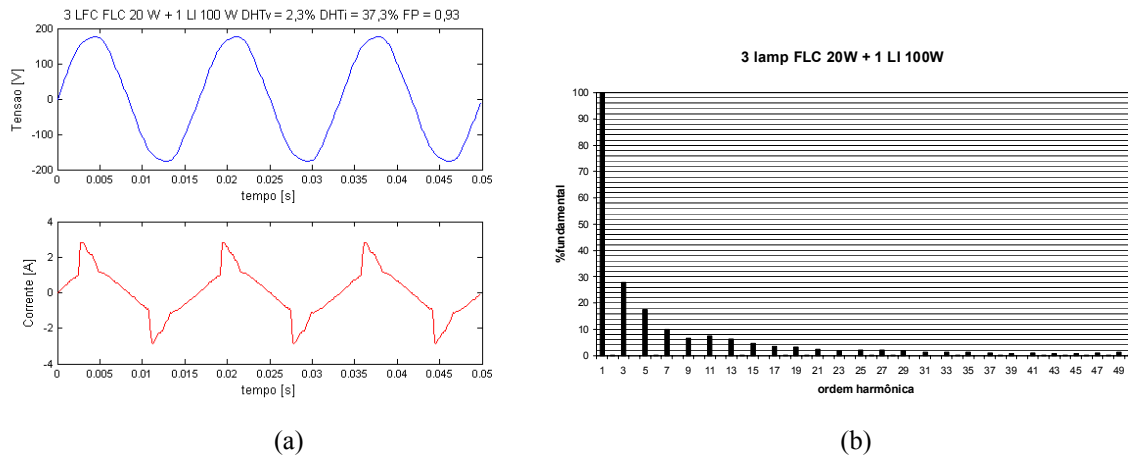


Figura IV.13 – 03 FLC 20 W + 1 LI 100 W – (a) formas de onda da tensão e da corrente (b) espectro de amplitude

Pode-se observar que a associação das 3 LFCs FLC 20 W com uma lâmpada incandescente (LI) de 100 W resulta em uma redução significativa da distorção harmônica total de corrente, que foi de 115,6% para 37,3%, elevando o fator de potência de 0,60 para 0,93. A forma de onda se torna mais arredondada, aproximando-se de uma senóide. Este é o efeito que ocorre quando se associam cargas lineares à cargas não lineares. Quanto maior a potência das cargas lineares, menor a  $DHT_i$  e maior o fator de potência verdadeiro.

#### IV.4.5. FORMAS DE ONDAS E ESPECTROS HARMÔNICOS DE OUTRAS CARGAS NÃO LINEARES

Conforme mencionado na seção III.3, foi necessário o levantamento das características elétricas de diferentes eletroeletrônicos, estando os dados relativos a este levantamento armazenados em um banco de dados.

As formas de onda de corrente com as respectivas decomposições harmônicas, a taxa de distorção ( $DHT_i$ ) e o fator de potência foram obtidos em laboratório, sendo tais cargas alimentadas com tensões cujas características eram as mais próximas da realidade, ou seja, tensões com  $DHT_v$  na faixa de 2% a 4,5%.

Para fins ilustrativos apresentar-se-á na seqüência um conjunto de gráficos que ilustram as formas de onda típicas e espectros harmônicos de alguns eletroeletrônicos, muitos dos quais serão utilizados posteriormente nas simulações.

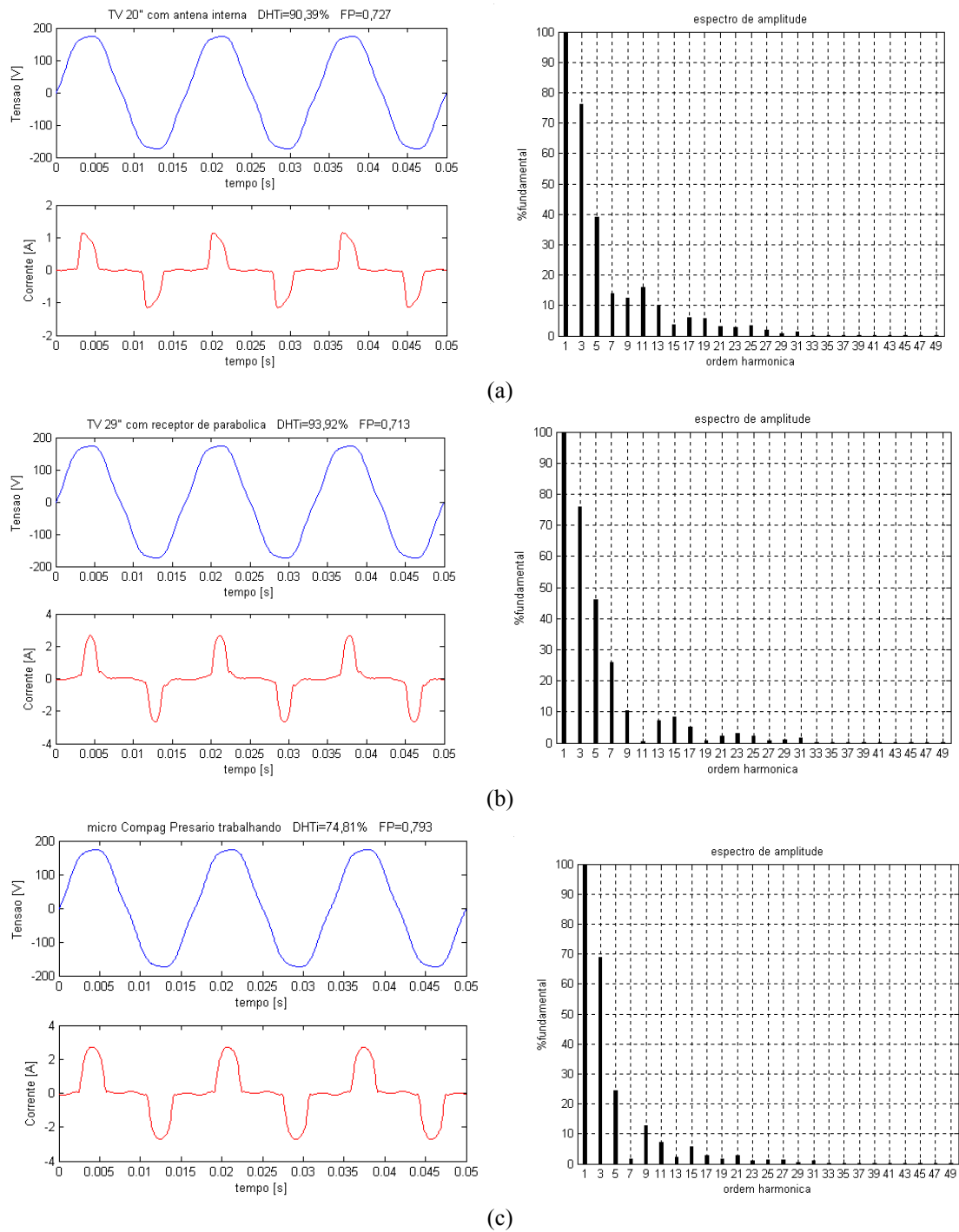
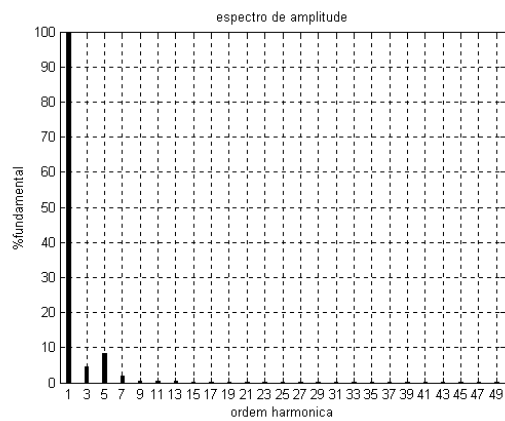
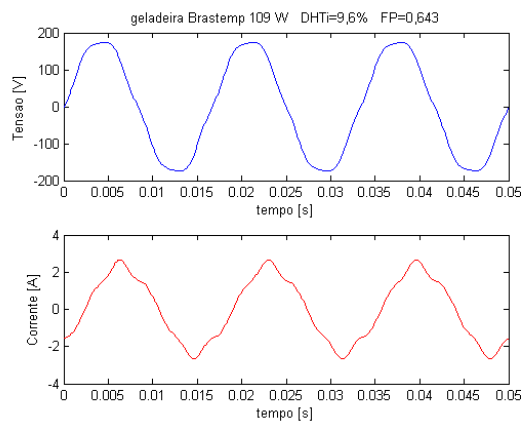
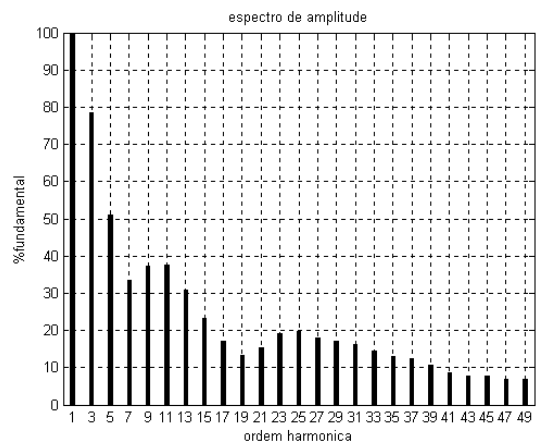
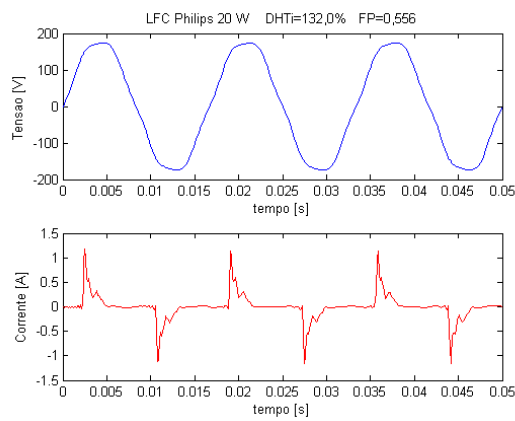


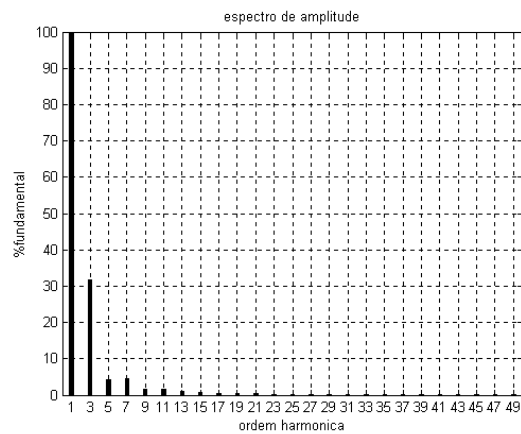
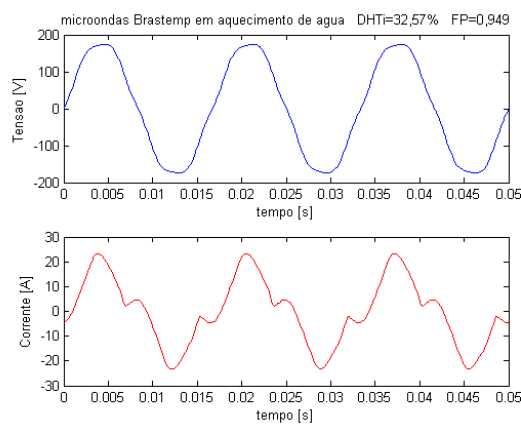
Figura IV.14 – Formas de onda e espectros harmônicos – (a) TV 20" (b) TV 29" (c) microcomputador



(a)

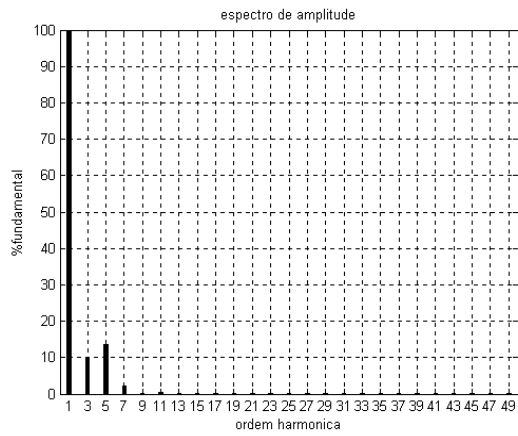
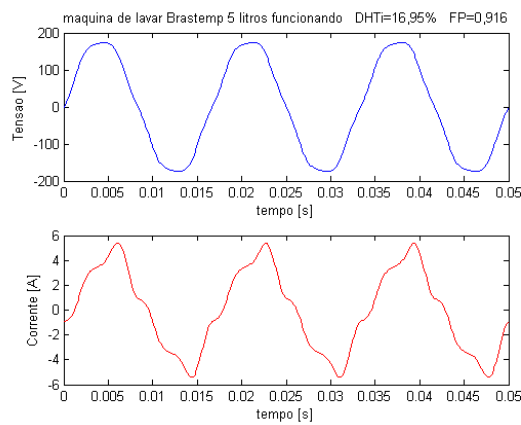


(b)

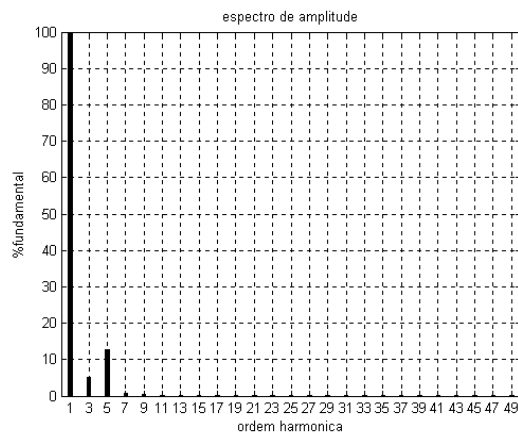
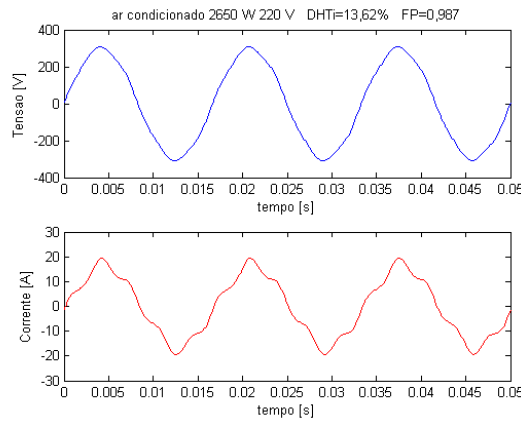


(c)

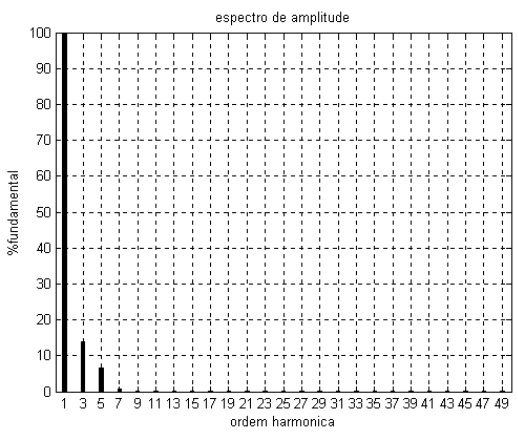
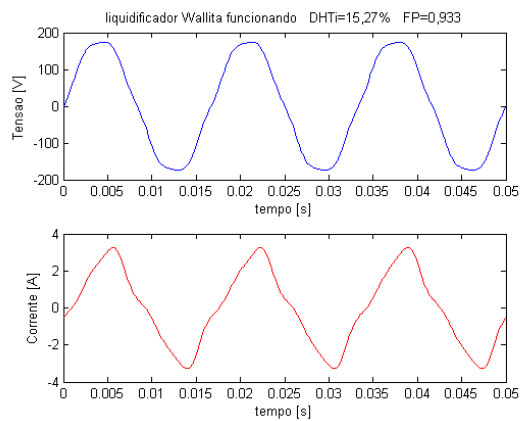
Figura IV.15 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) geladeira (b) LFC (c) microondas



(a)

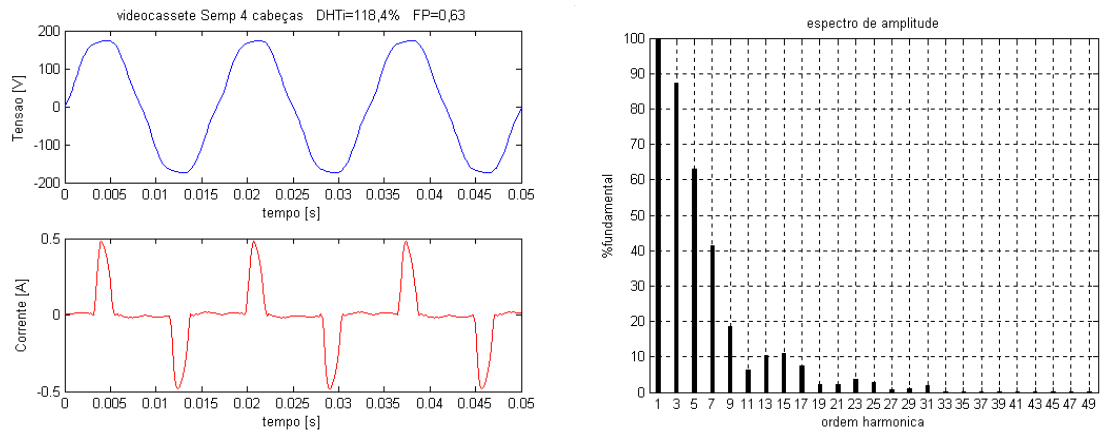


(b)

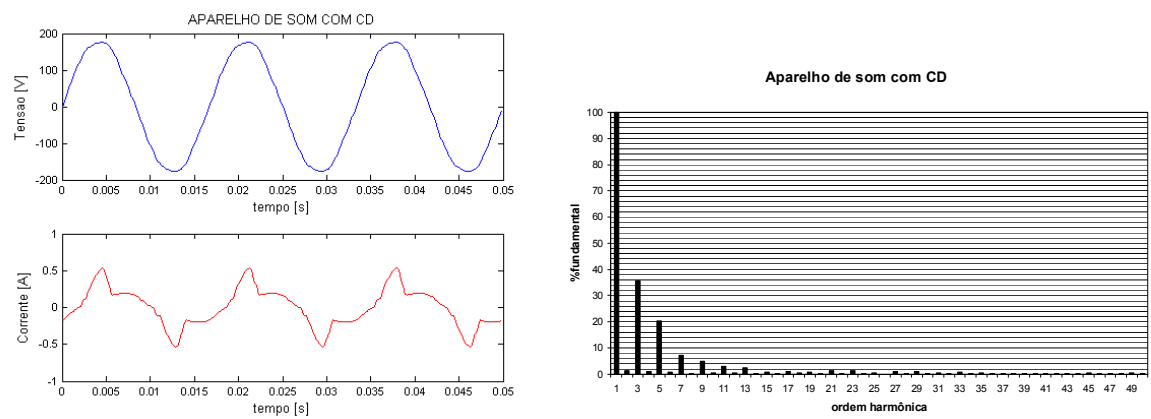


(c)

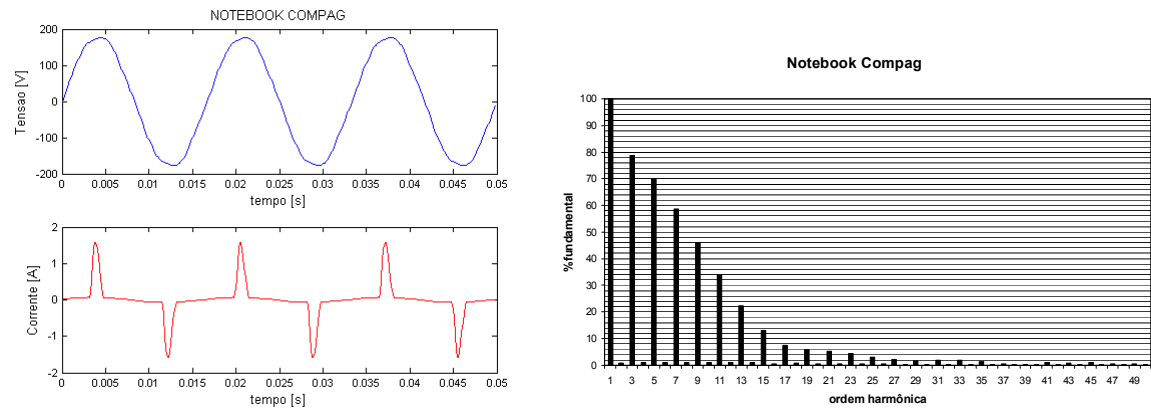
Figura IV.16 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) máquina de lavar (b) ar condicionado (c) liquidificador



(a)



(b)



(c)

Figura IV.17 - Formas de onda e espectros harmônicos – (a) videocassete (b) aparelho de som (c) notebook

### IV.4.6. FORMAS DE ONDA DE LFCs ASSOCIADAS A OUTRAS CARGAS NÃO LINEARES

Com a disseminação dos equipamentos eletroeletrônicos, na maioria alimentados através de fontes chaveadas, torna-se também importante analisar o comportamento conjunto das LFCs a outras cargas não lineares, tais como TVs, computadores, aparelhos de som, lâmpadas fluorescentes tubulares, etc. Cabe ressaltar que este é um dos objetivos desta dissertação.

Para fins ilustrativos, apresenta-se a seguir as formas de onda da tensão e da corrente, bem como o espectro harmônico da associação, em uma única fase, de 4 LFCs da marca FLC 20 W, um aparelho de som (Gradiente) e um *notebook* (Compag).

Os efeitos de tal associação podem ser analisados considerando-se a Tabela IV.6.

Tabela IV.6 - Dados resultantes da associação de cargas não lineares

EQUIPAMENTO	DHT <sub>v</sub> (%)	DHT <sub>i</sub> (%)	FP <sub>v</sub>
AP. SOM	2,100	42,3	0,837
NOTEBOOK	2,207	136,3	0,577
4 LFC FLC 20 W	2,556	112,4	0,630
ASSOCIAÇÃO	2,315	90,6	0,730

Observa-se na Figura IV.18 que a forma de onda da corrente resultante da associação apresenta distorção total intermediária entre as distorções dos equipamentos associados. Este fato se deve, em grande parte, à diversidade dos ângulos de fase dos harmônicos individuais de cada equipamento. Nota-se, por exemplo, uma forte redução do 9º harmônico.

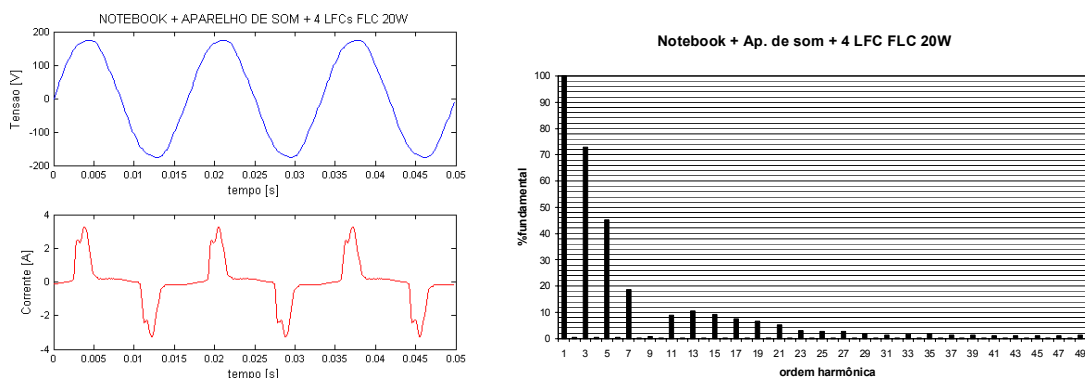


Figura IV.18 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da associação

**IV.4.7. FORMAS DE ONDA DE LFCs DISTRIBUÍDAS DE FORMA DESEQUILIBRADA NO SISTEMA TRIFÁSICO DA BANCADA**

Um dos objetivos desta dissertação é analisar a corrente de neutro resultante do uso de LFCs e outras cargas não lineares distribuídas em uma rede trifásica a 4 fios.

Utilizando-se da bancada auxiliar, diversas medições foram realizadas considerando distribuição equilibrada e desequilibrada das cargas não lineares (LFCs e demais eletroeletrônicos) nas três fases do sistema.

Figura IV.19 mostra as formas de onda de tensão e de corrente em uma situação de desequilíbrio, com diferentes carregamentos de LFCs nas 3 fases. Observa-se a presença da corrente de neutro (linha tracejada) resultado da soma das três correntes de linha.

Os valores eficazes das correntes nas três fases são: fase A – 938,7 mA; fase B – 698,8 mA; fase C – 255,5 mA. O valor eficaz da corrente de neutro é de 1.156 mA. Desta corrente de neutro, apenas 384,9 mA são devidos ao próprio desequilíbrio. A maior contribuição provém das componentes homopolares que se somam no neutro.

A Figura IV.20 apresenta o espectro harmônico das correntes de fase e de neutro onde pode-se observar os altos valores dos harmônicos de ordem 3, que resultam em uma corrente de neutro maior que as correntes de fase.

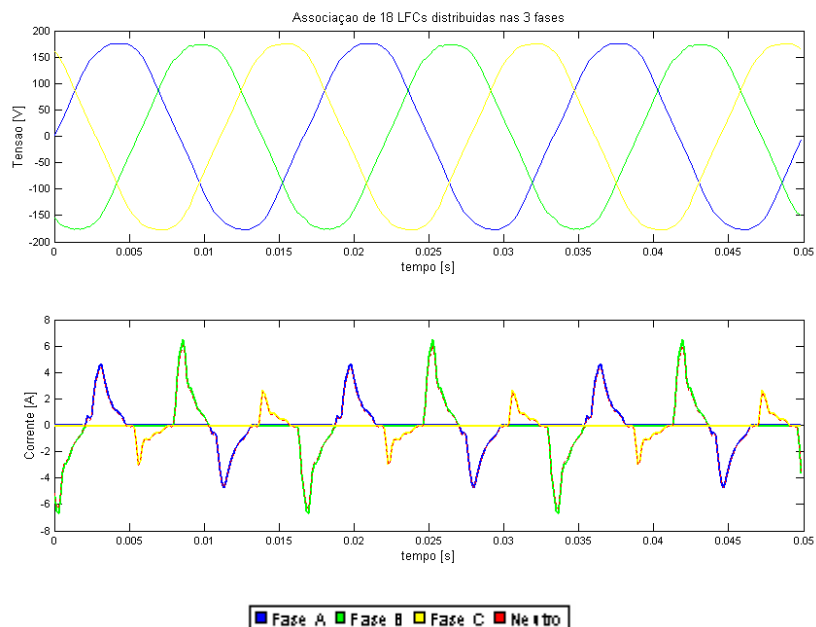


Figura IV.19 – Formas de onda das tensões e das correntes para LFCs diferentemente distribuídas nas três fases do sistema.

Associação de LFCs distribuídas nas fases

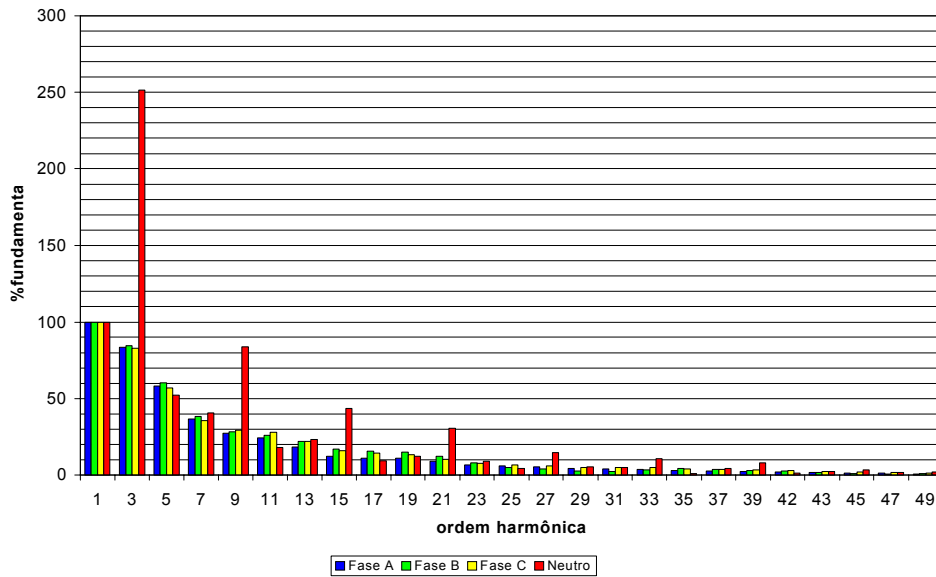


Figura IV.20 – Espectro de amplitude das correntes de LFCs distribuídas desigualmente nas 3 fases

### IV.5. RESULTADOS DE MEDIÇÕES EM CAMPO

Diversas medições foram realizadas em residência de Itajubá e em pontos do sistema Light. Nestas últimas, foram feitas medições simultâneas na entrada de um apartamento, na entrada do condomínio na BT e na subestação alimentadora, no lado de 13,8 kV.

Em medições realizadas diretamente na rede da CEMIG, na baixa tensão (127 V), em uma residência de Itajubá, observou-se ao longo do dia, uma oscilação da  $DHT_v$ , entre 1,5% a 4,5% em fim de semana e entre 1,4% a 3,7% em dia de semana. Os menores valores foram encontrados na madrugada e início da manhã (6:00 h) coincidindo com os horários de menor carga no sistema. A partir das 6:00 h, a  $DHT_v$  cresce de forma gradual e nos horários de maior carga (18:00 h às 21:00 h) atinge valores elevados. Atinge valores máximos entre 22:00 h e 23:00 h, quando começa a diminuir lentamente.

A tensão apresentou forte componente de 5º harmônico com menor presença de 3º e 7º harmônicos, conforme exemplo na Tabela IV.7.

Tabela IV.7 – Valores de  $DHT_v$  (%) e distorções harmônicas individuais de 3º, 5º e 7º harmônicos, fases a, b e c

$DHTa_v$	$VaH3$	$VaH5$	$VaH7$	$DHTb_v$	$VbH3$	$VbH5$	$VbH7$	$DHTc_v$	$VcH3$	$VcH5$	$VcH7$
3,5	0,8	3,3	0,4	2,8	0,3	2,7	0,2	3,5	0,7	3,4	0,5

Quando efetuada medição com cargas na BT, no espectro das correntes elétricas, predomina a componente de 3º harmônico, seguida de parcela de 5º harmônico.



### IV.5.1. MEDIÇÕES LIGHT

A Light realizou medições no quadro de alimentação de um apartamento (n° 203), na entrada do prédio deste apartamento e na saída de alimentação em 13,8 kV da subestação alimentadora deste condomínio.

Como exemplo, mostra-se a seguir a distorção total de tensão em cada ponto e os harmônicos de tensão no horário das 11:44 do dia 06/02/04.

Tabela IV.8 - Distorções harmônicas totais e individuais (%) da tensão em medição Light – fase a

Posição	DHT <sub>a<sub>v</sub></sub>	V <sub>aH3</sub>	V <sub>aH5</sub>	V <sub>aH7</sub>
Apartamento	2,1	1,7	0,6	0,6
Prédio	2,0	1,6	0,6	0,5
Subestação	1,6	0,2	1,5	0,4

A corrente elétrica, em cada um dos pontos de medição, mostra a tendência de acompanhar o perfil harmônico da tensão. Isto é, na BT, com a presença de cargas não lineares, situação constante hoje em dia, tanto na corrente como na tensão, o componente de 3° harmônico é o mais intenso, seguido do 5° harmônico. Já na MT, normalmente separada do lado de baixa tensão por um transformador delta-estrela, a maior parte dos harmônicos de 3ª ordem fica confinada na conexão delta, de modo que, tanto na corrente como na tensão, o componente preponderante é o 5° harmônico.

Nota-se a redução das distorções totais de tensão e de corrente à medida que se caminha em direção à fonte de alimentação, conforme mostrado na Tabela IV.9, o que era esperado, devido à conexão delta-estrela e ao cancelamento harmônico.

Tabela IV.9 - DHT<sub>v</sub> e DHT<sub>i</sub> em cada fase, em cada ponto de medição, às 11:44 de 06/02/04

Posição	DHT <sub>a<sub>v</sub></sub> (%)	DHT <sub>b<sub>v</sub></sub> (%)	DHT <sub>c<sub>v</sub></sub> (%)	DHT <sub>a<sub>i</sub></sub> (%)	DHT <sub>b<sub>i</sub></sub> (%)	DHT <sub>c<sub>i</sub></sub> (%)
<b>Apartamento</b>	2,0	1,7	1,4	36,8	5,1	21,4
<b>Prédio</b>	2,0	1,7	1,3	9,3	10,3	7,0
<b>Subestação</b>	1,6	1,4	1,3	4,6	4,4	4,1

A Tabela IV.10 apresenta os valores das potências e fatores de potência para o mesmo horário, confirmando que tanto o desequilíbrio como a distorção vão se atenuando à medida que se caminha em direção a fonte de alimentação. Como consequência, os valores dos fatores de potência calculados na MT são muito próximos. Apesar disto, no horário medido, o fator de potência geral está abaixo de 0,92. Infelizmente, não se tem informação de quais cargas estariam funcionando neste horário, mesmo porque esta é uma missão praticamente impossível.

Tabela IV.10 – Potências, fatores de potência e fatores de desequilíbrios de corrente e tensão - 11:44 h de 06/02/04

Local	P [kVA]	Q [kVAr]	D [kVA]	A [kVA]	S <sub>s</sub> [kVA]	FP <sub>d</sub>	FP <sub>v</sub>	FP <sub>s</sub>	UF - I [%]	UF - V [%]
<b>Apto</b>	0,091	-0,063	0,042	0,053	0,129	0,822	0,769	0,700	43,8	0,35
<b>Prédio</b>	5,472	3,623	0,582	1,380	6,732	0,834	0,830	0,813	17,2	0,39
<b>SE</b>	2.319	1.145	101,6	47,4	2.589	0,897	0,896	0,896	1,73	0,50

A título ilustrativo, a Tabela IV.11 apresenta as mesmas grandezas, porém, para o horário de 22:00 h.

Tabela IV.11 - Potências, fatores de potência e fatores de desequilíbrios de corrente e tensão – 22:00 h de 06/02/04

Local	P [kVA]	Q [kVAr]	D [kVA]	A [kVA]	S <sub>s</sub> [kVA]	FP <sub>d</sub>	FP <sub>v</sub>	FP <sub>s</sub>	UF - I [%]	UF - V [%]
<b>Apto</b>	0,614	-0,318	0,134	0,428	0,824	0,888	0,872	0,745	31,1	0,45
<b>Prédio</b>	6,800	3,625	0,803	1,649	7,921	0,882	0,878	0,858	21,5	0,36
<b>SE</b>	2.160	963,5	152,1	87,5	2.371	0,913	0,911	0,911	3,12	0,64

#### IV.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou diversos resultados de medições realizadas em uma bancada auxiliar, a qual foi implementada para esta finalidade, no laboratório do ISEE. As medições visaram obter os valores das grandezas elétricas características das LFCs e de outros equipamentos eletroeletrônicos utilizados em residências e áreas comerciais. Além disto, foram realizadas medições com associações entre LFCs, LIs e eletroeletrônicos buscando-se conhecer o comportamento das cargas quando funcionam separadamente e em conjunto.

Como resultado de toda a campanha de medição, um grande banco de dados foi construído. Estes dados levantados foram utilizados para o tratamento matemático e para a obtenção de modelos computacionais para as simulações.

Foram também apresentados alguns resultados de medições em campo para futuras análises.

## V. MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LFCs E OUTRAS CARGAS NÃO LINEARES

### V.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a modelagem das LFCs e de outras cargas não lineares.

Foi adotada como plataforma computacional o *software* Matlab 6.5 e seu sistema de simulação chamado Simulink [Ma98]. O Matlab apresenta diversas facilidades para montagem dos circuitos para simulação tais como a biblioteca do simulink, onde encontram-se modelos prontos de cargas, cabos elétricos, transformadores, fontes de tensão e de corrente, dentre outros. Além disso, disponibiliza diversos medidores de grandezas elétricas que facilitam muito os trabalhos.

Cada modelo implementado no Simulink foi testado e seus resultados comparados com os resultados das medições, procedendo-se assim a validação dos modelos.

### V.2. MODELO COMPUTACIONAL DE CARGA NÃO LINEAR

O modelo adotado para cada carga não linear foi o já conhecido modelo constituído de um ramo contendo a potência ativa ( $P_I$ ) e não ativa de deslocamento ( $Q_I$ ) em paralelo com fontes de corrente senoidais ideais representando os componentes harmônicos relevantes [Du02, Ja00, St92, Ol02, Pi93, Ro95]. Cada fonte de corrente possui módulo de corrente harmônica e sua respectiva fase, ambos valores obtidos através das medições laboratoriais.

Na Figura V.1 está representado o modelo adotado. Foram utilizados todos os componentes harmônicos cujo valor eficaz ultrapassava 1% do valor eficaz da componente fundamental. Para as LFCs, tal procedimento levou à representação dos harmônicos ímpares até a 49ª ordem.

Quanto ao ramo referente à componente fundamental, o mesmo é constituído por uma resistência em série com um capacitor ou com um indutor, representando respectivamente a potência ativa e não ativa de deslocamento. Medições mostraram que algumas cargas apresentam características capacitivas e outras características indutivas,

razão pela qual a componente fundamental ora é representada por um ramo RL, ora por um ramo RC.

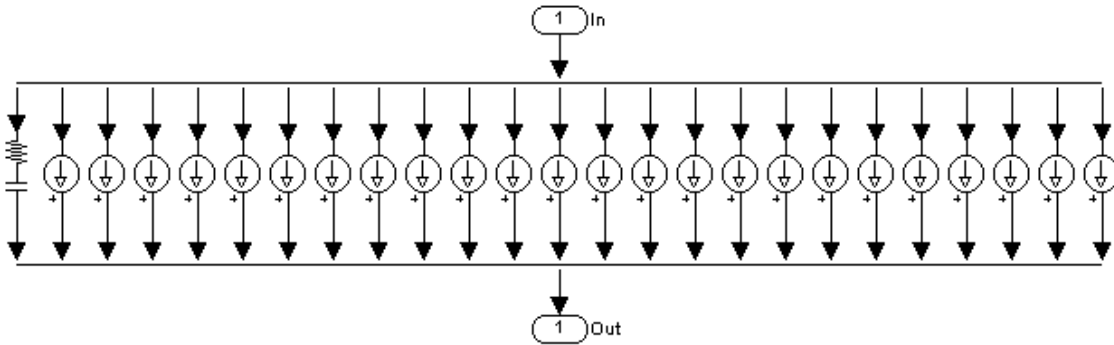


Figura V.1 - Modelagem da LFC

### V.3. PARAMETRIZAÇÃO E APERFEIÇOAMENTO DOS MODELOS

Uma vez construído o modelo apresentado na Figura V.1, cada elemento foi parametrizado com valores obtidos das medições. A parametrização é realizada em janelas que se abrem após o “click” do *mouse* sobre o respectivo elemento. A Figura V.2 exemplifica este procedimento.

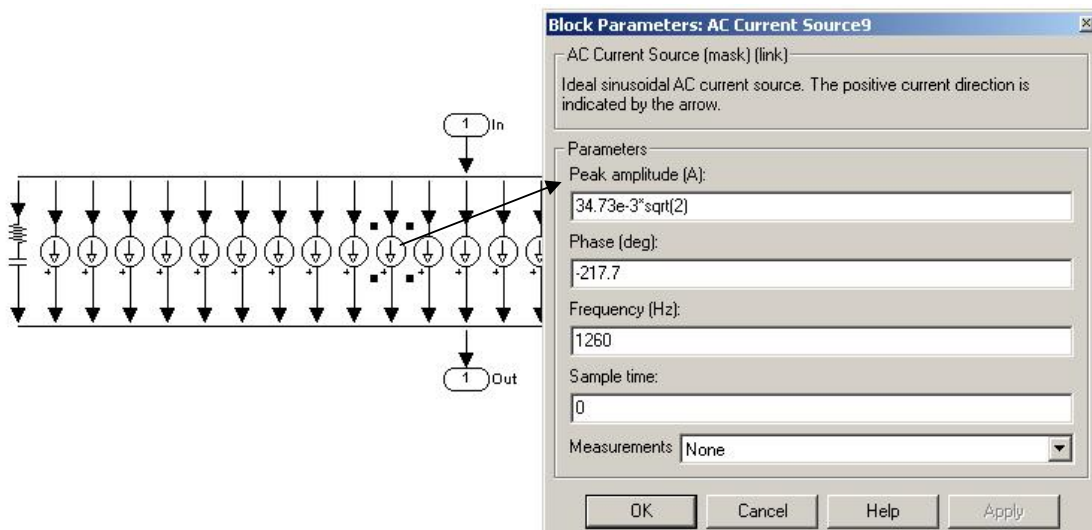


Figura V.2 – Parametrização de cada elemento da LFC

Na seqüência, o modelo computacional de LFC, bem como de qualquer outra carga linear ou não linear, pode ser alimentado por uma fonte de tensão. Para que a forma de

onda possa ser visualizada, torna-se necessário a colocação de um medidor de corrente (*current measurement*) e um osciloscópio (*scope*) conforme mostra a Figura V.3

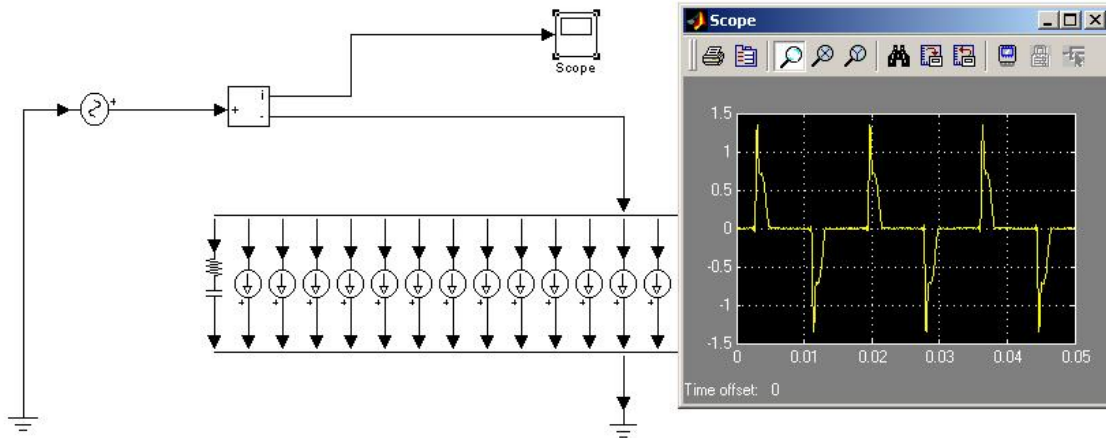


Figura V.3 - Visualização da forma de onda através do osciloscópio

Para o exemplo da Figura V.3, o gráfico da forma de onda foi amplificado e apresentado na Figura V.4.

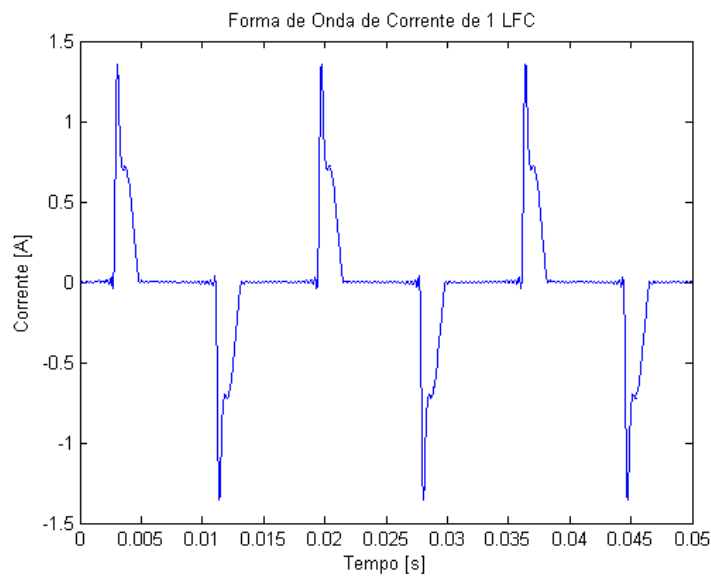


Figura V.4 – Forma de onda amplificada da corrente

Como pode ser observado na Figura V.1, o modelo equivalente da LFC possui dimensões grandes o que poderia vir a dificultar a montagem de um circuito contendo um grande número de LFCs e outras cargas. Sendo assim, todo o circuito elétrico

representativo da LFC foi convertido em um bloco que possui uma entrada e uma saída onde é aplicada a tensão desejada, conforme indica a Figura V.5.

Cada bloco representativo de uma carga passa a ser, portanto, um subsistema (*subsystem*), que será então agregado ao modelo geral do sistema de distribuição.

Vários subsistemas representando as diversas cargas analisadas em laboratório foram criados, estando os mesmos disponíveis em uma biblioteca.

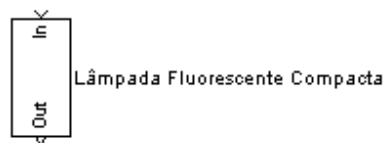


Figura V.5- Bloco correspondente à LFC

A Figura V.6 ilustra como estes blocos podem ser utilizados para modelar um ambiente residencial, que é composto por diversas cargas lineares e não lineares.

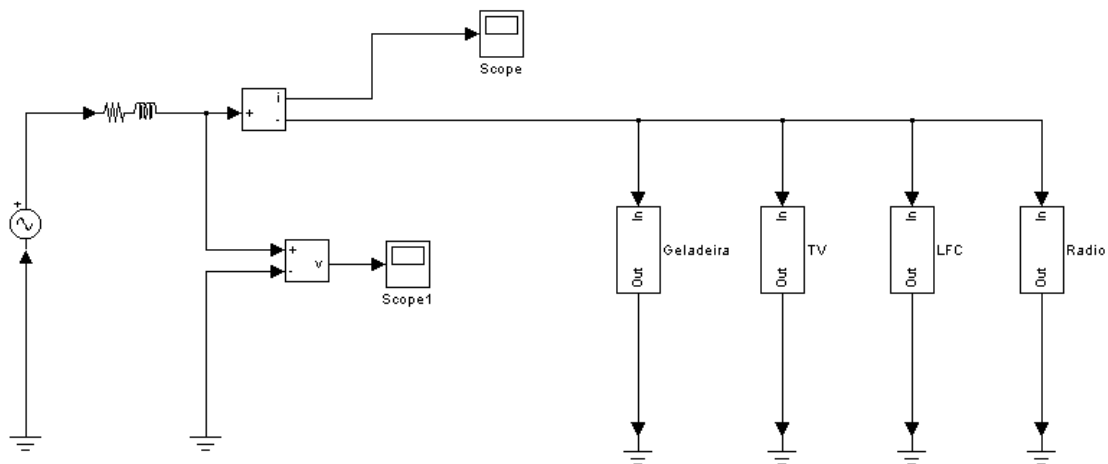


Figura V.6 – Sistema com diversas cargas representadas

Finalmente cabe mencionar que, para a obtenção de um modelo consistente das LFCs e das outras cargas, diversas simulações foram realizadas até que fossem encontrados resultados que retratassem com fidelidade o comportamento analisado em laboratório.

Sabe-se, no entanto, que os modelos utilizados são modelos estáticos e, portanto, não respondem com exatidão ao comportamento dinâmico da carga quando tensões

distorcidas as alimentam. Esta dinâmica ainda tem sido assunto de pesquisas [Gr02, Gr95, Gr94, Gr98], não fazendo parte do escopo desta dissertação.

No entanto, ciente de que o sinal de tensão disponível ao consumidor apresenta certo nível de distorção harmônica, procurou-se modelar algumas fontes de tensão que contemplassem estas distorções.

Um modelo correspondente foi implementado, associando fontes de tensão em série. A Figura V.7 representa uma fonte de tensão contendo a componente fundamental associada a três outras fontes ideais correspondentes aos harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem, com módulos e fases correspondentes a valores obtidos em medição.

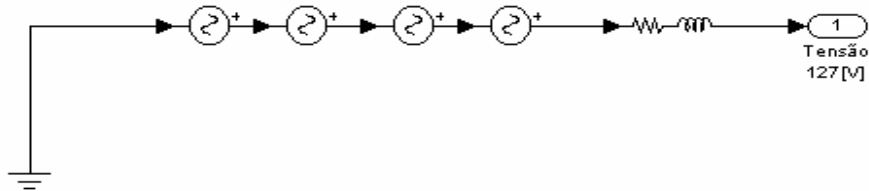


Figura V.7 - Fonte de tensão distorcida

Por sua vez, a Figura V.8 é o subsistema correspondente à fonte distorcida da Figura V.7, no caso, com parâmetros correspondentes à tensão disponível no laboratório.



Figura V.8 – Bloco correspondente à fonte de tensão distorcida

## V.4. SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE CARGAS – RESULTADOS E COMENTÁRIOS

### V.4.1. LFCS E OUTRAS CARGAS NÃO LINEARES

Nas primeiras simulações realizadas, o foco principal foi a análise das LFCs.

De modo a obter o perfil de corrente e as demais características elétricas das lâmpadas, o modelo da Figura V.9 foi elaborado.

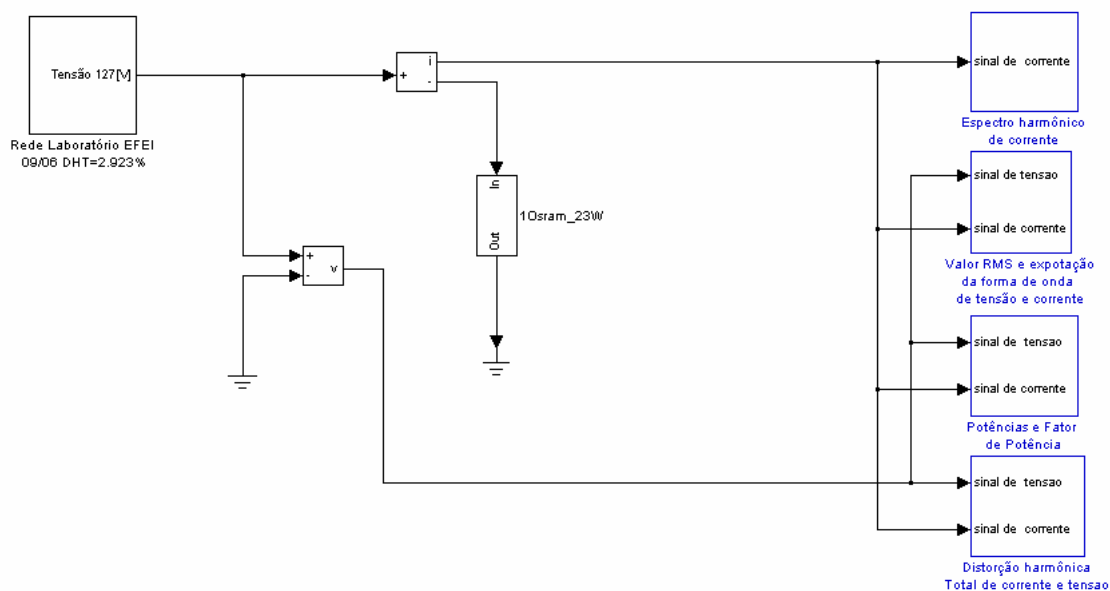


Figura V.9 – Circuito de simulação

Neste modelo, a LFC é alimentada com uma fonte de tensão distorcida ( $DHT_v$  de 2,923%), que é a reprodução da tensão de alimentação do laboratório da Universidade quando de uma determinada medição. O perfil de corrente, os espectros de amplitude e de fase, as distorções harmônicas totais, as potências e o fator de potência verdadeiro são obtidos através dos blocos especiais de medição disponíveis na biblioteca do simulink.

Cabe enfatizar que um destes blocos, conforme indica a Figura V.9, permite a exportação dos dados instantâneos de tensão e corrente para finalidades diversas.



Os vários modelos de LFCs analisadas em laboratório foram simuladas no Matlab e os dados resultantes foram comparados com os dados de medição.

Seja, por exemplo, a LFC Osram 23 W, 127 V. Os valores das grandezas elétricas obtidos na simulação e aqueles obtidos em laboratório estão postos na Tabela V.1.

Tabela V.1 – Comparação entre simulação e medição para LFC Osram 23 W

<b>Grandeza</b>	<b>Medição</b>	<b>Simulação</b>	<b>Erro (%)</b>
Potência Ativa [W]	25,5	25.9	1,6
Potência não ativa de deslocamento[VAr]	-6,2	-6.0	3,2
Potência Aparente [VA]	44,3	44,3	0,0
Fator de Potência verdadeiro	0,58	0.58	0,0
Valor eficaz de Tensão [V]	128,0	128.0	0,0
Valor eficaz de Corrente [mA]	345,7	346.3	0,2
DHTv	2,90	2.92	0,7
DHTi	132,2	129.4	2,1

Pode-se observar que os desvios entre os valores medidos e simulados são pequenos. O maior erro encontrado foi de 3,2% para a potência não ativa de deslocamento.

Comparação semelhante pode ser feita para a fundamental de corrente bem como para os harmônicos resultantes da decomposição por série de Fourier. A Tabela V.2 e a Tabela V.3 apresentam este comparativo.

Pode-se observar que a maioria dos desvios está próxima de zero, sendo que, os maiores valores encontrados neste exemplo foram de 3,8% para a amplitude do 5º harmônico e 2,5% para o ângulo de fase do 29º harmônico.

Finalmente, para fins ilustrativos, a Figura V.10 apresenta os gráficos da forma de onda, espectro de amplitude e espectro de fase da corrente consumida pela LFC Osram, obtidos na simulação bem como na medição.

Tabela V.2 – Medição – Osram 23 W

<b>CURRENT HARMONICS</b>			
Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo
AH 1	208.6 m	100.000	-346.5
AH 3	182.29m	87.3873	-138.8
AH 5	137.28m	65.8102	-288.6
AH 7	85.99 m	41.2224	-71.7
AH 9	46.43 m	41.2224	-194.0
AH11	40.11 m	22.2579	-293.1
AH13	48.62 m	22.2579	-56.3
AH15	49.56 m	19.2282	-191.1
AH17	43.38 m	20.7958	-324.5
AH19	37.40 m	17.9291	-91.6
AH21	34.73 m	16.6491	-217.7
AH23	32.80 m	15.7239	-348.4
AH25	28.68 m	13.7488	-120.1
AH27	23.91 m	11.4621	-248.9
AH29	20.57 m	9.8610	-13.2
AH31	18.841m	9.0321	-140.4
AH33	16.653m	7.9832	-270.5
AH35	13.190m	6.3231	-39.7
AH37	10.200m	4.8897	-161.8
AH39	9.210 m	4.4151	-279.2
AH41	8.726 m	4.1831	-44.3
AH43	7.570 m	3.6290	-175.4
AH45	5.898 m	2.8274	-297.9
AH47	5.061 m	2.4262	-56.3
AH49	4.923 m	2.3600	-178.2

Tabela V.3 – Simulação – Osram 23 W

<b>HARMÔNICOS DE CORRENTE</b>			
Ordem	Módulo	%Fund.	Ângulo
AH 1	211.7 m	100.000	-346.48
AH 3	181.9m	85.91	-139.0
AH 5	132.1m	62.39	-287.2
AH 7	86.11 m	40.68	-71.78
AH 9	46.47 m	21.95	-194.00
AH11	40.11 m	18.95	-293.08
AH13	48.64 m	22.98	-56.26
AH15	49.55 m	23.41	-191.20
AH17	43.42 m	20.51	-324.39
AH19	37.39 m	17.66	-91.66
AH21	34.75 m	16.42	-217.70
AH23	32.80 m	15.49	-348.40
AH25	28.70 m	13.56	-119.9
AH27	23.90 m	11.29	-249.10
AH29	20.58 m	9.72	-12.87
AH31	18.86m	8.911	-140.4
AH33	16.72m	7.899	-270.24
AH35	13.21m	6.242	-39.85
AH37	10.23m	4.833	-161.4
AH39	9.212 m	4.352	-279.11
AH41	8.726 m	4.122	-44.1
AH43	7.575 m	3.578	-175.3
AH45	5.999 m	2.834	-297.16
AH47	5.082 m	2.401	-56.84
AH49	5.025 m	2.374	-178.6

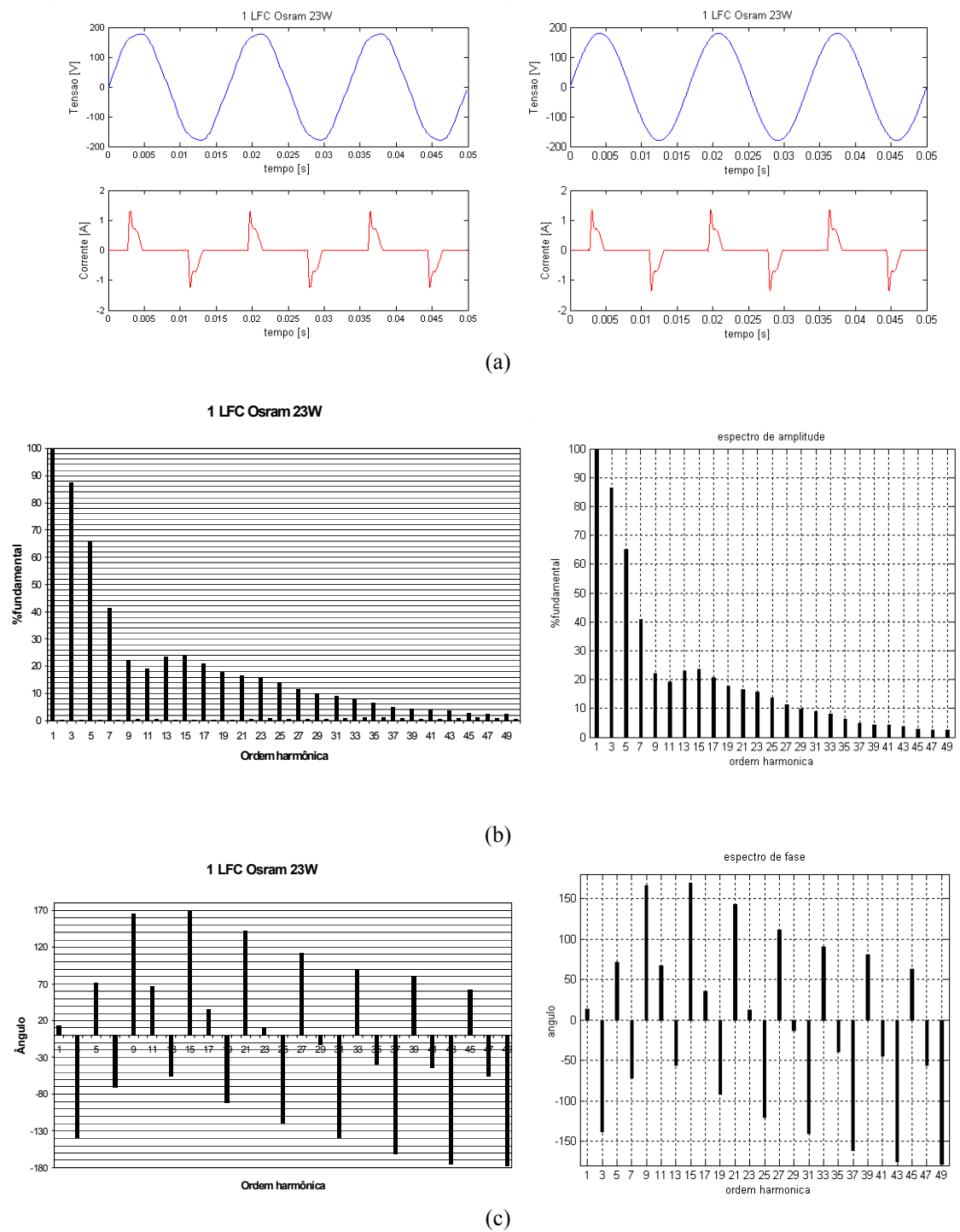


Figura V.10 – Comparativo: medição x simulação – (a) formas de onda (b) espectro de amplitude (c) espectro de fase

Nota: Nesta figura e nas demais apresentadas nesta dissertação, no lado esquerdo será sempre apresentado o resultado de medição e no lado direito, será apresentado o resultado de simulação.

Resultados como estes foram obtidos para todos os demais modelos de LFCs, bem como para as outras cargas não lineares.

### V.4.2. ASSOCIAÇÃO DE LFCs DE MESMA MARCA

Conforme já mencionado, a associação de LFCs de mesma marca ligadas a uma única fase é uma ocorrência comum em residências e estabelecimentos comerciais.

Assim, como realizado em laboratório, situações similares foram implementadas em nível computacional e os resultados de simulações comparados com os de medições.

Como exemplo, a Figura V.11 mostra resultados da forma de onda e a Figura V.12 apresenta os espectros de amplitude da corrente resultante de 4 LFCs FLC 25 W, 127 V, comparando medição e simulação.

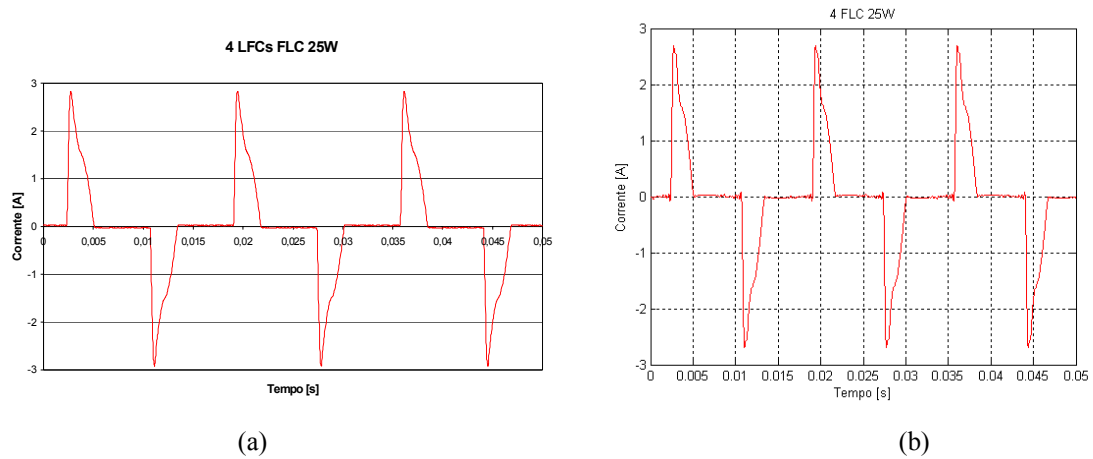


Figura V.11 – tensão e corrente de 5 LFCs – (a) medição (b) simulação

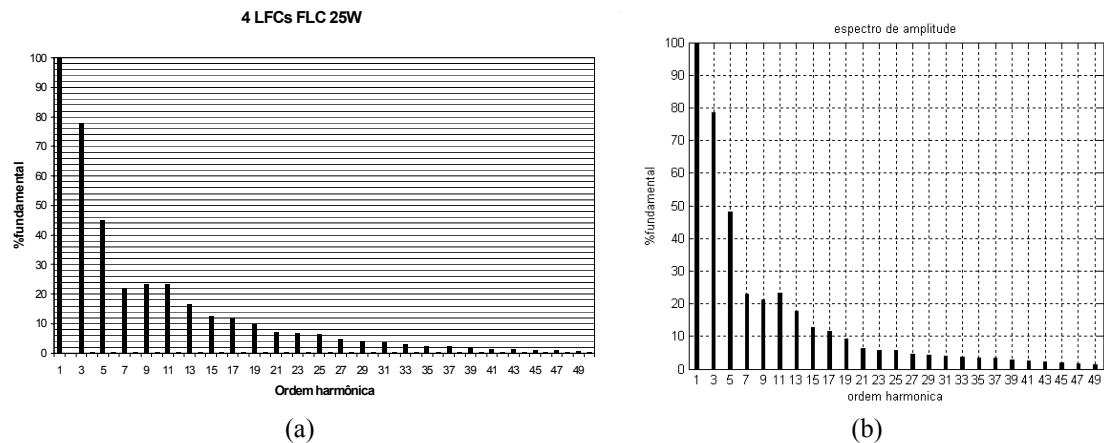


Figura V.12 – espectro de corrente 5 LFCs – (a) medição (b) simulação

Comparando-se os resultados, constata-se pequenas diferenças nas amplitudes harmônicas, sendo que o 5º harmônico apresenta uma maior diferença em termos

percentuais, porém em intensidade de corrente esta diferença é de apenas 13 mA para uma fundamental de 903 mA.

Na realidade não há lâmpada exatamente igual à outra, existindo diferenças tanto nos ângulos de fase como nas amplitudes da componente fundamental e harmônicos, principalmente nos de ordem mais elevada.

Aliando tais características à própria dinâmica da rede, ampliações e/ou atenuações de harmônicos poderão ocorrer, como observado no exemplo em questão. Neste caso, resultando em um  $DHT_i$  de 102,9% na medição e 104,6% na simulação, o que significa um desvio de 1,7% aproximadamente.

### V.4.3. ASSOCIAÇÃO DE LFCs DE DIFERENTES MARCAS

De modo similar, partiu-se para a simulação de LFCs de diferentes marcas.

A Figura V.13 apresenta as formas de onda da corrente resultantes de medição e de simulação de 7 LFCs de diferentes marcas e a Figura V.14 ilustra os correspondentes espectros de amplitude. Neste caso, observa-se pelos espectros de amplitude da corrente que ocorre uma diminuição do valor percentual dos harmônicos de corrente, quando comparados com os mesmos percentuais de uma única lâmpada. Esta redução se acentua a partir do 13º harmônico, porém ela é mais acentuada na medição do que na simulação.

Segundo Grady [Gr298], são dois os processos que levam a esta redução geral dos harmônicos de corrente quando são associadas cargas não lineares alimentadas por ponte retificadora a diodo. O primeiro deles diz respeito à diversidade dos ângulos de fase dos harmônicos de corrente das cargas e o segundo está relacionado com a interação entre as tensões da fonte e as correntes harmônicas das cargas. Estes dois fenômenos são dinâmicos e dependem de características tanto das cargas como do sistema elétrico.

No caso da simulação, quando as cargas são modeladas como fontes de correntes ideais e fixas, em módulo e fase, estes fenômenos não ocorrem. Assim, explica-se a diferença entre simulação e medição.

Ainda segundo Grady, ao se utilizar o método de injeção de correntes, normalmente haverá uma superestimação dos harmônicos. Porém, como as diferenças ocorrem principalmente para os harmônicos de ordens mais elevadas, que possuem intensidades reduzidas, a influência destas não é tão significativa. Enfatiza-se que, as  $DHT_{is}$  da medição e da simulação resultaram muito próximas.

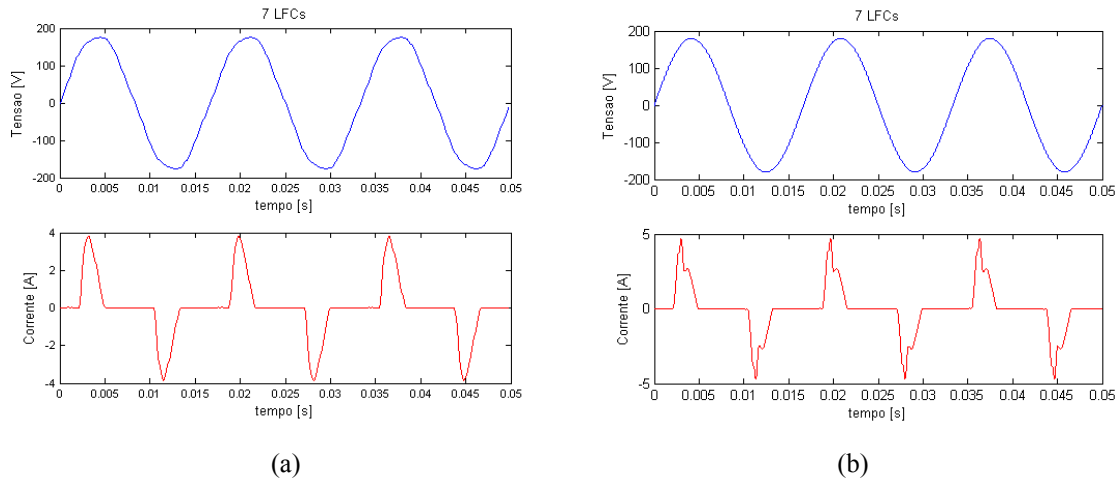


Figura V.13 – tensão e corrente de 7 LFCs diferentes – (a) medição (b) simulação

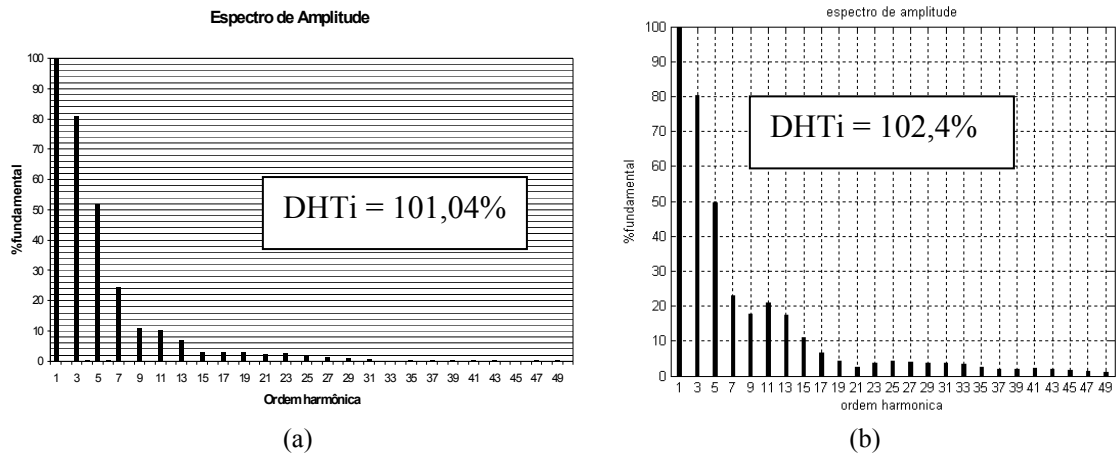


Figura V.14 – espectros de corrente 7 LFCs (a) medição (b) simulação

A título de informação, a Tabela V.4 apresenta os ângulos de fase de alguns harmônicos para diferentes modelos de LFCs utilizadas neste trabalho, bem como o ângulo de fase resultante da associação das 7 lâmpadas.

Nota-se alterações mais significativas na ordem de grandeza dos ângulos, para os harmônicos superiores.

Tabela V.4 – Ângulos de fase de harmônicos de diversas LFCs e de sua associação

Harmônico/ LFC	FLC 20 W	GE 20 W	GE 15 W	Philips 20 W	Philips 15 W	FLC 25 W	Osram 23 W	7 LFCs
3°	-125,5°	-121,4°	-128°	-108,1°	-104,8°	-126,2°	-138,8°	-129,6°
5°	-261,5°	-255,6°	-267,6°	-225,5°	-216,9°	-263,4°	-288,6°	-269,0°
7°	-17,0°	-4,1°	-33,7°	-317,9°	-301,6°	-17,1°	-71,7°	-42,0°
9°	-108,7°	-88,8°	-131,0°	-55,8°	-40,2°	-103,2°	-194,0°	-138,0°
11°	-226,0°	-203,0°	-238,9°	-171,8°	-153,2°	-220,5°	-293,1°	-241,0°
13°	23,3°	-325,4°	-4,5°	-285,9°	-259,8°	-346,4°	-56,3°	-4,0°
15°	17,2°	-78,8°	-130,8°	-33,6°	-356,4°	-101,7°	-191,1°	-107,0°

V.4.4. ASSOCIAÇÃO DE LFCs E LIs

Para esta situação, escolheu-se como exemplo a associação de 3 LFCs marca FLC 20 W associadas a uma LI de 100 W. A Figura V.15 e a Figura V.16 ilustram os resultados das formas de onda e dos espectros harmônicos respectivamente, demonstrando que o desvio encontrado da medição para a simulação é pequeno.

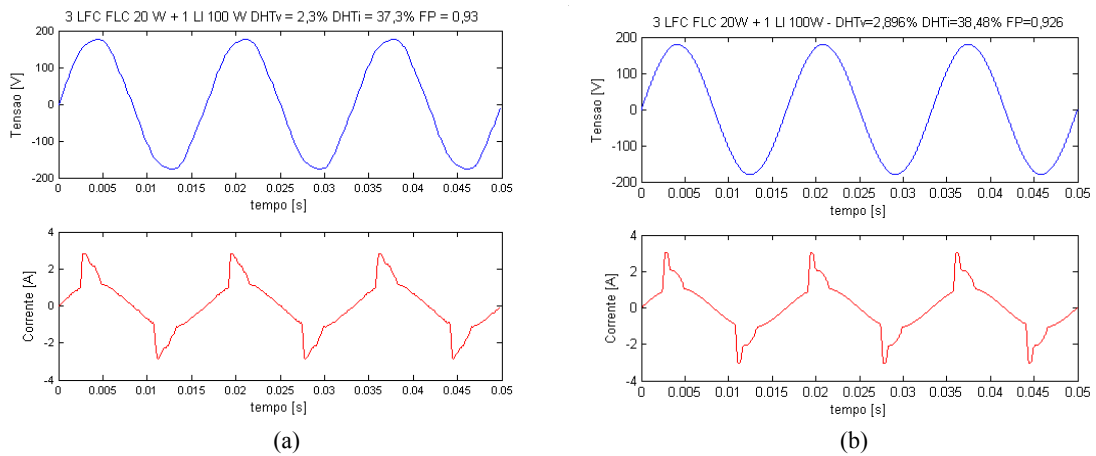


Figura V.15 – tensão e corrente 3 LFCs + 1 LI – (a) medição (b) simulação

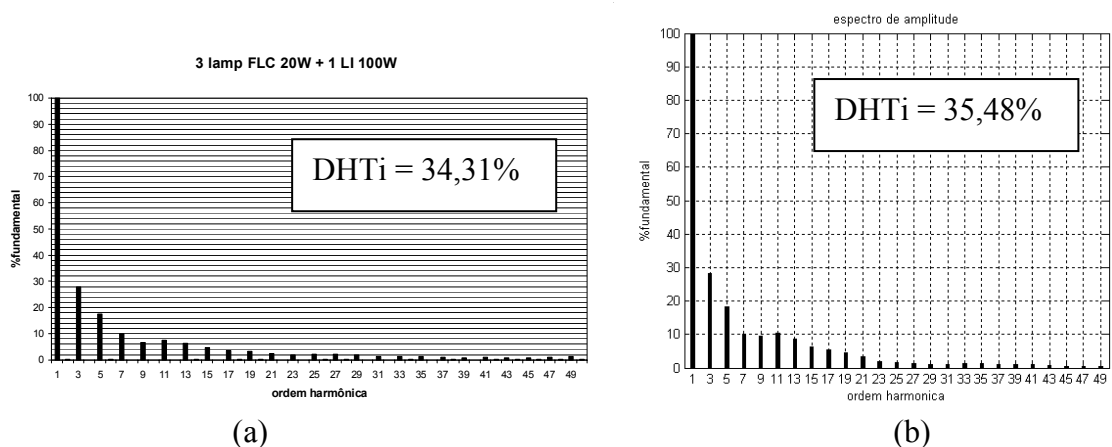


Figura V.16 – espectros de corrente 3 LFCs + 1 LI (a) Medição (b) simulação

### V.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo mostrou-se os modelos computacionais das lâmpadas fluorescentes compactas, bem como das diversas outras cargas não lineares que foram trabalhadas em laboratório e apresentadas no capítulo IV. Os modelos foram desenvolvidos, baseados em metodologias já consagradas e utilizando-se *softwares* de última geração, como no caso o Matlab e Simulink.

Após o desenvolvimento dos modelos, simulações foram realizadas e seus resultados apresentados também neste capítulo.

Para validação dos modelos, foram criados diversos blocos adicionais tais como fontes de tensão, medidores de distorção harmônica total, geradores de espectros, de modo que os resultados das simulações pudessem ser comparados com os resultados das medições. Utilizou-se como critério de limite de erro o percentual de 5%. Em sua grande maioria, as comparações apresentaram desvios pequenos, da ordem de 2 a 3%, o que valida os modelos utilizados. O maior desvio encontrado foi de 3,8%.

Cabe ressaltar que modelos matemáticos, por melhores que sejam nunca irão reconstituir perfeitamente um sinal medido em laboratório ou em campo, haja vista o fenômeno de Gibbs<sup>5</sup> [Dt89], presente em sinais contendo variações bruscas.

Finalmente, um fato importante a ser considerado diz respeito aos modelos utilizados, que apresentam resultados conservadores em relação à situação real.

---

<sup>5</sup> Gibbs explicou que uma série matemática, por mais termos que possua, não representará fielmente o sinal medido por apresentar oscilações em torno dos pontos em que haja variações bruscas de valores.



## **VI. PROSPECÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM DAS CARGAS E DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

### **VI.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

No capítulo anterior foram apresentados os modelos utilizados para simulação computacional de Lâmpadas Fluorescentes Compactas - LFCs, bem como de outras cargas não lineares de uso residencial. Estes modelos, por sua vez, foram implementados no ambiente simulink do Matlab, na forma de subsistemas utilizando blocos de medição, fontes e demais elementos de circuitos elétricos. Simulações foram realizadas e resultados comparativos com medições laboratoriais foram apresentados com razoáveis aproximações, validando assim os modelos unitários, bem como aqueles compostos por mais de um elemento.

Como o objetivo é verificar o impacto do uso em grande escala de LFCs no sistema elétrico de distribuição, partiu-se para a implementação de modelos agregados que representassem o ambiente elétrico de residências, estando estas ligadas à rede de distribuição, representada por seus ramais, transformadores, alimentadores e fontes equivalentes

### **VI.2. PROSPECÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM DO AMBIENTE ELÉTRICO RESIDENCIAL**

Em 1989 a Eletrobrás, através do PROCEL, realizou uma pesquisa sobre posse de eletrodomésticos e hábitos de consumo em nível residencial [El89]. Este trabalho foi realizado em âmbito nacional, retratando as diversas regiões do país. No ano de 2000, pesquisa semelhante foi realizada pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG [Ce00]. Resultados destes levantamentos apontaram, dentre outras, as características gerais de consumo de energia elétrica.

Por facilidade, o presente trabalho de dissertação procurou focar seu interesse em sistemas de distribuição da região sudeste, razão pela qual segue um resumo dos principais elementos das pesquisas de posse e de consumo para tal região.

### VI.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DE CONSUMO

(i) Quanto aos consumidores:

- 4 (quatro) é o número médio de pessoas por residência;

(ii) Quanto à alimentação elétrica:

- 72% das residências têm alimentação monofásica;
- 24% têm alimentação bifásica (a Eletropaulo tem um grande peso nesta percentagem);
- 4% têm alimentação trifásica.

(iii) Quanto à construção:

- 78,8% são casas;
- 15,5% são apartamentos e
- 5,7%, outros tipos de construções.

(iv) Quanto à participação do eletrodoméstico no consumo de energia:

- Geladeira – 34%
- Chuveiro – 19,6%
- TV – 11,1%
- Ar condicionado – 3%
- Ferro de passar – 2,6%
- Rádio/aparelho de som – 1,65%

### VI.2.2. PERÍODO MAIS PROVÁVEL DE USO DOS ELETRODOMÉSTICOS

As pesquisas citadas fornecem também o perfil mais provável de uso dos eletrodomésticos nas residências. A Figura VI.1 mostra um conjunto de curvas de carga que representa o consumo de energia em função do horário para diversos eletrodomésticos.

### VI.2.3. PERFIL DE POSSE DOS ELETRODOMÉSTICOS

Na Tabela VI.1 está representado o perfil de posse de eletrodomésticos nas residências da região sudeste. Para exemplificar, esta tabela mostra, que 93,8% das residências possuem ferros de passar roupa e que 75,5% possuem geladeira.

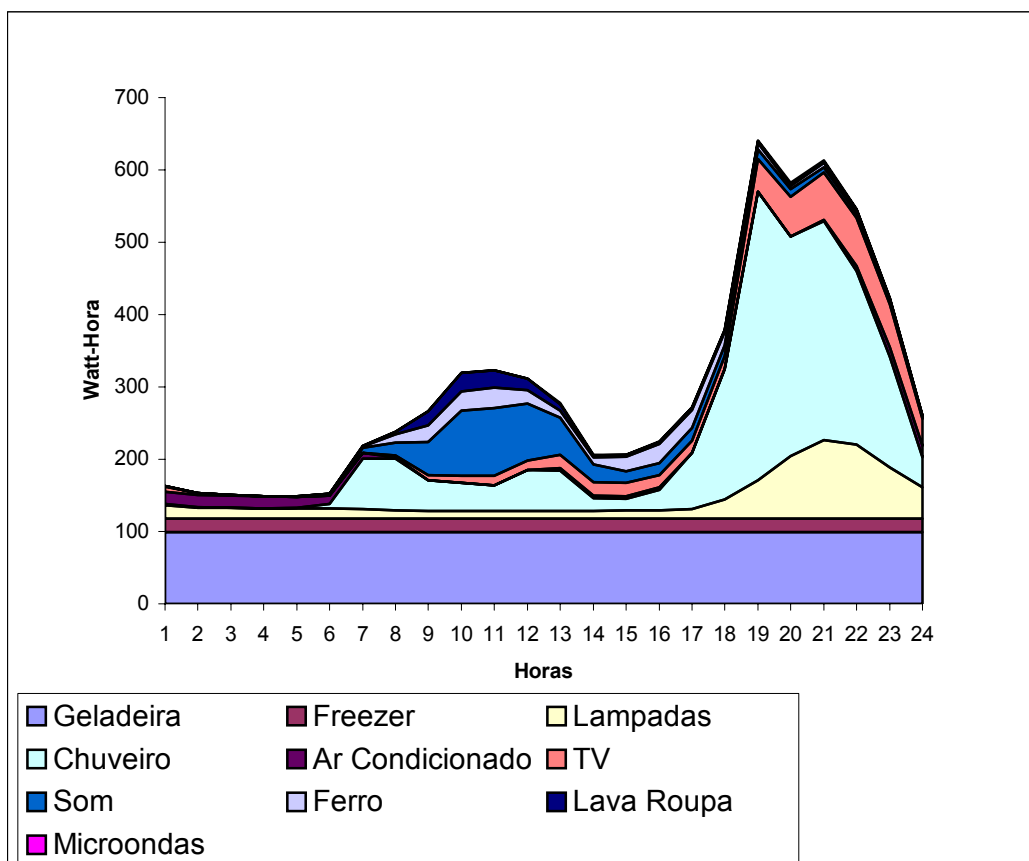


Figura VI.1 – Perfil de utilização mais provável de eletrodoméstico (fonte – pesquisa Cemig – Fev/2000)

Tabela VI.1 – Posse de eletrodomésticos

Eletrodoméstico	Percentual (%)
Ferro de passar roupa	93,8
Televisão	91,6
Liquidificador	81,3
Geladeira	75,5
Chuveiro elétrico	83,6
Aparelho de som / rádio elétrico	45,2
Ventilador	42,3
Máquina de lavar roupa	35,1
Espremedor de frutas	26,9

#### VI.2.4. TEMPO MÉDIO DE USO DOS ELETRODOMÉSTICOS

Lista-se a seguir, tempos médios de funcionamento de cada eletrodoméstico:

- Geladeira – 720 min (1 hora ligada/1 hora desligada – 12 hs/dia)
- Chuveiro – 8 min / pessoa / banho
- TV – 5 horas
- Ar condicionado – 3 horas
- Ferro de passar – 30 min
- Rádio/ap. som – 2 hs
- Micro-ondas – 15 min

- Iluminação fluorescente – 2 horas 54 min
- Iluminação incandescente – 1 h 46 min
- Lava roupa – 45 min
- Lava louça – 30 min
- Computador – 3 horas
- Secadora de roupas – 40 min

Estes tempos são importantes tendo em vista a metodologia de simulação que será brevemente descrita.

### **VI.3. TIPOS DE RESIDÊNCIAS E SUAS RESPECTIVAS CARGAS**

Com base nestes diversos elementos anteriormente apresentados, resultantes das pesquisas citadas, três modelos de residências foram concebidos para utilização nas simulações do presente trabalho, sendo dois modelos com alimentação monofásica e um com alimentação trifásica. Tem sido considerado que o modelo bifásico é de uso bastante restrito, com forte concentração na região de concessão da Eletropaulo na cidade de São Paulo e, por isso, o modelo com esta característica não foi utilizado.

Segue então o descritivo dos modelos residenciais com suas respectivas cargas:

#### **(i) Residência tipo 1 – alimentação monofásica**

- 1 chuveiro elétrico – 4400 W
- 1 ferro de passar – 1000 W
- 1 TV 20” – 100 W
- 1 geladeira – 150 W
- 1 rádio elétrico ou aparelho de som – 70 W
- 5 lâmpadas incandescentes 60 W ou 5 LFCs 20 W

#### **(ii) Residência tipo 2 – alimentação monofásica**

- 1 chuveiro elétrico
- 1 ferro de passar
- 1 TV 20”
- 1 geladeira
- 1 rádio/ap. som
- 8 lâmpadas incandescentes 60 W ou 8 LFCs 20 W
- 2 lâmpadas fluorescentes tubulares 20 W
- 1 micro-ondas – 1350 W
- 1 máquina de lavar roupas – 600 W

#### **(iii) Residência tipo 3 – alimentação trifásica**

- 3 chuveiros
- 1 ferro de passar
- 1 TV 20”

- 1 TV 29” – 150 W
- 1 geladeira
- 1 rádio/ap. som
- 15 lâmpadas incandescentes 60 W ou 15 LFCs 20 W
- 4 lâmpadas fluorescentes tubulares 20 W
- 1 micro-ondas
- 1 máquina de lavar roupas
- 1 ar condicionado – 1400 W
- 1 lava louça – 1400 W
- 1 computador – 130 W

Nota: Os equipamentos que se repetem nos modelos de residências, têm as mesmas potências.

#### VI.4. MODELOS DE RESIDÊNCIAS, RAMAIS, ALIMENTADORES E SISTEMAS

Uma vez definidos os modelos de residências, baseados nas pesquisas Procel - Eletrobrás – CEMIG [E189, Ce00], partiu-se então para a implementação dos modelos computacionais conforme será descrito a seguir.

##### VI.4.1. MODELOS DE RESIDÊNCIAS

Com o objetivo de analisar os impactos da substituição de LIs pelas LFCs combinando-as com as demais cargas, os três tipos considerados de residências possuem, em seus modelos computacionais, os dois tipos de lâmpadas (LIs e LFCs). Esta característica do modelo é intencional, aumentando a sua flexibilidade e permitindo simulações que contemplem situações diversas dentre as quais 100% de LIs, 100% de LFCs ou qualquer combinação entre elas (situação intermediária).

Utilizando os recursos de subsistemas do Simulink, os modelos de residências foram implementados. Estes modelos, aqui representados na forma de diagrama de blocos do Simulink, estão reproduzidos nas figuras a seguir:

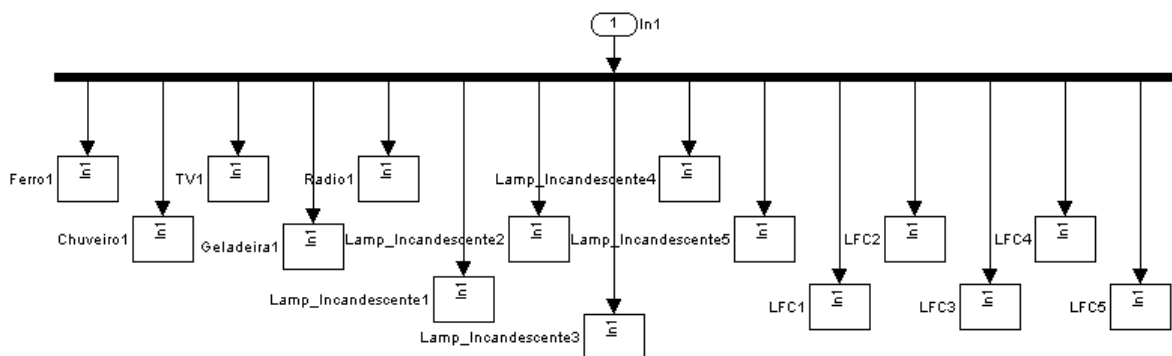


Figura VI.2 – Residência tipo 1

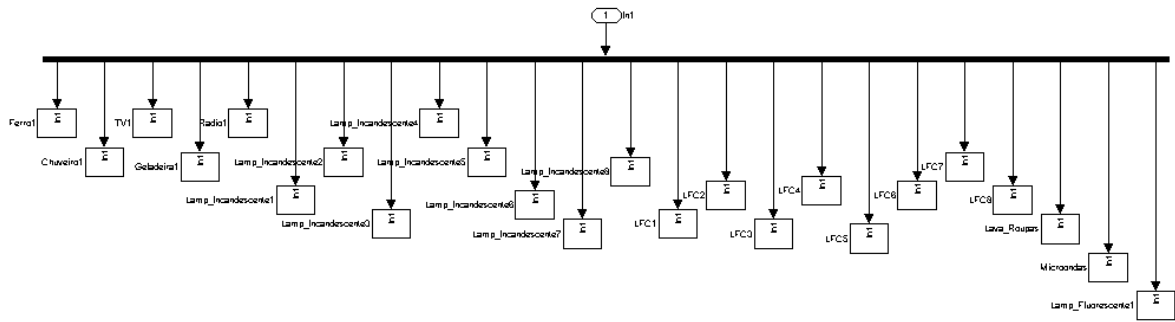


Figura VI.3 – Residência tipo 2

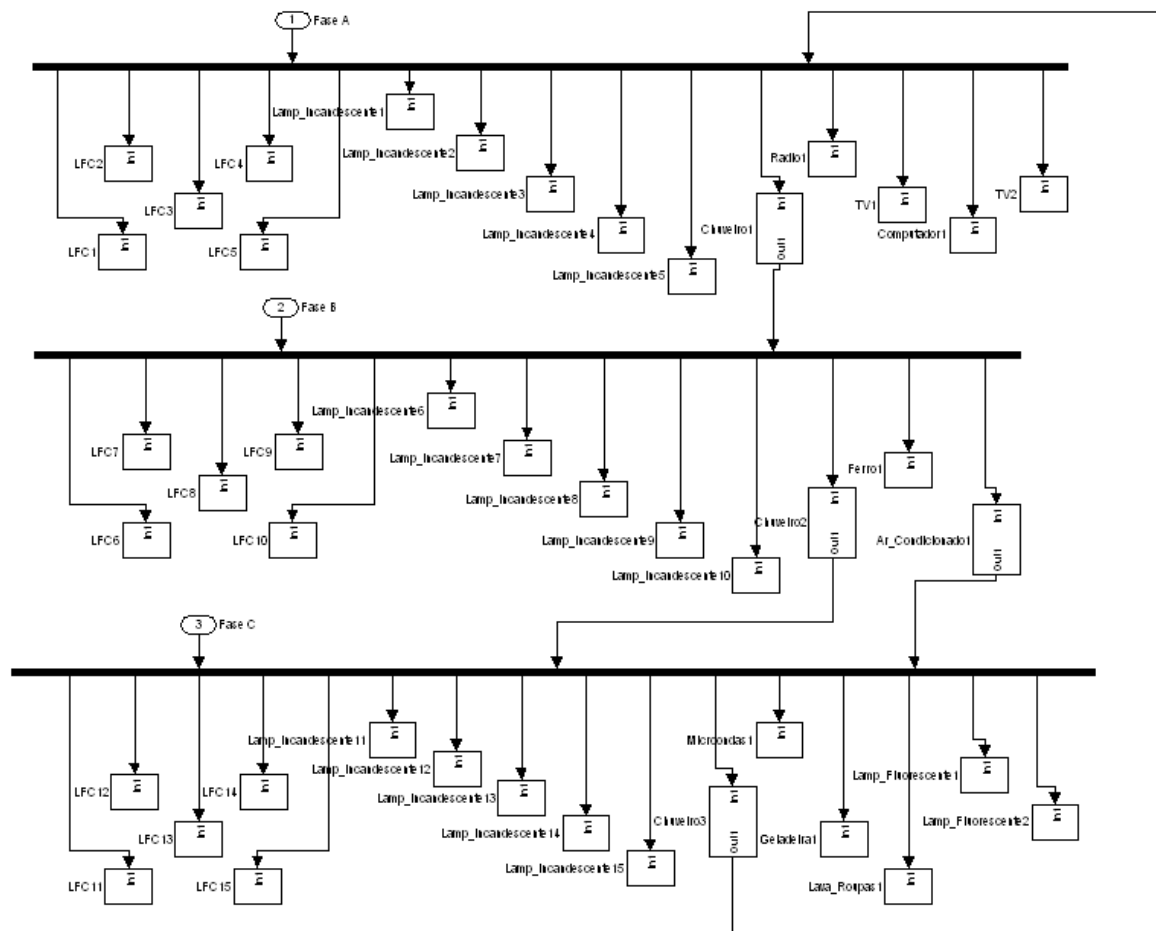


Figura VI.4 – Residência tipo 3

### VI.4.2. MODELOS DE GRUPOS RESIDENCIAIS

Tais modelos foram concebidos de tal forma que os três tipos de residências pudessem ser representados em cada uma das fases do sistema. O número de residências em um determinado grupo pode variar, sendo este número dependente do tamanho do sistema que se deseja simular. A Figura VI.5 mostra o diagrama de blocos de um grupo contendo 7 residências, sendo três do tipo 1, três do tipo 2 e uma do tipo 3.

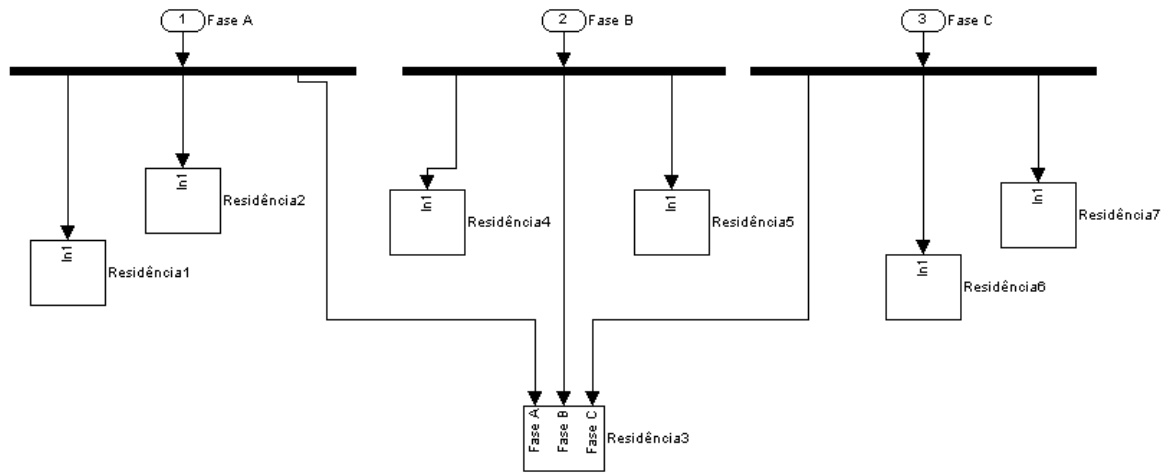


Figura VI.5 – modelo de um grupo residencial

### VI.4.3. MODELOS DE RAMAIS SECUNDÁRIOS

De posse dos modelos de residências e de grupos residenciais, torna-se possível elaborar um ramal secundário podendo ser este tanto monofásico quanto trifásico.

A título de exemplo para este texto, um pequeno ramal secundário foi elaborado, o qual está representado pela Figura VI.6.

No caso, três grupos residenciais são alimentados por três fontes de tensão monofásicas, 127 V, constituindo uma fonte equilibrada, simétrica e com certa distorção harmônica. Na realidade, no lugar das fontes de tensão representadas na Figura VI.6, deveriam estar os transformadores de distribuição, normalmente de 13.800 – 220/127 V.

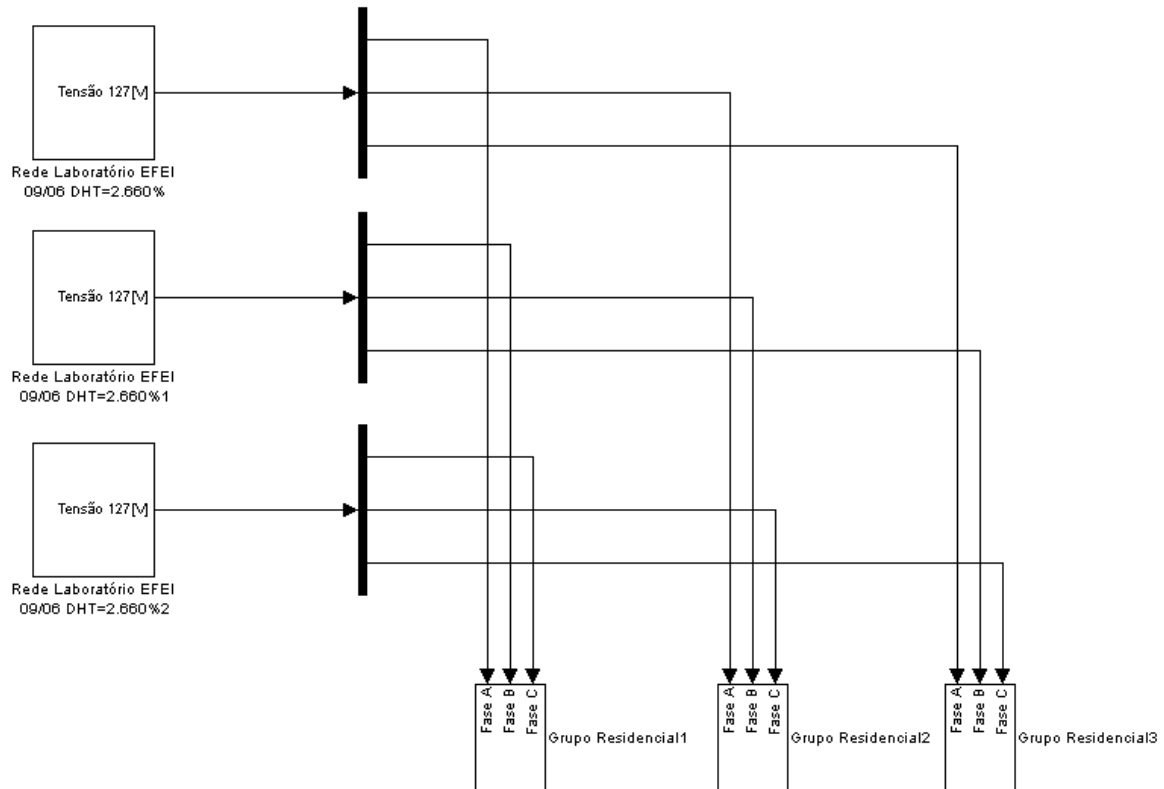


Figura VI.6 – modelo de ramal secundário

#### VI.4.4. MODELOS DE RAMAIS SECUNDÁRIOS COM TRANSFORMADORES

Em um sistema de distribuição, partindo da subestação principal, a energia é entregue ao consumidor por meio de cabos de média tensão (MT), transformadores e cabos de baixa tensão (BT). Foram feitas as seguintes considerações práticas:

(i) Quanto aos condutores

Em distribuição aérea, na MT são normalmente utilizados cabos multiplexados (multiplex) isolados ou não, com bitolas que podem variar de  $50 \text{ mm}^2$  a  $185 \text{ mm}^2$ .

Na baixa, isso também é feito por meio de cabos multiplex 4 fios, sendo que as bitolas mais utilizadas são de  $16 \text{ mm}^2$  e  $35 \text{ mm}^2$ . As derivações para os medidores das residências alimentadas por sistema trifásico são também feitas com cabos multiplex 4 fios. Para residências com alimentação monofásica isto é feito por meio de cabos duplex 2 fios. Entre o medidor de energia e o quadro principal (QD) normalmente são utilizados cabos isolados em condutos fechados não metálicos. Para os circuitos internos normalmente são utilizados fios  $2,5 \text{ mm}^2$ , sendo que os chuveiros são alimentados por fios 4, 6 ou  $10 \text{ mm}^2$ .



Quando a alimentação é subterrânea, podem ser utilizados cabos de cobre, triplex, bitola 240 mm<sup>2</sup>, classe 12/20 kV, isolado em EPR ou XLPE para o nível 13,8 kV e cabo de alumínio, unipolar, bitola 240 mm<sup>2</sup>, classe 0,6/1,0 kV, isolação XLPE para o nível 127/220 V. Neste caso, a alimentação de baixa tensão atinge a caixa de entrada de um determinado prédio, e daí derivam as alimentações para os apartamentos e salas.

A partir destas considerações práticas, pesquisou-se as impedâncias de cabos em catálogos, manuais de concessionárias e diversas informações foram solicitadas às empresas de distribuição, principalmente à Light Serviços de Engenharia, a maior interessada nesta pesquisa.

Assim, para fins de modelagem, têm sido considerados comprimentos típicos médios para os ramais secundários, tais como:

- Circuito entre Medidor e QD – comprimento médio: 10 metros
  - Residências com alimentação monofásica – até 10 kW – cabo 16 mm<sup>2</sup>.
  - Residências com alimentação trifásica – até 75 kW – cabo 35 mm<sup>2</sup>.
- Circuito entre Medidor e QD – comprimento médio: 15 metros
  - Apartamento com alimentação monofásica – até 10 kW – cabo 16 mm<sup>2</sup>.
  - Apartamento com alimentação trifásica – até 75 kW – cabo 35 mm<sup>2</sup>.
- Cabo de derivação da rede aérea de BT (poste) até medidor - comprimento médio: 20 metros
  - Residências com alimentação monofásica – cabo duplex 16 mm<sup>2</sup>.
  - Residências com alimentação trifásica – cabo multiplex 35 mm<sup>2</sup>.
- Cabo da linha aérea de distribuição da concessionária em BT (alimentador com início na saída BT do transformador) – cabo multiplex 3 x 1 x 70 + 70 mm<sup>2</sup> – diversas comprimentos (média 500 metros)
- Cabo subterrâneo deste o transformador até quadro geral do prédio – comprimento médio – 100 m.
- Cabo aéreo entre residências – média de 15 metros.

(ii) Quanto aos transformadores

Os transformadores de distribuição têm uma ampla gama de potência, com variações de empresa para empresa. Normalmente são encontrados com potências entre 45 kVA a 225 kVA e com relação 13.800 – 220/127 V, conexão delta-estrela. Além da potência, tensões da MT e BT, tipos de conexão e defasamento angular, são necessários os valores das impedâncias do ramo magnetizante e das impedâncias dos enrolamentos primário e secundário. Estas impedâncias foram obtidas a partir dos dados de ensaio em vazio e ensaio em curto-circuito de transformadores de distribuição [Tr84]. A Figura VI.7 apresenta o modelo de transformador utilizado nas simulações, seu circuito equivalente e uma janela para fornecimento dos parâmetros necessários à simulação.

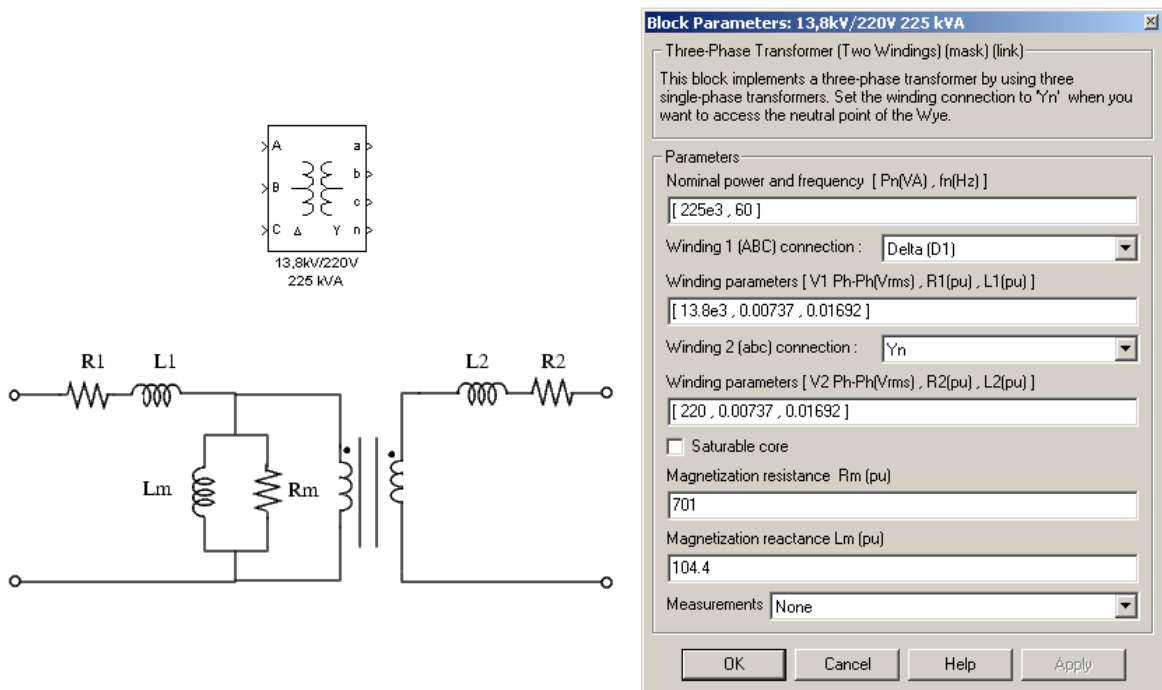


Figura VI.7 - Transformador de distribuição

Não foi utilizado o transformador com núcleo saturável devido à necessidade de valores de fluxos magnéticos e respectivas correntes, valores estes não disponíveis.

Por sua vez, a Figura VI.8 mostra o esquema básico de um ramal secundário com transformador trifásico 13.800 – 220/127 V, delta-estrela, alimentando um grupo de 6 residências. Nesta figura estão também representadas as impedâncias dos cabos secundários, das derivações, bem como as possíveis impedâncias entre residências ou grupo de residências.

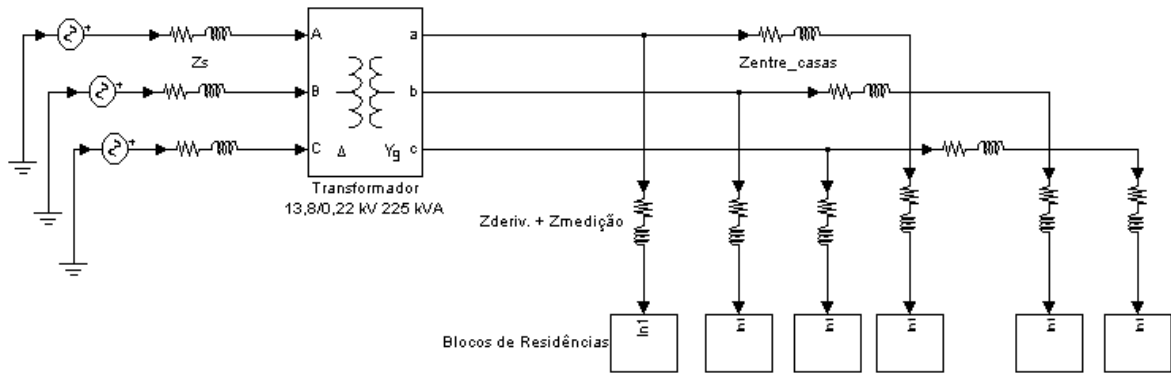


Figura VI.8 – ramal secundário com transformador

#### VI.4.5. MODELOS DE ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

Um alimentador primário consiste de uma rede trifásica (ou monofásica) de MT, alimentando vários transformadores com suas respectivas cargas. A distância média considerada entre transformadores foi de 120 metros. Através dos dados obtidos das concessionárias e de catálogos, foram representadas nos modelos computacionais, a impedância do sistema, as impedâncias dos cabos de MT entre transformadores, a impedância do alimentador geral, bem como as impedâncias dos cabos de BT.

Para as diversas simulações, a potência de curto-circuito utilizada foi fornecida pela Light Serviços de Eletricidade S.A. do Rio de Janeiro, correspondente a uma linha de alimentação da Barra da Tijuca. Este valor é de  $147,25 \angle -89,42^\circ$  MVA.

A Figura VI.9 exemplifica o diagrama de blocos construído no simulink, para a simulação de um alimentador primário e seis ramos secundários com seus transformadores, cargas e medidores do simulink para obtenção das grandezas elétricas.

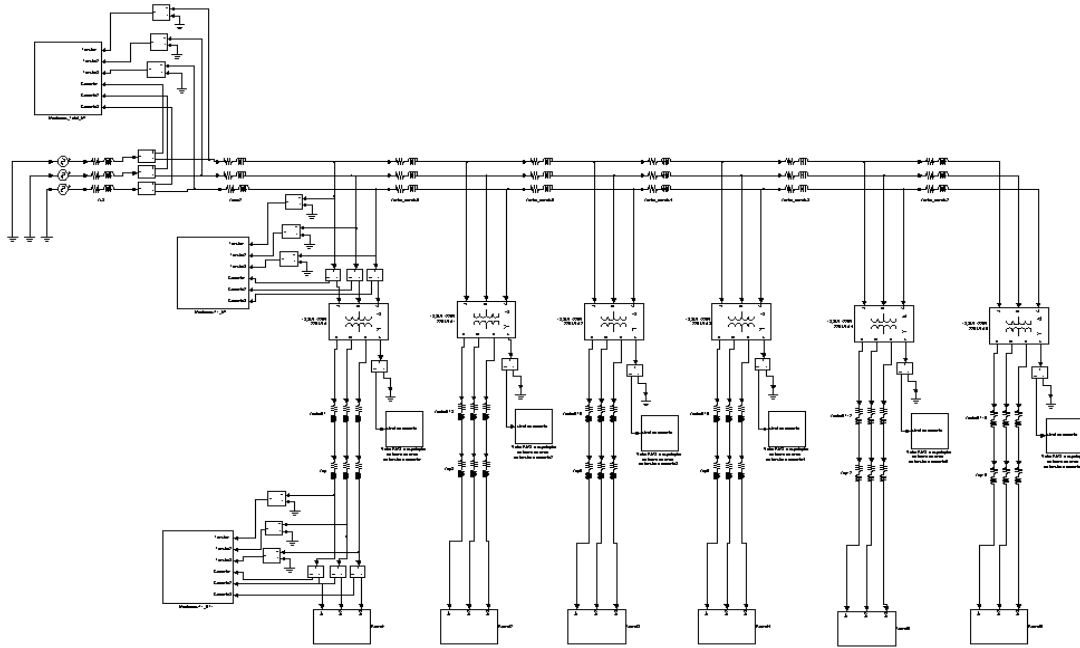


Figura VI.9 – modelo de alimentador primário

#### VI.4.6. MODELOS DE SISTEMAS

Finalmente, um ou mais alimentadores primários podem ser elaborados, conectando-os a uma barra de média tensão, saída da subestação de distribuição. Nos modelos trabalhados, esta será representada por uma fonte equivalente por trás de uma impedância. Esta impedância foi representada a partir dos dados de potência de curto-circuito da barra, conforme já indicado na subseção VI.4.5.

Cabe aqui mencionar que para este trabalho de dissertação, as simulações e análises de seus resultados focaram apenas um alimentador primário, conforme será mostrado no próximo capítulo.

Para fins ilustrativos, a Figura VI.10 é a representação do que seria uma barra de subestação da qual deriva vários alimentadores de MT.

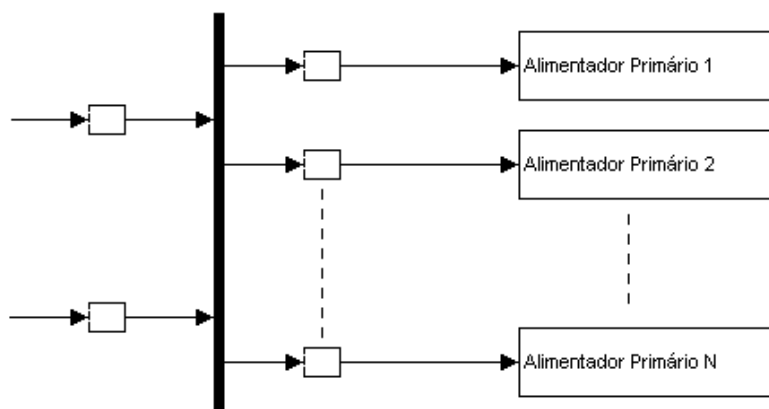


Figura VI.10 – modelo de sistema

## VI.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os modelos computacionais para representação das cargas residenciais, ramais, alimentadores e sistemas. Estes elementos foram baseados em dados obtidos nas etapas anteriores (medição e simulação de cargas), nas considerações de pesquisas realizadas pela Eletrobrás-Procel e CEMIG e na prática das instalações de redes de distribuição das concessionárias. Quanto aos dados técnicos dos diversos componentes do sistema elétrico, tais como cabos elétricos e transformadores, estes foram obtidos junto às concessionárias e fabricantes.

Os modelos com seus devidos parâmetros foram então utilizados nas diversas simulações, que serão descritas no próximo capítulo.

## **VII. SIMULAÇÕES DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **VII.1. CONDIÇÕES INICIAIS**

Com os dados fornecidos pela Light e coletados em catálogos, tais como impedância de curto-circuito, parâmetros de transformadores, resistências e reatâncias de cabos, dentre outros, partiu-se para a parametrização dos modelos e a simulação de casos.

Inicialmente foram simulados modelos de ramais secundários com transformadores alimentando grupos de residências com as cargas agrupadas, sendo que as quantidades de cargas, de eletrodomésticos e de lâmpadas foram ajustadas para diferentes situações.

Com o objetivo de ampliar o sistema a ser simulado, partiu-se para os modelos de alimentadores de MT com vários ramais.

Para os primeiros casos, as cargas foram uniformemente distribuídas pelas três fases constituindo um sistema com carga equilibrada.

No entanto, tal situação é bem diferente da realidade, uma vez que o perfil de carga em uma única residência, para um determinado instante, é algo que pode ser totalmente aleatório.

Buscando então modelos que retratem melhor a realidade, um programa de aleatoriedade de funcionamento de cargas residenciais foi elaborado. Este programa, baseado no método de Monte Carlo [Mc95], constituiu-se então em parte integrante do modelo de simulação que considera o perfil destas cargas como será descrito neste capítulo.

### **VII.2. SIMULAÇÕES COM CARGAS EQUILIBRADAS**

#### **VII.2.1. EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DE LIS POR LFCS COMBINADAS COM OUTRAS CARGAS**

Seja um modelo de ramal secundário com um transformador de 225 kVA, 13,8 – 0,22/0,127 kV, DY11, alimentando seis grupos de residências num total de 60 residências do tipo 2, conforme mostrado na Figura VI.8. Utilizando tal modelo, diversas simulações foram realizadas a fim de demonstrar os efeitos da substituição de LIS por LFCs, estando outras cargas também presentes. Para os resultados que serão mostrados a seguir, foram

consideradas 20 casas por fase sendo que cada fase continha as seguintes cargas em funcionamento: 128 lâmpadas, 14 TVs, 4 aparelhos de som, 10 geladeiras e 6 LFTs.

Este carregamento corresponde a 80% do total de lâmpadas, 70% de TVs, 20% de aparelhos de som, 50% de geladeiras e 30% de LFTs, um horário típico noturno.

Mantendo-se fixos os demais eletrodomésticos, variou-se a quantidade e o tipo de lâmpada, de modo a obter resultados primeiramente com 100% de LIs de 60 W, depois 50% de LIs e 50% de LFCs de 20 W e, finalmente, 100% de LFCs.

Tais simulações conduziram aos resultados mostrados na Tabela VII.1

Tabela VII.1 – Resultado comparativo - sistema com LIs e LFCs

Grandeza	100% LI		50% LI / 50% LFC		100% LFC	
	BT	MT	BT	MT	BT	MT
DHT <sub>v</sub> (%)	0,75	0,01	1,36	0,01	2,65	0,03
DHT <sub>i</sub> (%)	6,25	3,51	22,57	12,95	63,28	37,47
V <sub>rms</sub> (V)	125,8	7955	126,1	7955	126,3	7955
I <sub>rms</sub> (mA)	77.510	1244	58.200	923,1	42.230	619,8
P. ativa (W)	9605	9695	7039	7107	4395	4448
P. reativa (Var)	1572	1939	1281	1587	981,4	1239
P. distorção (VA)	596	361	1626	944	2861	1728
P. aparente (VA)	9751	9893	7337	7343	5335	4930
Fator de potência	0,985	0,980	0,959	0,968	0,824	0,902

Como era esperado, a substituição gradativa de LIs por LFCs provoca um aumento das distorções harmônicas de corrente e de tensão no sistema como pode-se observar na Tabela VII.1 e na Figura VII.1. O reflexo na MT é bem menos sentido devido ao aprisionamento das harmônicas homopolares no delta do transformador e à potência de curto-circuito do sistema em análise.

Embora aconteça degradação da forma de onda das correntes, irá ocorrer também uma redução no carregamento do sistema com a substituição das LIs por LFCs, e esta redução é mais significativa do que os efeitos da degradação. Isto pode ser verificado pelas reduções das potências ativas e aparentes, bem como da corrente elétrica. Em outras palavras, o aumento da corrente elétrica devido à distorção harmônica é pequeno perante a substancial redução de sua componente ativa, pois as cargas não lineares agregadas (LFCs) apresentam baixas correntes.

De qualquer modo, verifica-se uma piora no fator de potência do sistema, que passou de 0,980 para 0,902 na MT. A potência aparente e o fator de potência foram calculados usando as expressões (6) e (11) do segundo capítulo.

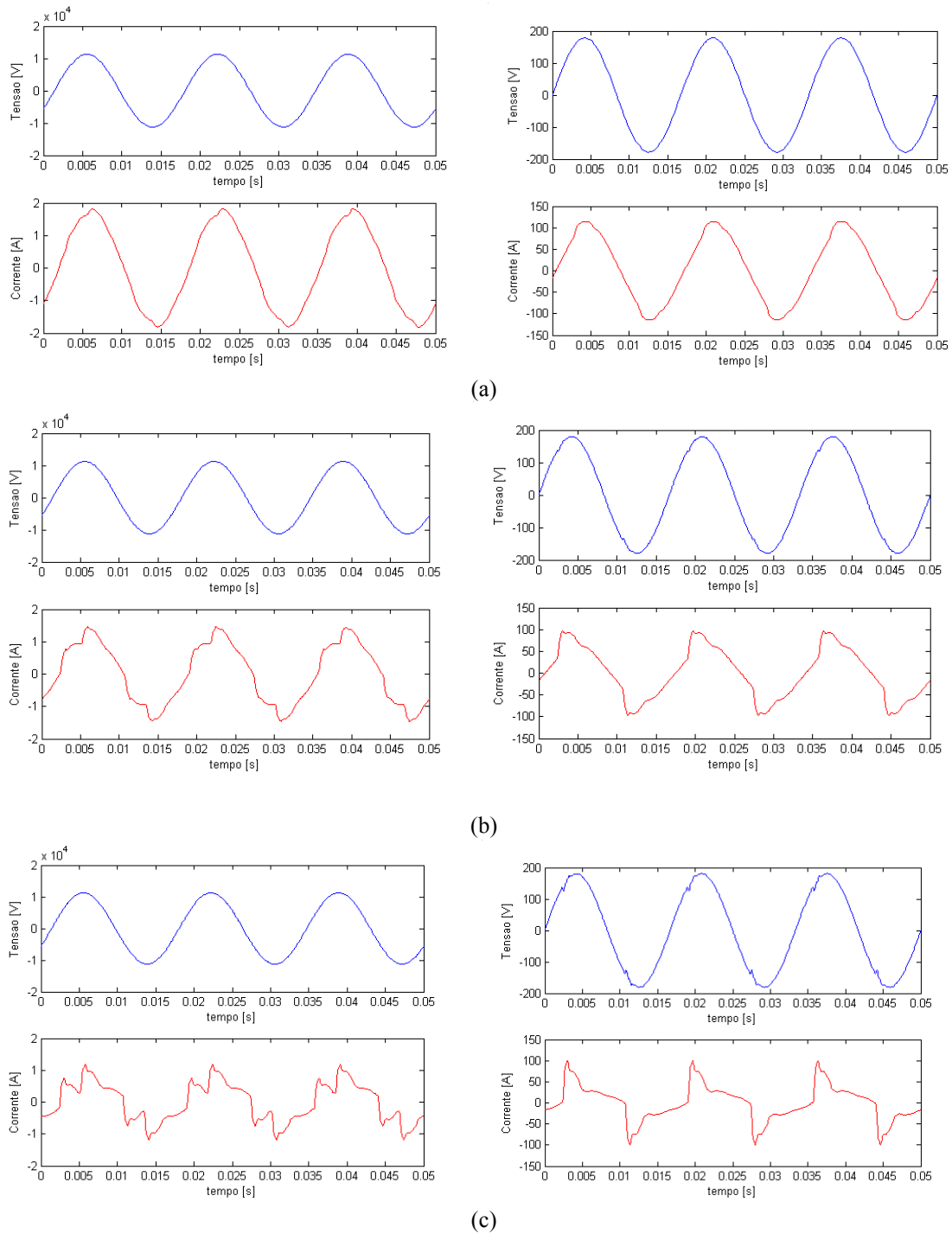


Figura VII.1 – Formas de onda da tensão e corrente da MT e BT para (a) 100% LI (b) 50% LI e 50% LFC (c) 100% LFC

### VII.2.2. EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DAS LIs POR LFCs COMBINADAS COM OUTRAS CARGAS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO O PERFIL DE CONSUMO HORÁRIO

Nas próximas simulações procurou-se trabalhar com um sistema mais ampliado, especificamente um alimentador de MT e seis ramais secundários conforme Figura VI.9.



As cargas foram consideradas equilibradas, sendo que cada transformador alimenta 180 apartamentos, sendo 60 por fase, num total de 1080 apartamentos. Como a residência tipo 2 (vide item VI.3) representa 72% das residências na região sudeste, optou-se por este modelo para a realização das simulações.

Os blocos de medição foram colocados no lado de baixa tensão (BT) (próximos à carga), no primário dos transformadores ( $MT_t$ ) e no alimentador principal ( $MT_g$ ), como foi mostrado na Figura VI.9.

Considerando a dificuldade do simulink em trabalhar com muitos blocos, como é o caso de 1080 apartamentos, cada qual com diversas cargas, o que tornaria o programa muito lento, optou-se em trabalhar com grupos de residências. Para isso, os 60 apartamentos em cada fase tiveram suas cargas agregadas.

Assim, quando acionadas, por exemplo, 10 TVs em uma fase, estas se comportarão como uma única TV com amplitude de corrente multiplicada por 10, mantendo-se os mesmos ângulos de fase. Tal situação leva a resultados conservadores.

Sabe-se que o perfil de carga de uma residência ou de um grupo de residências é fortemente dependente da hora do dia. Assim, por exemplo, é mais provável que um microonda esteja ligado no período do almoço do que no período da madrugada. Este tipo de informação pode ser extraído das curvas de carga dos eletrodomésticos.

Deste modo, com o objetivo de realizar simulações que retratassem melhor a realidade horária, informações sobre o funcionamento das cargas foram utilizadas.

Porém, as primeiras simulações foram feitas sem que houvesse um processo automático que considerasse uma aleatoriedade de funcionamento das diversas cargas elétricas ao longo do dia. Ao invés disto, tornando o processo mais simples, o perfil diário de consumo foi dividido em 7 períodos ao longo das 24 horas do dia. Estes 7 períodos foram baseados nas curvas de carga e hábitos de consumo da região sudeste [E189, Ce00].

A Tabela VII.2 apresenta tais períodos, sendo que cada um deles tem o seu próprio número de horas.

Tabela VII.2 – Períodos para simulação

<b>Período</b>	<b>Horários</b>
P1 (madrugada)	0:00 h - 6:00 h
P2 (despertar)	6:00 h – 7:00 h
P3 (manhã)	7:00 h – 11:00 h
P4 (Almoço)	11:00 h – 13:00 h
P5 (tarde)	13:00 h – 17:00 h
P6 (Ponta)	17:00 h – 20:00 h
P7 (noite)	20:00 h – 24:00 h

Em cada um dos 7 períodos haverá uma maior ou menor probabilidade de uma determinada carga estar ligada, o que resulta na Tabela VII.3.

Tabela VII.3 – Cargas selecionadas por período

<b>Cargas</b>	<b>Períodos</b>						
	1	2	3	4	5	6	7
LI/LFC	X	X	X	X	X	X	X
Geladeira	X	X	X	X	X	X	X
Chuveiro		X				X	
Ferro			X		X		
TV 20"	X	X	X	X	X	X	X
Aparelho de som			X	X	X	X	X
LFT		X	X	X	X	X	X
Máquina de lavar			X		X		
Microondas				X		X	

Por sua vez, a Tabela VII.4 irá informar o percentual de cargas ligadas para cada período estabelecido. Estes percentuais probabilísticos foram também baseados nos estudos dos perfis de carga.

Assim, tomando como exemplo o período 7, ter-se-á 46% das lâmpadas ligadas, 50% das geladeiras, 65% das TVs, e assim por diante. Como existe uma TV por apartamento, isto significa que no período 7, serão 702 TVs ligadas do total de 1080.

Tabela VII.4 – Percentuais de cargas ligadas em cada horário

<b>CARGAS</b>	<b>P1(%)</b>	<b>P2(%)</b>	<b>P3(%)</b>	<b>P4(%)</b>	<b>P5(%)</b>	<b>P6(%)</b>	<b>P7(%)</b>
LI/LFC	10	5	3	3	3	35	46
Geladeira	50	50	50	50	50	50	50
Chuveiro	-	2	-	-	-	13	-
Ferro	-	-	6	-	13	-	-
TV 20"	30	6	10	17	22	40	65
TV 29"	-	-	-	-	10	20	30
Computador	30	-	10	-	25	30	40
Ap. de som	-	-	37	46	30	22	13
LFT	4	3	1	1	1	22	43
Máq. lavar	-	-	20	-	4	-	-
Microondas	-	-	-	7	-	9	-
Ar cond.	30	-	-	-	-	15	30

Na Tabela VII.4, as faixas sombreadas, representam cargas que não estão presentes na residência tipo 2. Elas irão aparecer somente na residência tipo 3.

Baseado nestas aproximações, foram então realizadas diversas simulações para cada período que compõem a Tabela VII.2. Para cada um, as LIs de 60 W ligadas eram então substituídas por LFCs de 20 W, compondo três diferentes simulações, ou seja, 100% LI, 50% de LI e 50% de LFC e 100% de LFC.

Como o número de simulações e, conseqüentemente, os resultados são muitos, dois períodos foram escolhidos para apresentação neste texto. São os períodos 6 e 7. O período 6, além de ter um forte carregamento de cargas não lineares, corresponde ao horário de ponta, sendo motivo de preocupação das empresas concessionárias. O período 7 corresponde ao horário mais crítico em termos de carregamento de cargas não lineares.

### VII.2.2.1 SIMULAÇÃO NO PERÍODO 6

O período 6, das 17:00 às 20:00 hs, corresponde a horários com grandes percentuais de cargas não lineares. Neste período, tem-se 35% de lâmpadas, 40% de TVs, 22% de aparelhos de som, 13% de chuveiros e 22% de LFTs além de aparecer o uso do microondas (9%).

O total de lâmpadas ligadas, 35%, representa, neste caso, 168 lâmpadas por fase para cada transformador de um total de 480.

A Tabela VII.5 fornece um retrato das grandezas elétricas do sistema, iniciando com todas as LIs ligadas, passando para 50% de LI e 50% de LFC e, finalmente, sendo todas as LIs substituídas por LFCs.

Tabela VII.5 – Resultados de simulação no período 6

Distr. carga	DTHi (%)		DHTv (%)		FP <sub>v</sub>		I <sub>rms</sub> (A)		Ineutral (A)	P kW	Q kVar	S kVA	D kVA
	MT	BT	MT	BT	MT	BT	MT	BT	BT	1 trafo – valores por fase, na BT			
100% LI	1,3	5,8	0,02	0,64	0,984	0,990	7,51	469,7	79,17	57,7	7,64	58,3	3,35
50% LI	2,3	8,2	0,03	1,00	0,984	0,988	7,07	442,7	103,50	54,3	7,25	55,0	4,55
100% LFC	4,2	11,3	0,03	1,56	0,984	0,985	6,63	416,0	130,00	51,0	6,85	51,8	5,93

Mesmo no pior caso, em termos de carregamento de cargas não lineares (100% LFC), os valores do fator de potência estão próximos da unidade, mostrando que cargas lineares pesadas como os chuveiros, amenizam os efeitos da distorção harmônica das demais cargas não lineares.

Com a substituição de todas as LIs por LFCs tem-se uma redução em torno de 11% na corrente elétrica, na potência ativa e na potência aparente, para este caso estudado.

A seguir serão mostradas as formas de onda de tensão e corrente na média e baixa tensão onde se observa pouca alteração com o aumento das LFCs.

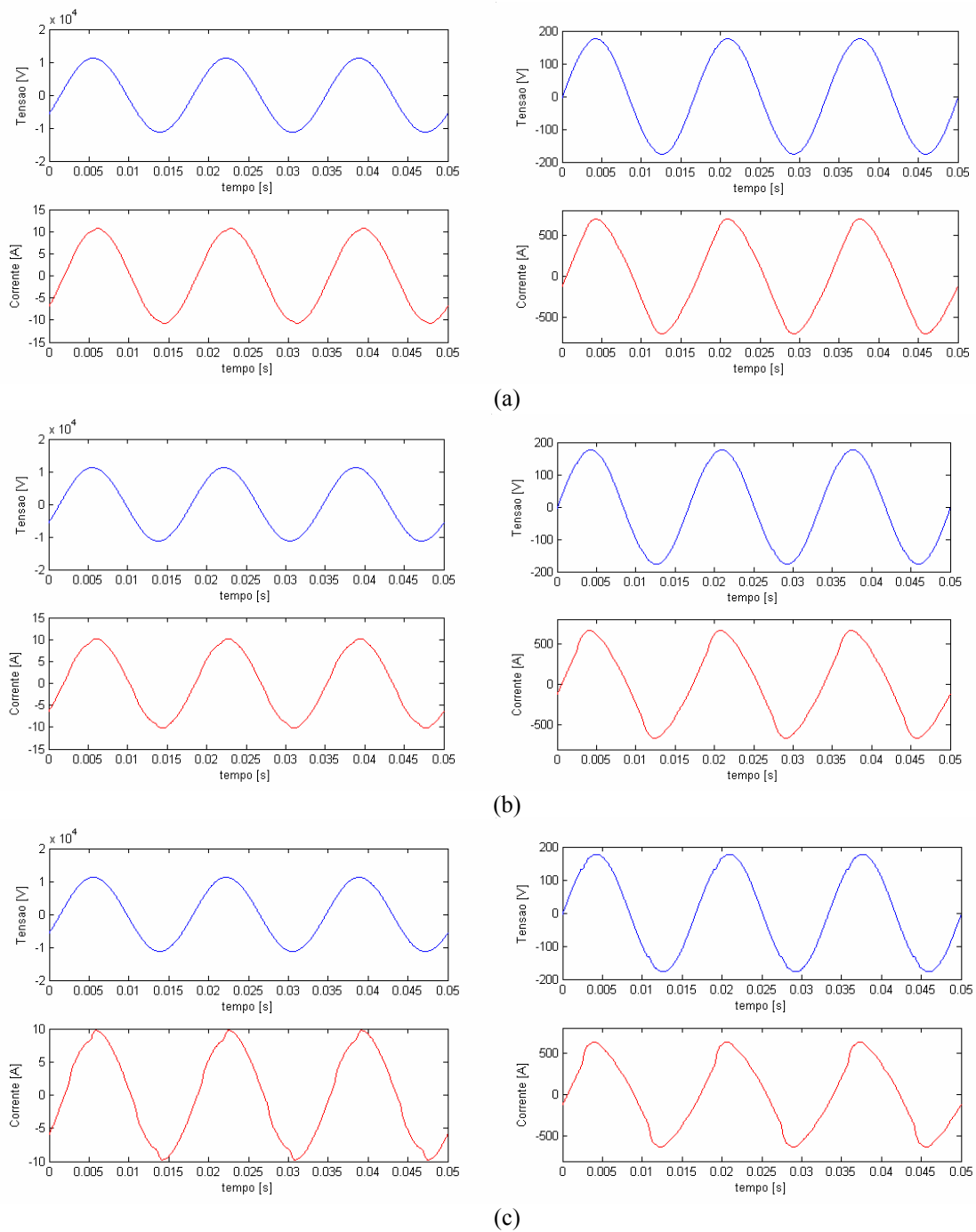


Figura VII.2 – Formas de ondas - período 6 – lado MT e lado BT: (a) 100% LI ; (b) 50% LI e 50% LFC ; (c) 100% LFC .

Mesmo com as cargas do sistema consideradas equilibradas, existirá corrente de neutro, sendo esta única e exclusivamente causada pelas distorções harmônicas provenientes das cargas não lineares (harmônicos homopolares). A corrente de neutro

máxima é de 130 A, quando apenas LFCs estiverem ligadas. Este valor corresponde a 31,3% da corrente de fase.

Observando-se as formas de onda das correntes de neutro na Figura VII.3, verifica-se um gradativo aumento e deformação das mesmas à medida que LIs são substituídas por LFCs.

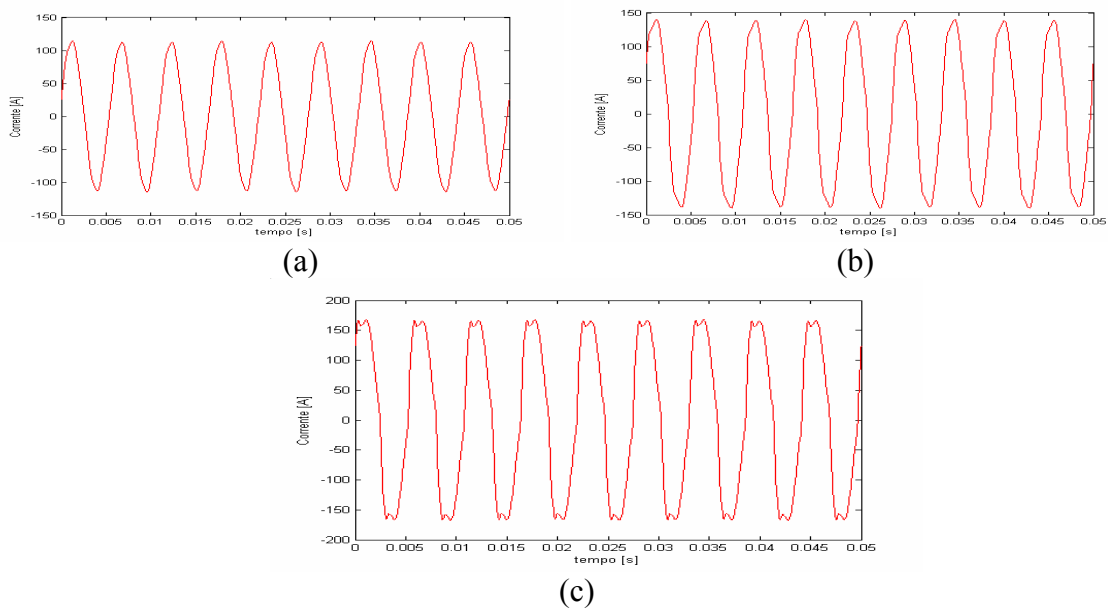


Figura VII.3 – Forma de onda - corrente de neutro - período 6 - (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC

### VII.2.2.2 SIMULAÇÃO NO PERÍODO 7

O 7º período é o noturno entre 20:00 h e 24:00 h quando há uma elevação na iluminação atingindo 46% das lâmpadas existentes ligadas. Além disto há um aumento no uso das TVs para 65% e aumento no uso das LFTs para 43%, configurando assim a condição mais forte de carga não linear.

A Tabela VII.6 apresenta os resultados.

Tabela VII.6 – Resultados de simulação no período 7

Distr. carga	DTHi (%)		DHTv (%)		FP		I <sub>rms</sub> (A)		Ineutral (A)	P kW	Q kVAr	S kVA	D kVA
	MT	BT	MT	BT	MT	BT	MT	BT	BT	1 trafo – valores na BT, por fase			
100% LI	3,7	5,42	0,02	0,39	0,907	0,922	3,06	188,3	21,77	21,8	9,07	23,6	1,30
50% LI	8,9	15,4	0,04	0,95	0,873	0,885	2,50	154,3	56,88	17,1	8,53	19,4	3,01
100% LFC	20	33,8	0,06	1,92	0,803	0,798	1,99	124,6	95,46	12,5	8,00	15,7	5,02

Com a substituição das LIs por LFCs observa-se um aumento da potência de distorção e, mesmo sendo pequena a variação da potência reativa, conseqüente queda do fator de potência, que fica acima de 0,92 apenas na condição 100% LI na BT.

Apesar do aumento das componentes harmônicas, a corrente eficaz total sofre uma forte redução (33,8%) configurando um alívio para o sistema. Assim, o aumento de corrente devido à distorção harmônica é irrelevante frente à redução total da corrente eficaz. A Tabela VII.7 confirma este fato pois, mostra que na BT, a parcela da corrente devido aos harmônicos cresce de 10,1 para 39,4 A, enquanto a componente fundamental decresce de 188,1 para 118 A.

Tabela VII.7 - Comparativo entre corrente eficaz, corrente fundamental e corrente harmônica

Tensão/ Carga	Média tensão			Baixa tensão		
	$I_1$ (mA)	$I_{rms}$ (mA)	$\Sigma I_h$ (mA)	$I_1$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$\Sigma I_h$ (A)
100% LI	3052	3060	112	188,1	188,3	10,1
100% LFC	1950	1990	372	118,0	124,6	39,4

Quanto à tensão, mesmo neste pior caso de forte presença de cargas não lineares, o nível de distorção está dentro dos patamares recomendados pela norma IEEE 519-1992 [St92], que estabelece máximo de 5% para tensões até 69 kV. Este resultado configura um sistema firme, com razoável capacidade de curto-circuito. Sistemas com capacidades de curto-circuito mais baixas certamente apresentariam distorções maiores.

As cargas não lineares utilizadas, como as LFCs, apresentam fortes componentes de 3º harmônico e seus múltiplos. Estes componentes harmônicos não aparecem nas tensões e nas correntes de linha no lado do delta, pois as cargas estão equilibradas, o que justifica os valores reduzidos de distorções totais do lado de MT em relação ao que ocorre no lado de BT. Como conseqüência, no lado de MT a corrente se apresenta mais alisada.

Cabe enfatizar aqui que a conexão delta-estrela do transformador DY11, utilizado nas simulações, provoca um deslocamento na fase de +30° para as componentes de seqüência negativa (5ª, 11ª,...) e -30° para as componentes de seqüência positiva (1ª, 7ª, 13ª,...).

Na Figura VII.4, observa-se a gradativa deformação da forma de onda da corrente, com algum reflexo na tensão, devido ao aumento das componentes harmônicas.

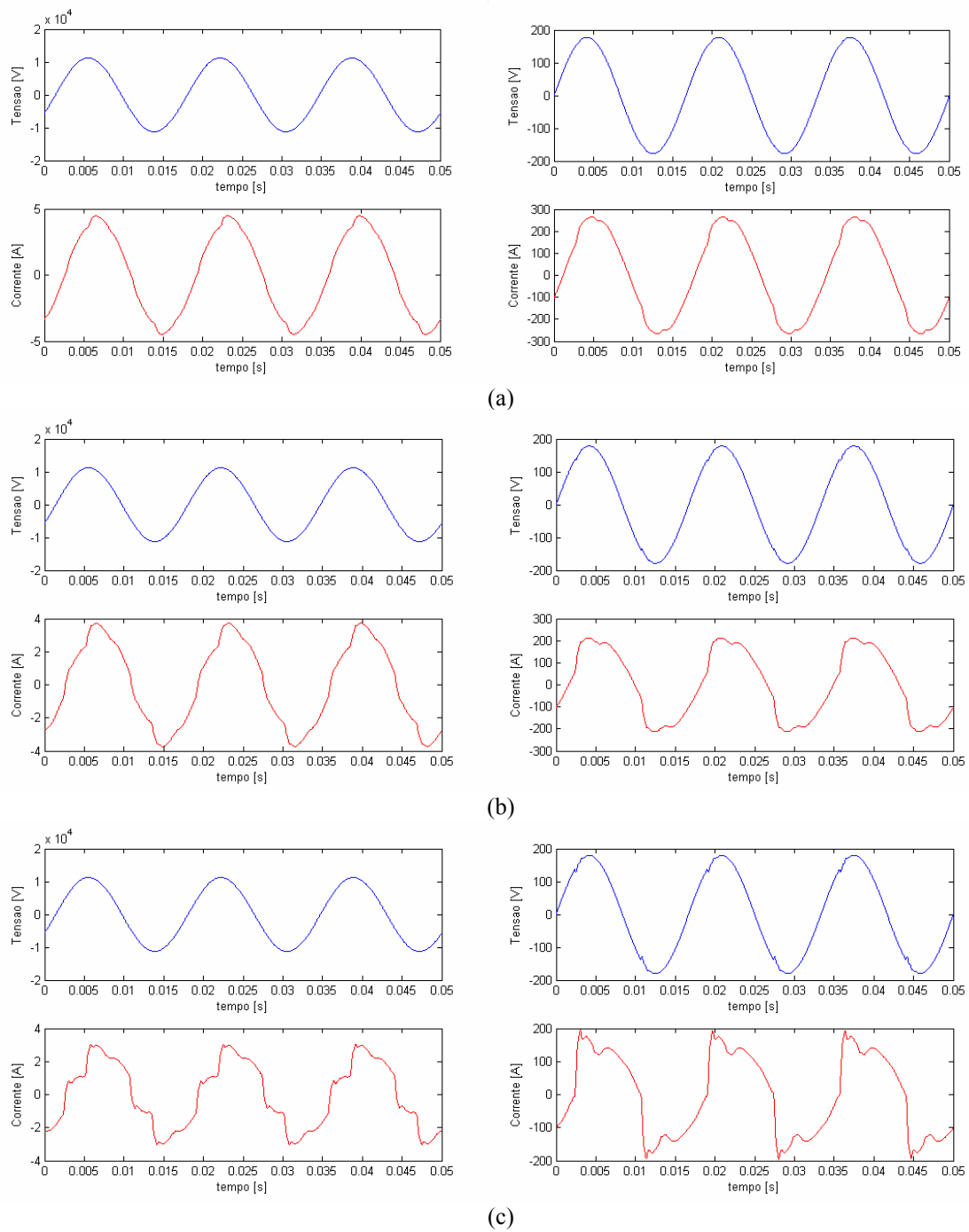


Figura VII.4 – Formas de ondas - - lado MT e lado BT: (a) 100% LI ; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC.



No caso 100% LI, a corrente de neutro corresponde a 11,6% da corrente eficaz de fase, ao passo que no caso 100% de LFC, ela já representa 76,6%, mostrando um acentuado crescimento. Cabe mencionar que qualquer desequilíbrio da carga poderá aumentar ainda mais esta corrente.

Além disso, enfatiza-se que tais correntes de neutro são praticamente de frequência tripla conforme mostram as figuras. Dentre os problemas causados por tais correntes está o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, causado por questões de compatibilidade eletromagnética. A Figura VII.5 apresenta as formas de onda da corrente de neutro, nos 3 casos.

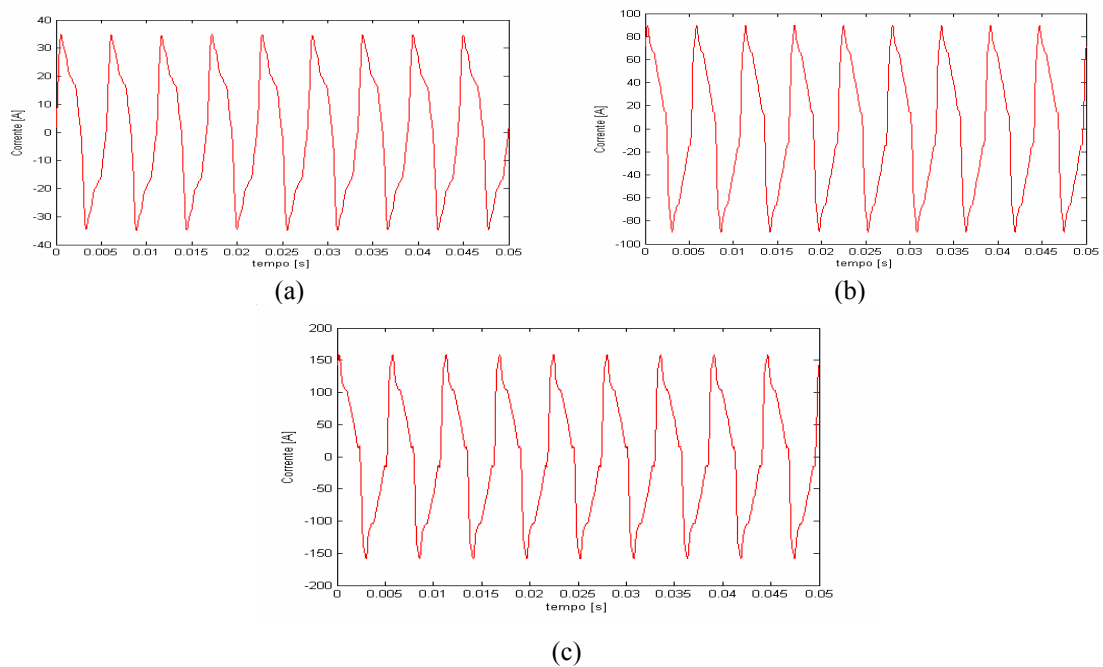


Figura VII.5 – Forma de onda - corrente de neutro - período 7 - (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC; (c) 100% LFC

### VII.3. SIMULAÇÕES CONSIDERANDO A ALEATORIEDADE DAS CARGAS

Conhecer, em um desejado momento, a quantidade de carga em funcionamento de um sistema de distribuição, as suas respectivas distribuições nas fases do sistema e o tempo de funcionamento de cada uma delas é uma tarefa demasiadamente complexa, quiçá impossível.

Visando contribuir para a elaboração de um modelo mais consistente, cuja dinâmica se aproxime de um sistema real, foi desenvolvido um programa no Matlab que simula o comportamento das cargas ao longo do dia, levando-se em conta a aleatoriedade do funcionamento das mesmas. Para que isto se tornasse possível, métodos estatísticos foram usados. No caso deste trabalho foi adotado o método de Monte Carlo [Mc95].

#### VII.3.1. O PROGRAMA DE PERFIL DE CARGAS

O programa tem por objetivo estabelecer a ligação das cargas de um sistema, em um determinado horário escolhido. Estas ligações devem ser feitas obedecendo às curvas de carga que retratam o comportamento individual de cada equipamento ao longo do dia. Pode-se considerar o programa em questão em duas etapas detalhadas a seguir:

*(i) Obtenção das funções de densidade de probabilidade e de distribuição acumulada*

Em primeiro lugar, as curvas de densidade de probabilidades (curvas de cargas) foram obtidas a partir de Pesquisas de Posse de Eletrodomésticos e de Hábitos de Consumo [E189, Ce00], já citadas anteriormente. Para cada carga, foi obtida uma curva de densidade de probabilidade de utilização ao longo do dia.

Como exemplo, o gráfico da Figura VII.6 representa a função de densidade de probabilidade do uso de LFCs para as 24 horas.

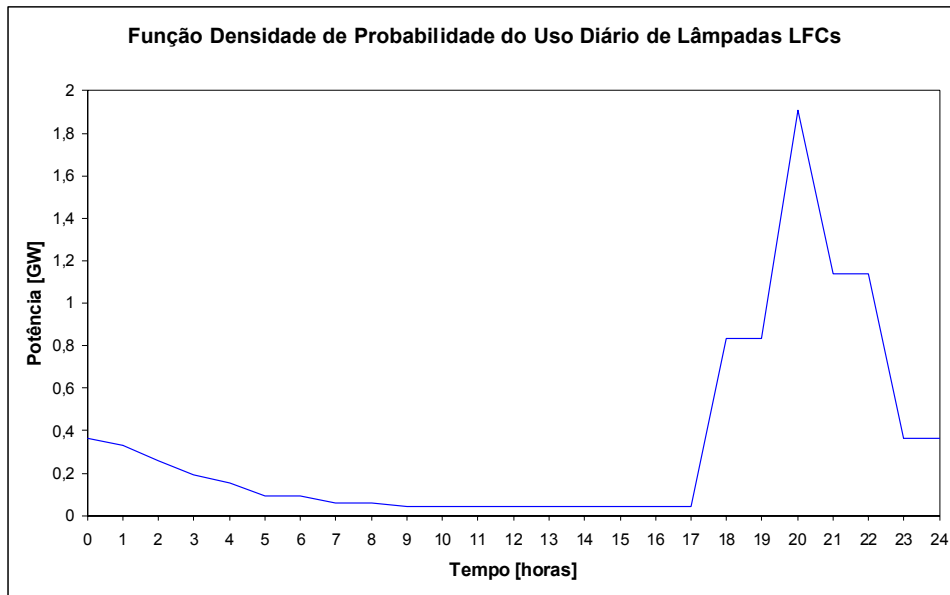


Figura VII.6 – Função densidade de probabilidade do uso diário de LFCs

A partir da função de densidade de probabilidade constrói-se a função de distribuição acumulada, mostrada na Figura VII.7. A mesma é obtida através de uma integração da função de densidade de probabilidade, ou, em outras palavras, a função de densidade representa a área acumulada da curva de carga. A função de distribuição acumulada é normalizada.

Pode-se observar a partir do gráfico da Figura VII.7, que a curva de densidade de probabilidade é, de fato, a derivada da sua acumulada. Portanto, onde se tem maior valor na curva de densidade é, justamente, onde se tem maior inclinação da acumulada.

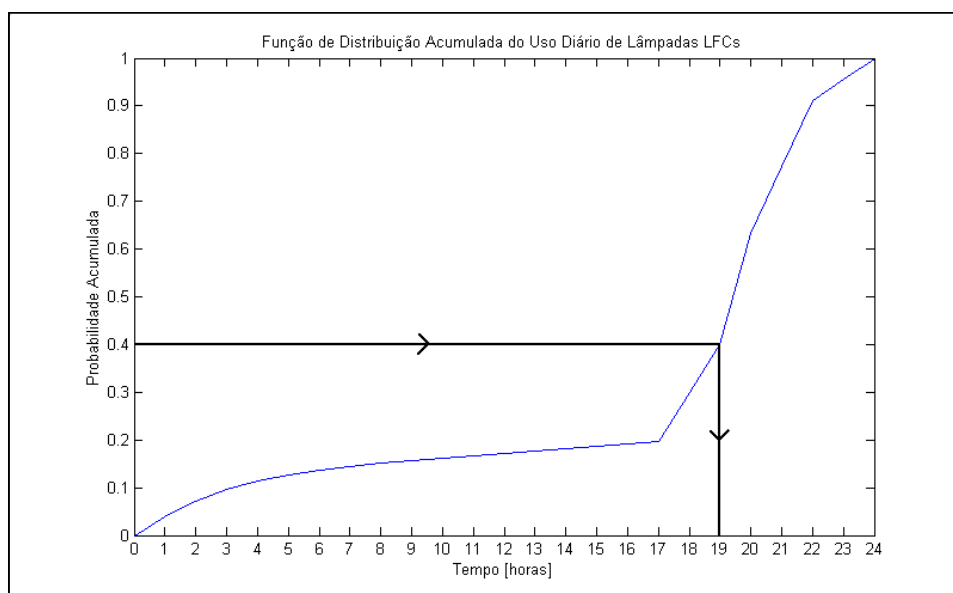


Figura VII.7 – Função densidade acumulada do uso diário de LFCs

(ii) *Obtenção do perfil de uso da carga ao longo do dia utilizando a simulação de Monte Carlo*

A obtenção do perfil de utilização de uma carga ao longo do dia consiste basicamente em dois passos:

- Sorteia-se um número aleatório entre 0 e 1, com distribuição uniforme.
- Com o resultado do sorteio obtém-se pela função de distribuição acumulada o provável horário de ligação da carga, como mostra a Figura VII.7. Por se tratar de uma função discreta, utiliza-se uma interpolação para obtenção do horário.

Seja o exemplo da função mostrada na Figura VII.7, específica para LFCs. Se no sistema a ser simulado existirem 4320 LFCs e for considerado que cada LFC tenha 2 acendimentos diários, ter-se-á 8640 eventos de acendimentos. Neste caso, serão realizados 8640 sorteios de números aleatórios entre 0 e 1, com distribuição uniforme. Através da curva de densidade acumulada, obtém-se os respectivos horários de acionamento de cada evento. Assim, o programa irá calcular quantas LFCs serão ligadas para os diferentes horários do dia, gerando assim uma nova curva de carga, similar à curva original, como mostra a Figura VII.8 a seguir.

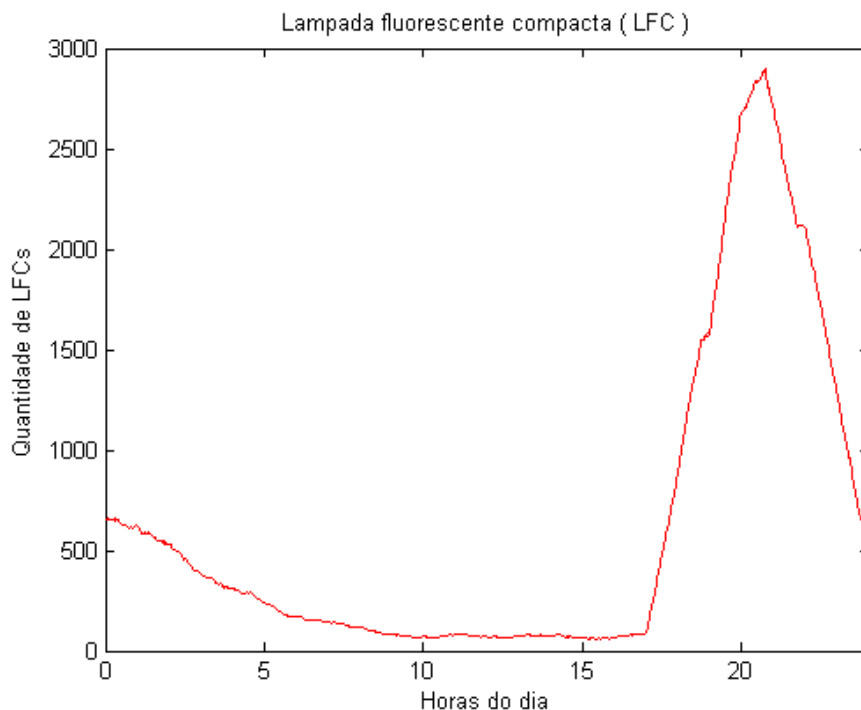


Figura VII.8 – Curva de carga gerada pelo programa

Para cada horário que se deseja simular, a curva gerada pelo programa (Figura VII.8) fornece a quantidade de LFCs que deverão ser ligadas. Assim, por exemplo, às 18:00 h obtém-se no gráfico 1000 LFCs ligadas. Então, o programa promove um novo sorteio, que de forma aleatória, distribui as LFCs pelos transformadores do sistema considerado e pelas suas respectivas fases.

Assim, como para a LFC, o programa responde para todos os tipos de eletroeletrônicos domésticos estudados. Obviamente, o objetivo do programa não é obter curvas de carga, muito embora isto seja possível, mas sim auxiliar a composição da carga antes de iniciar uma simulação. Para isto, o programa concebido permite a escolha de um horário específico ou um período para o qual se deseja analisar os impactos do uso de LFCs.

Uma vez que o programa tenha sido rodado, para aquele instante ou período escolhido pelo usuário, todas as cargas de todas as residências estarão configuradas (o tipo, o estado, a fase e o tempo de permanência ligado), podendo-se em seguida rodar o simulador (simulink) para que os resultados sejam então obtidos.

Finalmente, cabe mencionar que o programa foi concebido com duas importantes características: (i) É possível escolher o percentual/tipo de lâmpada a ser usada, ou seja, 100% LI, 50% LI e 50% LFC e, 100% LFC ou outro percentual desejado. Com esta escolha, poder-se-á comparar resultados da substituição das LIs pelas LFCs. (ii) É possível fazer um levantamento do perfil elétrico do sistema ao longo do dia, contemplando, por exemplo, as distorções totais de corrente e de tensão, corrente de neutro e valores eficazes das correntes e das tensões, como será exemplificado a frente.

### **VII.3.2. SIMULAÇÕES UTILIZANDO O PROGRAMA DE PERFIL DE CARGA**

Dando seguimento às simulações, partiu-se para a análise do mesmo sistema utilizado no item VII.2.2, com 60 apartamentos por fase, porém levando-se em conta a aleatoriedade de funcionamento das cargas.

São muitos os resultados das simulações. Assim, para efeito de apresentação neste capítulo, foram escolhidos os resultados em um período com grande concentração de cargas não lineares. Mais precisamente os resultados a seguir se referem ao horário das 23:00 h.

A título de exemplo, algumas curvas de carga estão apresentadas pela Figura VII.9. Estas curvas foram construídas pelo programa de perfil de carga, considerando o número de componentes do modelo a ser simulado.

Por sua vez, a Tabela VII.8 apresenta, para o horário citado, a distribuição das cargas nas três fases do primeiro transformador, nos casos 100% LI, 50% LFC e 50% LI e 100% LFC. Pode-se observar na tabela o efeito da aleatoriedade das cargas, ou seja, para cada uma das três simulações onde a troca de tipo de lâmpada é efetuada, as cargas não permanecem as mesmas. Isto, a princípio, poderia comprometer a comparação entre os resultados de cada caso, porém, pelo contrário, como é isso que ocorre na prática, o modo de análise seguiu esta tendência sem perder a consistência dos resultados.

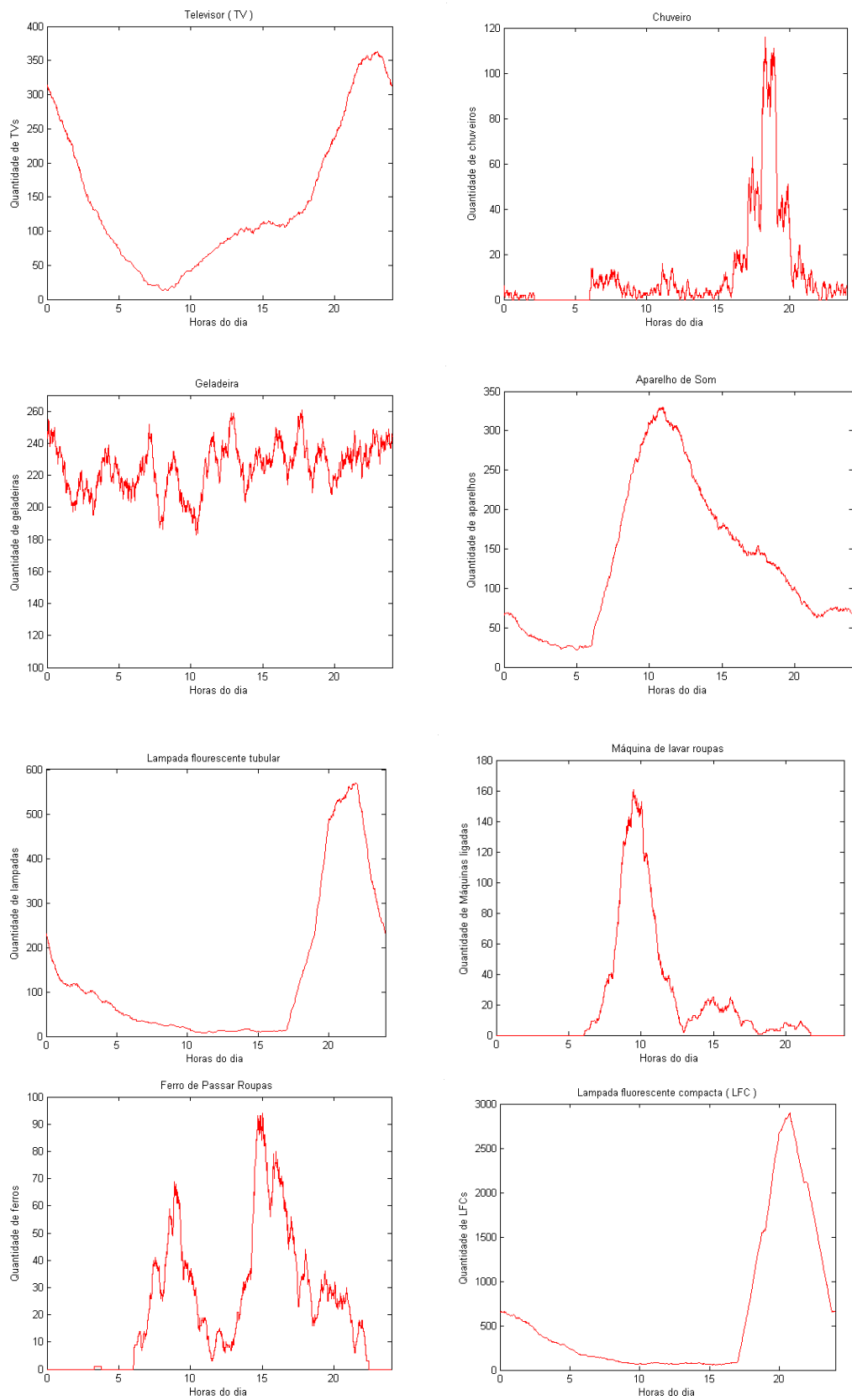


Figura VII.9 - Curvas de carga de diversos eletrodomésticos

Tabela VII.8 – cargas ligadas – 23:00 hs

Cargas/ fases	100%LI			50%/50%			100% LFC		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Ferro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TV	39	37	50	39	50	29	32	27	39
M.ondas	0	0	0	0	0	0	0	0	0
chuveiro	0	1	0	0	0	1	0	2	0
geladeira	29	24	27	17	28	22	22	14	28
Radio	9	7	10	4	7	4	5	4	6
LFT	44	41	32	38	25	36	33	39	26
Lava roupa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LI	137	139	118	65	79	67	0	0	0
LFC	0	0	0	48	75	63	134	128	158

A Tabela VII.9 mostra os valores eficazes das tensões ( $V_{rms}$ ), correntes ( $I_{rms}$ ), corrente de neutro ( $I_n$ ) e as distorções de tensão ( $DHT_v$ ) e de corrente ( $DHT_i$ ) em cada fase. Além disso, a Tabela VII.10 apresenta a distribuição das potências trifásicas envolvidas e os valores dos fatores de potência verdadeiros na BT, na  $MT_t$  e no alimentador geral da rede de 13,8 kV ( $MT_g$ ).

Tabela VII.9 – Valores eficazes de tensão e corrente, corrente de neutro e distorções de tensão e corrente – 23:00 h

Distr. carga		$V_{rms}$ [V]			$I_{rms}$ [A]			$I_n$ [A]	$DHT_i$ (%)			$DHT_v$ (%)		
		BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$		BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$
100% LI	A	125,7	7946	7946	137,3	2,22	14,4	47,8	7,7	6,2	5,4	0,47	0,05	0,05
	B	125,6	7947	7947	168,6	2,43	14,3		6,0	4,6	4,9	0,55	0,07	0,08
	C	125,7	7946	7946	132,8	2,51	15,2		11,5	5,3	5,3	0,54	0,10	0,10
50 % LI	A	126,0	7946	7946	98,4	1,96	13,2	57,2	16,1	6,7	7,7	1,01	0,05	0,05
	B	125,8	7947	7948	121,8	1,77	12,7		19,4	10,6	8,3	0,98	0,16	0,15
	C	125,7	7947	7947	135,1	2,05	13,8		11,1	9,5	8,0	1,07	0,12	0,12
100% LFC	A	126,0	7947	7947	86,0	1,49	11,5	83,6	31,8	18,8	14,0	1,65	0,16	0,15
	B	125,9	7947	7948	135,1	1,64	11,6		17,8	14,3	13,8	1,58	0,25	0,24
	C	126,0	7947	7947	97,1	1,99	12,0		34,4	13,5	14,0	1,94	0,21	0,21

Tabela VII.10 – Distribuição das potências trifásicas e fator de potência – 23:00 h

Distr. carga	$P$ [kW]			$Q$ [kVar]			$D$ [kVA]			$A$ [kVA]			$S$ [kVA]			$FP_s$		
	BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$	BT	$MT_t$	$MT_g$
100% LI	50,6	51,2	315,6	21,8	24,5	147,5	4,6	3,0	17,9	6,5	4,2	14,4	55,7	57,0	349,2	0,909	0,898	0,904
50% LI	40,3	40,8	282,0	18,0	20,5	140,0	6,9	4,0	25,1	6,0	3,9	15,3	45,1	46,0	316,2	0,894	0,886	0,892
100% LFC	34,6	35,1	240,8	16,3	18,7	137,3	10,3	6,1	38,0	9,9	7,4	6,7	40,8	40,9	280,0	0,848	0,857	0,860



Para efeito comparativo, a Figura VII.10 mostra as formas de ondas de tensão e corrente no primário (MT<sub>1</sub> a esquerda) e secundário (BT a direita) do transformador nos três casos anteriores e a Figura VII.11 apresenta as formas de onda da corrente de neutro para os mesmos casos.

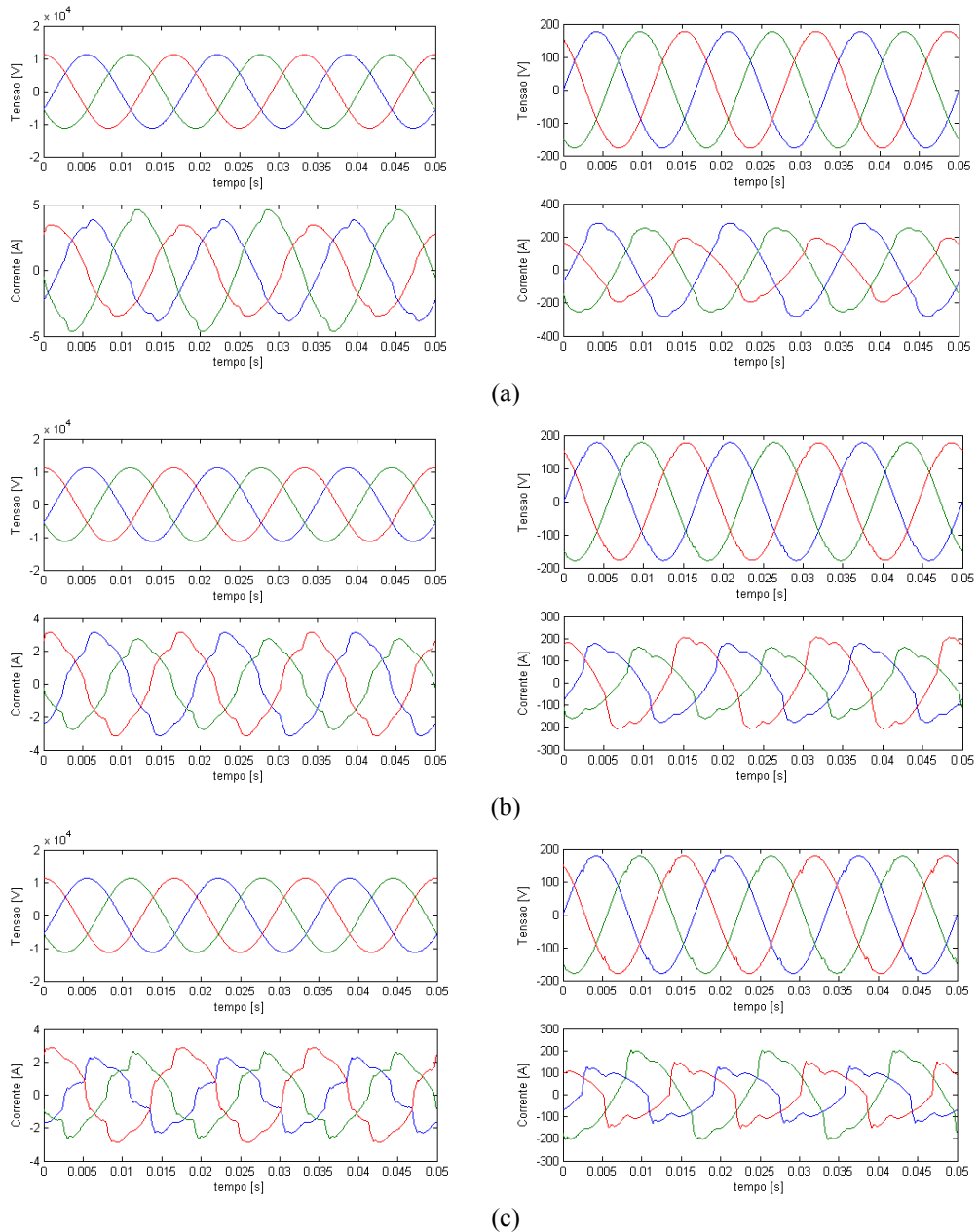


Figura VII.10 - Formas de ondas – lado MT<sub>1</sub> e BT (a) 100% LI; (b) 50% LI e 50% LFC ; (c) 100% LFC

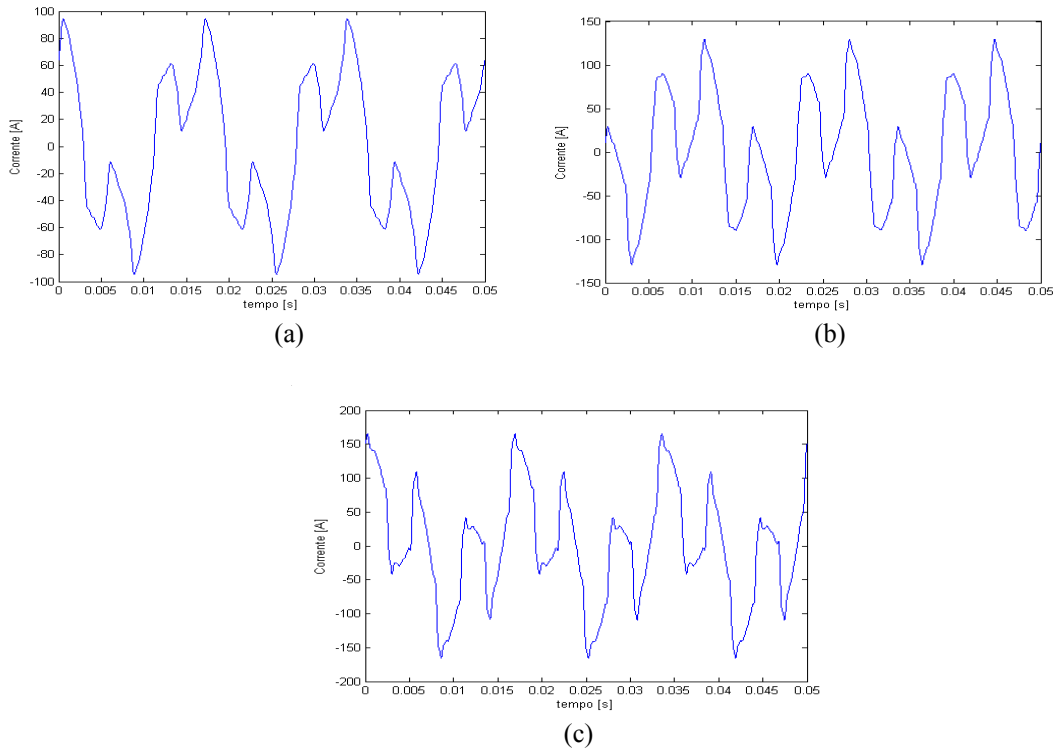


Figura VII.11 - formas de onda – correntes de neutro – (a) 100% LI; (b) 50%-50%; (c) 100% LFC

### VII.3.3. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

#### 1) Quanto ao desequilíbrio:

Analisando-se os resultados contidos na Tabela VII.9, nota-se, como se esperava, que os desequilíbrios das correntes são acentuados enquanto que os das tensões quase inexistentes. Por outro lado, estes desequilíbrios são sensivelmente atenuados quando se chega à entrada do alimentador. Como se sabe, a atenuação do desequilíbrio de corrente na MTg se deve à distribuição uniforme das residências em cada fase, bem como à própria aleatoriedade do funcionamento das cargas, cuja função se aproxima de uma distribuição uniforme à medida que o conjunto de amostras aumenta.

#### 2) Quanto às potências envolvidas:

Uma outra constatação é o acréscimo das distorções de corrente e de tensão, tanto na MT como na BT, entre os casos 100% LI e 100% LFC. Este acréscimo tem seu reflexo no aumento da potência de distorção ( $D$ ), como pode ser notado na Tabela VII.10. Contudo, é importante salientar que, mesmo com o acréscimo das potências de distorção ( $D$ ) e de assimetria ( $A$ ), a substituição das LIs por LFCs diminui o carregamento do sistema elétrico, o que pode ser comprovado pela redução no consumo das potências ativa (50,6 kW para 34,6 kW) e aparente (55,7 kVA para 40,8 kVA) na BT. Em termos percentuais, houve um aumento de 124% da potência de distorção, 52,3% da potência de assimetria e reduções de 26,8% na potência aparente e 31,6% na potência ativa. Do mesmo modo, observa-se na Tabela VII.9 a redução da corrente na BT e na MT com a substituição das LIs de 60 W por LFCs de 20 W. Depreende-se, neste caso, que o acréscimo de corrente devido à distorção harmônica é irrelevante frente à redução total da corrente eficaz.

#### 3) Quanto à distorção de tensão:

A distorção total de tensão, tanto na BT como na MT, se manteve em patamares adequados e bastante reduzidos, atendendo aos requisitos da IEEE-519 [St92] que a limita em 5% para tensões abaixo de 69 kV. Cabe mencionar que tal resultado deve-se a um sistema forte, com alta capacidade de curto-circuito. Simulações mostraram que, com a redução da capacidade de curto-circuito do sistema supridor, a distorção de tensão tende a crescer, podendo até atingir os limites recomendados.

## 4) Quanto ao fator de potência:

Excedentes de potência não ativa em níveis residenciais não são taxados (ao menos ainda) pelas companhias de energia elétrica. Mesmo assim, o fator de potência é considerado como um dos índices de avaliação da taxa de ocupação de um alimentador. No exemplo em questão, observa-se na Tabela VII.10, que o *fator de potência verdadeiro* ficou abaixo de 0,92 em todos os casos simulados no horário das 23 h. Isto mostra que o fator de potência é uma preocupação que deve ser considerada, porém seu valor dependerá do sistema em estudo e da composição das cargas em cada horário. Esta situação pode ser agravada, por exemplo, no caso de edifícios comerciais com grande número de computadores. Neste caso, o fator de potência pode ser um problema para a concessionária.

A Tabela VII.11 apresenta uma comparação entre os fatores de potência que têm sido propostos na literatura, mostrando que a definição mais utilizada, o fator de potência de deslocamento ( $FP_d$ ), apresenta maiores valores dando uma impressão de menor ocupação do sistema elétrico.

Tabela VII.11 – Fatores de potência conforme seção II.3.1– 100% LFC – 23:00 h

Local \ Fator	$FP_d$	$FP_v$	$FP_s$
BT	0,905	0,874	0,848
$MT_t$	0,883	0,873	0,857
$MT_g$	0,868	0,860	0,860

## 5) Quanto aos harmônicos homopolares:

A maioria das cargas não lineares utilizadas, como as LFCs, apresenta correntes com elevados valores de 3º harmônico. Seus múltiplos (9º, 15º, 21º, etc.) também estarão presentes no espectro. Tendo-se um transformador delta-estrela alimentando as cargas em questão, estes harmônicos deveriam ser aprisionados no delta, diminuindo bastante a  $DHT_i$  na MT. De fato isto ocorre, conforme mostra a Tabela VII.9, porém resíduos do 3º harmônico e de seus múltiplos estarão presentes no lado de MT. Isto está perfeitamente coerente, pois, mesmo sendo a fonte senoidal, as cargas não lineares estão desequilibradas, e, portanto, os harmônicos resultantes da decomposição das ondas de corrente são também desequilibrados. A Figura VII.10 mostra as formas de onda de tensão e de corrente, onde se pode observar os efeitos da filtragem das componentes homopolares (seqüência 0) pelo transformador DY, tornando as correntes do lado MT mais arredondadas.

### 6) Quanto à corrente de neutro:

Uma constatação de grande importância nas diversas simulações realizadas, é o aumento da corrente de neutro. A Tabela VII.9 apresenta resultados desse aumento à medida que LIs são substituídas por LFCs. No caso 100% LI, a corrente de neutro corresponde a 32,7% da média das correntes eficazes de fase, ao passo que no caso 100% LFC, ela já representa 78,8%, mostrando a necessidade de uma avaliação mais criteriosa. Em outras simulações, a corrente de neutro chegou a atingir 140% da corrente de fase. Dentre os problemas causados por tais correntes está o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis e a operação indevida de relés de neutro na MT, em sistemas que possibilitam a utilização de tais dispositivos. Em instalações antigas, em que o condutor de neutro pode estar mal dimensionado, a instalação de cargas não lineares em grande quantidade, pode levar ao sobreaquecimento do condutor, causando até incêndios.

A corrente de neutro (Figura VII.11) é formada pela contribuição de dois fenômenos: O desequilíbrio das correntes nas fases e os harmônicos homopolares que se somam no neutro.

No caso do desequilíbrio das correntes pode existir o desequilíbrio da componente fundamental e o desequilíbrio dos harmônicos. Simulações e medições mostraram que a contribuição da fundamental para a corrente de neutro, é quase a totalidade (em torno de 99%) em relação à contribuição dos harmônicos desequilibrados.

A outra contribuição é dos harmônicos homopolares. Esta contribuição será maior ou menor dependendo das intensidades destes harmônicos de cada carga envolvida e de seus ângulos de fase, que por serem desiguais, levarão a uma maior ou menor atenuação.

É bom lembrar que, o aumento do nível harmônico nos últimos anos levou a ABNT, em sua revisão da NBR 5410 [No97], a definir novos critérios de dimensionamento do condutor neutro.

### 7) Quanto à fundamental de corrente:

Outra constatação diz respeito às componentes fundamentais de corrente das cargas residenciais. Estas podem ser indutivas ou capacitivas. Enquanto geladeiras, máquinas de lavar, micro-ondas apresentam características indutivas, outras cargas como LFCs, televisores, videocassetes e *notebooks* apresentam características capacitivas. Por sua vez, as LFTs, podem ser indutivas ou capacitivas, o que dependerá do tipo de reator instalado: eletromagnético ou eletrônico.

Sendo assim, dependendo do arranjo das cargas e de suas potências nominais, poderá ocorrer melhoria do fator de potência mesmo com o acréscimo de cargas não lineares. Resultados de simulações mostram tal situação.

8) Quanto à interação com cargas lineares:

Diversas outras simulações, em outros horários ao longo do dia, mostraram que a inclusão de cargas lineares, tais como: chuveiros (convencionais), LIs e ferros elétricos, atenuam sensivelmente os efeitos de distorção das cargas não lineares. Nestes casos, o percentual de acréscimo de potência ativa passa a ser bem maior que o percentual de acréscimo das demais potências não ativas.

### VII.3.4. PERFIS HORÁRIOS DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

Os resultados das simulações apresentados até o momento foram obtidos para horários específicos. No entanto, muitas vezes torna-se interessante conhecer os valores das grandezas elétricas de um sistema de distribuição ao longo do dia. Assim, dentro do escopo deste trabalho, foi desenvolvida uma rotina computacional para fornecer tais grandezas por meio de simulações consecutivas. O intervalo para a obtenção dos resultados pode ser escolhido e ajustado pelo usuário, como por exemplo, a cada 15 minutos ou a cada hora.

A seguir serão apresentados alguns resultados de perfis de grandezas elétricas, tais como valores eficazes da corrente, da tensão e da corrente de neutro, bem como as *DHTs*. Para que o texto não fique muito extenso, serão mostrados apenas resultados para uma fase do sistema, evitando repetição, pois o comportamento das grandezas é similar para as três fases.

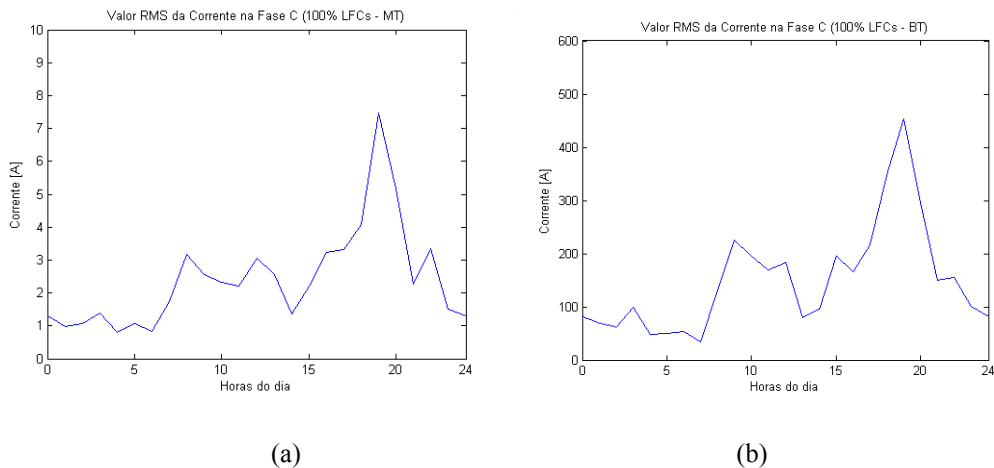


Figura VII.12 - Perfis da corrente na fase C – 100% LFC (a) MT (b) BT

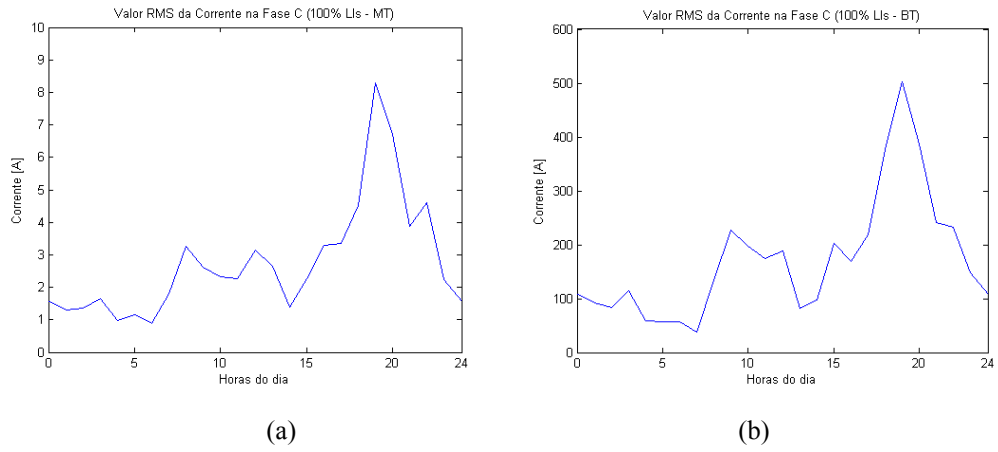


Figura VII.13 - Perfis da corrente na fase C – 100% LI (a) MT (b) BT

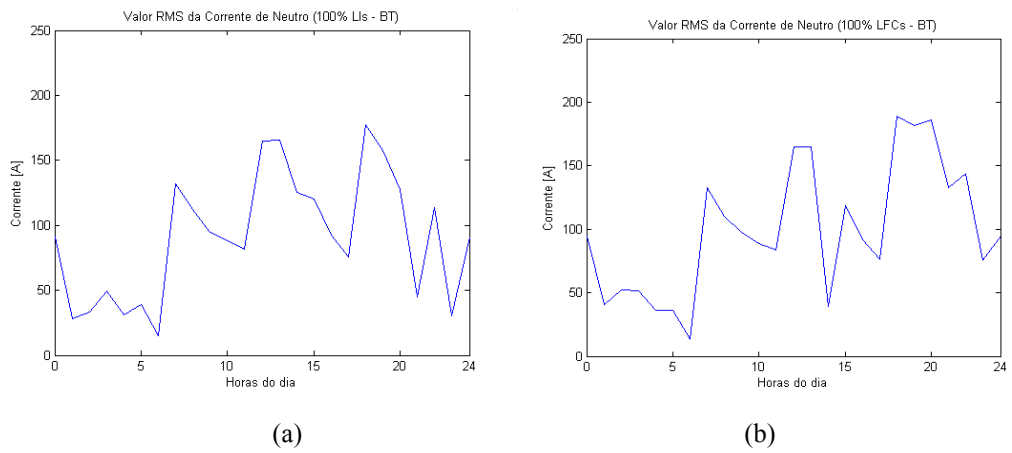


Figura VII.14 - Perfil da corrente de neutro – (a) 100% LI (b) 100% LFC

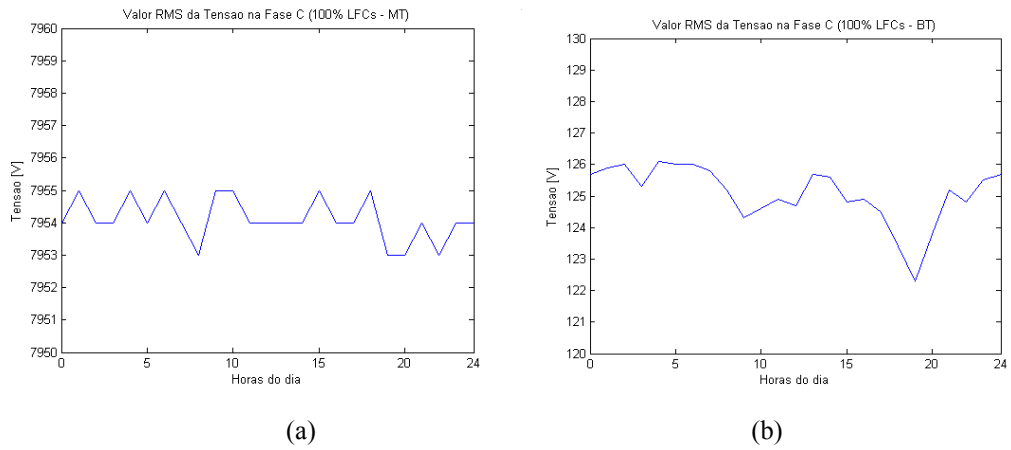


Figura VII.15 - Perfis da tensão na fase C – 100% LFC – (a) MT (b) BT

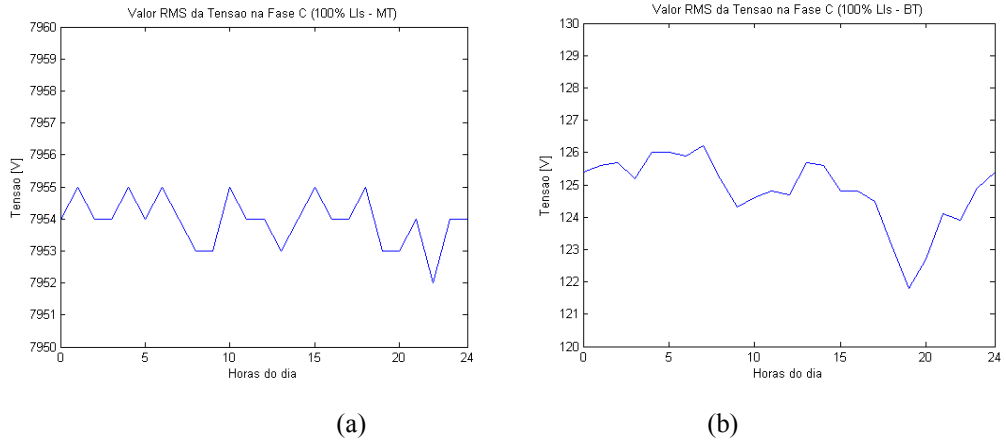


Figura VII.16 - Perfis da tensão na fase C – 100% LI – (a) MT (b) BT

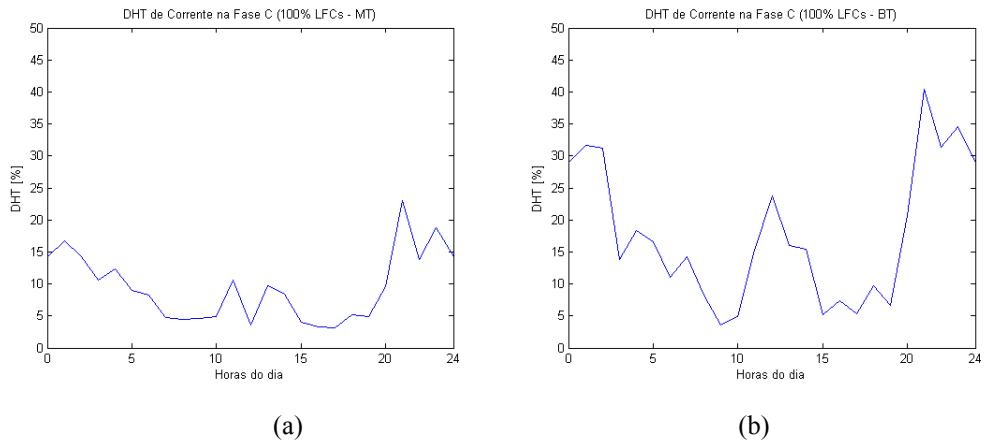


Figura VII.17 - Perfis de  $DHT_i$  da corrente na fase C – 100% LFC – (a) MT (b) BT

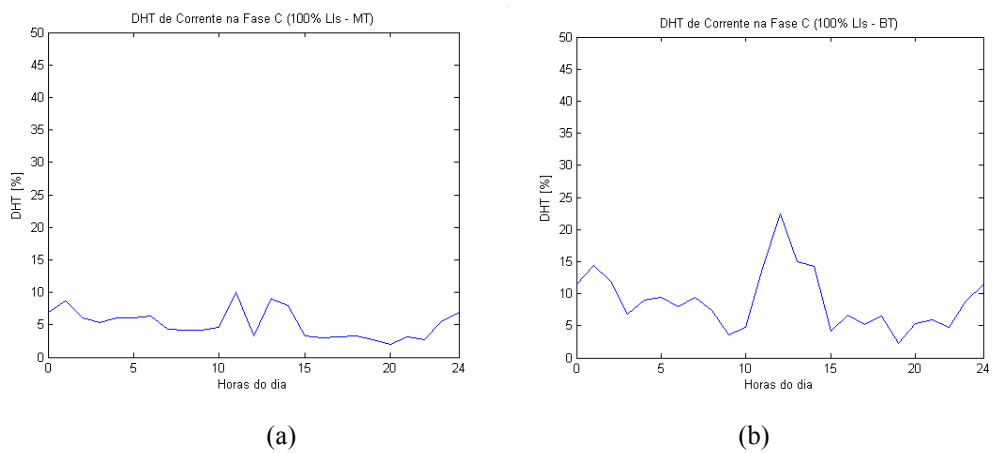


Figura VII.18 - Perfis de  $DHT_i$  da corrente na fase C – 100% LI – (a) MT (b) BT



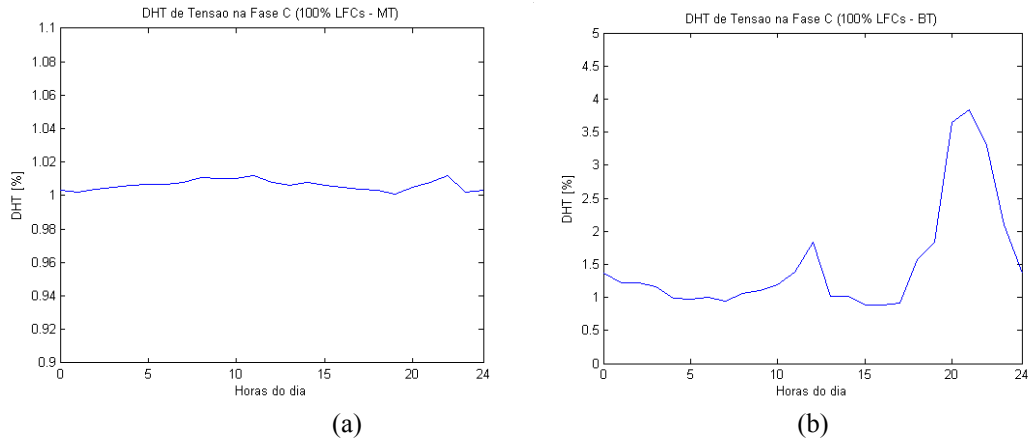


Figura VII.19 - Perfis de  $DHT_v$  da tensão na fase - 100% LFC – (a) MT (b) BT

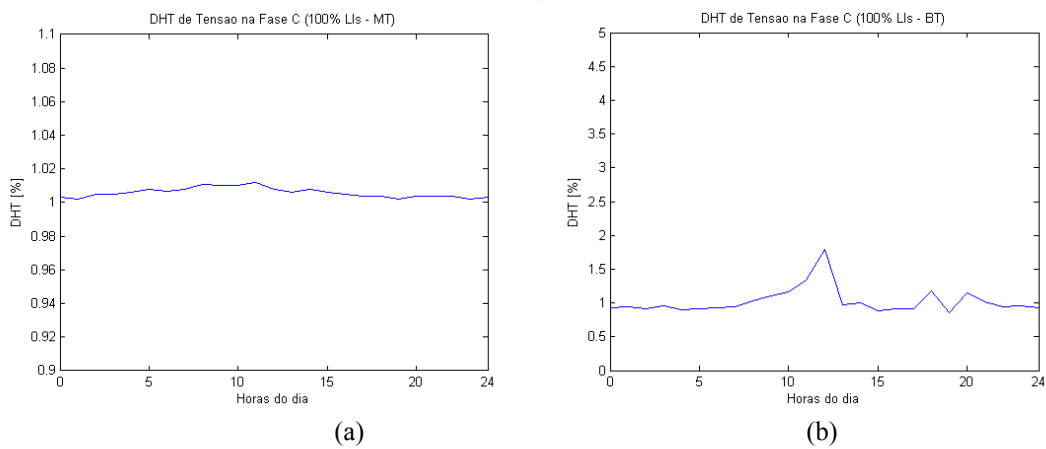


Figura VII.20 - Perfis de  $DHT_v$  da tensão na fase - 100% LI – (a) MT (b) BT

O comportamento das correntes reflete o esperado perfil global das cargas com crescimento forte das correntes no horário de ponta (Figura VII.12 e Figura VII.13). Nota-se, no caso 100% LI, nos horários de maior presença de lâmpadas (17:00 h em diante) que o nível de corrente é maior que no caso 100% LFC. As correntes de neutro (Figura VII.14) apresentam um perfil similar até 18:00 h. A partir daí, no caso 100% LI, a corrente de neutro mostra tendência de queda enquanto no caso 100% LFC, ela se mantém em valores mais elevados devido à contribuição dos componentes harmônicos. Cabe ressaltar que, em cada horário simulado, a corrente de neutro recebe a contribuição tanto do desequilíbrio como dos harmônicos homopolares.

Por sua vez, no comportamento das tensões (Figura VII.15 e Figura VII.16) pode-se observar uma queda nestes horários de grande carregamento.

Finalmente, no que diz respeito às distorções harmônicas de corrente, observa-se uma natural degradação quando da concentração de cargas não lineares. As Figura VII.17 e

a Figura VII.18 mostram a esperada redução da  $DHT_i$  tanto da BT para a MT, como do caso 100% LFC para 100% LI.

A distorção de tensão da MT, como é um sistema com alta capacidade de curto-circuito, pouco se altera, mantendo a distorção prévia da fonte (1%). Observa-se na Figura VII.19 e na Figura VII.20 que a  $DHT_v$  na MT oscilou em torno de 1,0% ao longo do dia. Na BT, dependendo do horário, da composição das cargas e das impedâncias do sistema, a  $DHT_v$  pode variar, sendo que no caso 100% LFC, ela se manteve na faixa de 0,88 a 3,84% e no caso 100% LI, ela ficou em torno de 1%. Isto mostra o efeito das LFCs na  $DHT_v$ .

Para cada simulação o perfil poderá ser diferente, porém seguindo sempre a mesma tendência. Deve-se mencionar que este perfil, na prática, poderá variar dependendo do dia da semana, da ocorrência de eventos especiais (por exemplo, dia de jogo de futebol, final de copa do mundo, etc...), bem como de sistema para sistema.

### VII.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas diversas simulações e seus resultados com sistemas alimentando cargas equilibradas ou desequilibradas. Utilizou-se para isso, principalmente, um modelo de sistema de distribuição com 6 transformadores de distribuição com dados reais dos componentes elétricos.

Desta forma foi possível comparar as tensões e as correntes dos lados primário e secundário dos transformadores analisando suas distorções harmônicas totais, o defasamento produzido pelo transformador nas correntes e tensões harmônicas, a situação dos harmônicos triplos, as formas de ondas das tensões e correntes incluindo a corrente de neutro, etc.

O programa que leva em conta a aleatoriedade do funcionamento das cargas foi importante para a composição do sistema em condição de desequilíbrio. Este último está associado à potência de desequilíbrio/assimetria que também contribui para o carregamento do sistema elétrico.

## VIII. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O enfoque deste estudo foi avaliar os reflexos na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) da penetração de lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) em substituição às lâmpadas incandescentes (LIs), em área residencial alimentada por um típico sistema de distribuição, composto de cargas lineares e cargas não lineares. As cargas foram modeladas utilizando-se o método de injeção de correntes harmônicas. Segundo alguns autores, isto leva a resultados conservadores uma vez que atenuações harmônicas deixam de ocorrer. Na prática, tais atenuações aparecem devido às características dos sistemas elétricos e das interações entre correntes e tensões harmônicas.

Um ponto importante a destacar foi a forma de composição do sistema a ser simulado. Procurou-se não utilizar um sistema com um número qualquer de cargas, o que poderia levar a resultados irrealistas. Deste modo, o sistema montado foi baseado em pesquisas realizadas no país, a respeito de hábitos de consumo e posse de eletrodomésticos. Tais pesquisas forneceram: a quantidade média de eletrodomésticos, os eletrodomésticos mais comuns nas residências, tempo médio de utilização e o perfil de uso diário de cada um (curva de carga). Os resultados, deste modo, ficaram mais próximos daquilo que acontece na prática.

Devido à limitação do software utilizado em trabalhar com sistemas grandes e com muitas ramificações, optou-se por agrupar as cargas residenciais conectadas a uma mesma fase de cada transformador do sistema. Este fato também contribuiu para que os resultados obtidos sejam considerados conservadores.

De forma global, a conclusão deste trabalho de dissertação é que a substituição das LIs por LFCs, no sistema elétrico em estudo, é benéfica em termos de carregamento do sistema e economia para o usuário.

Três fatores podem contribuir para que o aumento das cargas não lineares nas residências não seja prejudicial para o sistema elétrico, além da natural oposição do sistema elétrico à circulação de correntes com frequências elevadas:

(1º) As diferentes características das cargas, indutivas ou capacitivas, cujas combinações poderão conduzir a uma redução da potência não ativa de deslocamento ( $Q$ ) melhorando assim o fator de potência.

(2º) A própria aleatoriedade do funcionamento das cargas irá causar diferentes combinações entre as lineares e não lineares, amenizando as distorções harmônicas e seus efeitos, elevando o fator de potência e reduzindo o desequilíbrio a montante, onde o universo de consumidores passa a ser maior.

(3º) A diversidade dos ângulos de fase dos diferentes componentes harmônicos dos diversos tipos de cargas não lineares poderá ocasionar a atenuação das correntes harmônicas, conduzindo a uma redução da distorção total.

Para o consumidor residencial, que hoje paga apenas potência ativa, a substituição das LIs por LFCs representa um ganho. Considerando-se, por exemplo, 8 lâmpadas com 2 horas de funcionamento por dia, o consumidor terá o seu investimento recuperado após aproximadamente um ano. Para a concessionária de energia elétrica, o reflexo virá no faturamento o qual será reduzido, porém o alívio na potência do sistema poderá postergar investimentos ou redirecionar o excedente de energia para outros clientes.

De um modo geral, as simulações com sistemas com cargas desequilibradas tiveram resultados semelhantes aos dos sistemas equilibrados em termos de distorção de tensão, fator de potência e carregamento do sistema. Tanto na medição como na simulação verificou-se que as potências ativa ( $P$ ) e não ativa de deslocamento ( $Q$ ) são fortemente predominantes na composição da potência aparente, apesar da existência das potências de distorção ( $D$ ) e de assimetria ( $A$ ).

As grandezas elétricas tais como: potência, fator de potência, distorção de tensão e de corrente, corrente de neutro e outras, dependem das características particulares de cada sistema elétrico. Tais características como potência de curto-circuito, topologia da rede, distorções prévias de corrente e de tensão, grau de desequilíbrio, cargas e a aleatoriedade do funcionamento das mesmas, a presença de bancos de capacitores, etc, irão combinar fornecendo uma ampla variedade das grandezas de interesse. Desta forma, não é possível generalizar as conclusões deste trabalho para qualquer sistema de distribuição.

É importante salientar que nas simulações efetuadas, a  $DHT_v$  se manteve abaixo do limite normativo de 5%. Com o objetivo de se verificar qual o máximo carregamento de LFCs que leva o sistema em estudo, com 30 apartamentos por fase, a atingir  $DHT_v$  de 5%, foram realizadas diversas simulações. O horário que apresentou maior distorção de tensão foi o de 21:30 h e foram necessárias entre 10 e 11 LFCs acesas por casa para que aquele

percentual fosse atingido. Em termos de potência ativa, a carga de LFCs representou, neste horário, 49,8% da potência total consumida.

Como ressalva, concluiu-se que especial atenção deve ser dada à corrente de neutro e ao fator de potência em certos horários. Assim, apesar dos resultados deste trabalho não sugerirem grandes preocupações com o uso em larga escala das LFCs, como medida de precaução, coloca-se o incentivo ao uso de LFCs entre fases, isto é, de 220 V, para redução das correntes de neutro. Isto vale para os demais eletroeletrônicos geradores de distorção harmônica.

Além disso, parece salutar a tendência mundial em limitar a emissão de harmônicos individuais por cargas monofásicas conforme IEC-555.2. Esta norma estabelece uma  $DHT_i$  máxima de 32%, o fator de potência mínimo de 0,92 e fixa limites para os harmônicos individuais, principalmente 3°, 5° e 7°.

### **VIII.1. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS**

Esta dissertação apresentou diversos aspectos relativos à penetração das LFCs em um sistema elétrico, porém há algumas lacunas a serem investigadas e preenchidas. Dentre elas, destacam-se:

- (1) Expansão do sistema em estudo, com novas topologias.
- (2) Inclusão de cargas comerciais e industriais.
- (3) Novas pesquisas de hábitos de consumo e perfis de cargas residenciais, comerciais e industriais.
- (4) Novas modelagens das cargas e fontes de forma a se levar em consideração os diversos fatores que influenciam na atenuação e no cancelamento harmônico.
- (5) Considerar os efeitos da variação da resistência dos cabos e os acréscimos das perdas em transformadores e cabos com as frequências harmônicas.
- (6) Análise de possíveis ressonâncias nas frequências harmônicas em presença de bancos de capacitores.
- (7) Estudos sobre os erros em medidores de energia face aos harmônicos e ao desequilíbrio/assimetria.

Como fruto deste trabalho de dissertação, três artigos foram aprovados para publicação em congressos, a saber:

“Avaliação dos Efeitos das Cargas Não-Lineares na Qualidade da Energia Elétrica de um Sistema de Distribuição” – XV CBA 2004 – Congresso Brasileiro de Automática – Gramado – RS.

“Effects of Compact Fluorescent Lamps on the Power Quality of a Distribution System” – VI INDUSCON – Conferência Internacional de Aplicações Industriais – 2004 - Joinville – SC.

“Efeitos das Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Sistemas de Distribuição” – XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica” – SENDI 2004 – Brasília – DF.

---

## IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Ab02] Abreu, J.P., P.M. Silveira, “Qualidade da Energia Elétrica”, Apostila Curso Cese – FUPAI, 2002.
- [Ab98] Abreu, J.P.; “Conjugando Conservação e Qualidade”, Revista Eletricidade Moderna, Maio 1998.
- [Ae04] Summary of IEEE Standard 1459-2000: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, Alexander Eigeles Emanuel , IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 40, nº 3, Maio/Junho 2004.
- [Ar93] Arseneau, R., “The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Fluorescent Lamps”, 1992 International Conference on Harmonics & Power Systems, IEEE, 1993.
- [Be91] Behera, K.; “Power Factor Correction Techniques used for Fluorescent Lamp Ballast”, 0-7803-0453-5/91, IEEE, Page(s): 1836 – 1841.
- [Be93] Bemis, J.; “Compact fluorescent lamp test”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE , 2-8 Oct 1993 Page(s): 2278 -2280 vol.3
- [Bro99] Bronzeado, H.; “Análise de desempenho de reatores eletrônicos e eletromagnéticos”, Revista Eletricidade Moderna, Dezembro 1999.
- [CaOs] Catálogo Geral: Osram
- [CaSy] Catálogo Geral: Sylvania
- [Ce00] Pesquisa de posse de eletrodomésticos e de hábitos de consumo, CEMIG residencial, 2000.
- [Cr93] “Critérios e procedimentos para o atendimento a consumidores com cargas especiais”, GCPS/CTST/GTCP – Eletrobrás, Rio de Janeiro, Fevereiro/1993.
- [Cz96] – Czarnecki, L.S., “Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry”, IEEE Trans. On Power Delivery, 1996;
- [Df03] Délvio Franco, Tese de Doutorado, “Uma proposição de novos protocolos de medição sob a ótica da Qualidade da Energia Elétrica”, Universidade Federal de Itajubá, Outubro/2003.
- [Du01] Dutt, G.S.; Tanides, C.G.; “Hourly load curve improvement through the promotion of compact fluorescent lamps in Argentine households”, Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) ,Volume: 4, 2001 Page(s): 5 pp. vol.4.
- [Du02] Electrical Power Systems Quality – Second Edition – Ed. Mc Graw Hill, Roger C. Dugan; Mark F. McGranaghan; Surya Santose; H. Wayne Beaty; 2002.
- [Dt89] Discrete-time Signal Processing – Ed. Prendice Hall, Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer; 1989.

- 
- [Dw95] Rory Dwyer et all, “Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems”, IEEE Trans. Power Systems, vol. 10, pp 1772-79, November/1995.
  - [Ee04] Os Efeitos da Eficientização Energética sobre os Equipamentos e Instalações, Marcos Isoni, Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.
  - [El89] Pesquisa de posse de eletrodomésticos e de hábitos de consumo, Projeto 5.2.3, PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) e Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S/A), 1989.
  - [Et89] Etezadi-Amoli, M.; Florence, T.; “Power Factor and Harmonic Distortion Characteristics of Energy Efficient Lamps”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 3, Jul 1989.
  - [Ga02] Harmônicos em Sistemas Industriais, Guilherme Alfredo Dentzien Dias, 2ª Edição, Editora EDIPUCRS, 2002.
  - [Ga98] Gama, P.H.R.P.; “A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1998.
  - [Go99] Gothelf, N.; “Os efeitos das lâmpadas fluorescentes compactas na qualidade da energia”, Suécia, Revista Eletricidade Moderna, Agosto 1999.
  - [Gr02] Grady, W.M.; Mansoor, A.; Fuchs, E.F.; Verde, P.; Doyle, M.; “Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volume: 2, 2002 Page(s): 1090 -1094 vol.2.
  - [Gr94] Grady, W.M.; Mansoor, A.; P.T. Staals; R.S. Thallam; M. T. Doyle; M.J. Samotyj. “Predicting the Net Harmonic Current Produced by Large Numbers of Distributed Single-Phase Computer Loads”, IEEE Trans. on Power Delivery, 10(4), November, 1994.
  - [Gr95] Grady, W.M.; Mansoor, A.; S.D. Krein; R.S. Thallam; M. T. Doyle; M.J. Samotyj. “Effect of Supply Voltage Harmonic on The Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads, IEEE Trans. on Power Delivery, 10(3), 1416-1422, July, 1995.
  - [Gr98] Grady, W.M.; Mansoor, A.; “Analysis of Compensation Factors Influencing the Net Harmonic Current Produced by Single-Phase Non-Linear Loads”, 8<sup>th</sup> Conference on Harmonic and Quality Power ICHQP98, Athens, Greece, October,1998.
  - [Gr295] Grady, W.M.; Mansoor, A.; A. H. Chowdhury ; M.J. Samotyj. “An Investigating of Harmonic Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 10, n° 1, January, 1995.
  - [He93] Heidemann, A.; Hien, S.; Panofski, E.; Roll, U.; “Compact fluorescent lamps”, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A, Volume: 140 Issue:6,Nov1993 Page(s): 429 –434
  - [Ie82] IEC: Proj. 77A.1.9; April, 1993 to IEC 555-2, “Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment, Part. 2: Harmonics, 1982.”



- 
- [Ie95] - IEEE Working Group on Non-Sinusoidal Situations, “Practical Definitions for Power in Systems with Non-Sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”, Paper No. 95 WM 040-6-pwr, IEEE PES, Winter Meeting, New York, NY, February 1995;
  - [In73] “Introdução a Sistemas Elétricos de Potência”, Ernesto João Robba, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1973.
  - [Ja00] Power System Quality Assessment – Ed. John Wiley & Sons, J. Arrillaga, N. R. Watson, S. Chen, 2000
  - [Je91] Jednacz, T.; “Power quality design implications of high frequency lighting ballasts and controls”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE , 28 Sep-4 Oct 1991, Page(s): 1833 -1835 vol.2
  - [Jo91] Johnson, K.; Zavadil, R.; “Assessing the impacts of nonlinear loads on power quality in commercial buildings - an overview”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE , 28 Sep-4, Oct 1991, Page(s): 1863 -1869 vol.2.
  - [Ka91] Kalinowsky, S.A.; Martello, J.J.; Yee, A.K.; Forte, M.; “Harmonic content and illumination characteristics versus voltage for energy saving fluorescent lighting systems”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE , 28 Sep-4 Oct 1991, Page(s): 1820 -1827 vol.2.
  - [Ka94] Kaiser, W.; “Reator para lâmpada fluorescente e a qualidade da energia”, EPUSP, Revista Eletricidade Moderna, Agosto 1994.
  - [Ka97] Kachmarik, D.J.; Kheraluwala, M.H.; “Multi-resonant Boost High Power Factor Electronic Ballast for Compact Fluorescent Lamps”, 0-7803-3840-5/97, IEEE 1997, Page(s): 60 – 65.
  - [Kh95] Kheraluwala, M.H.; El-Hamamsy, S.A.; “Modified valley fill high power factor electronic ballast for compact fluorescent lamps”, Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE , Volume: 1, 18-22 Jun 1995, Page(s): 10 -14 vol.1
  - [La96] Lai, J.S.; Key, T.S.; “Cost and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch Mode Power Supplies in a Commercial Office Building”, IEEE, 1996.
  - [La97] Lai, J.S.; Key T.S.; “Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings”, IEEE Transaction on Industry applications, vol. 33, N°4, Jul, 1997
  - [MaPh] Manual Philips de iluminação
  - [Ma89] Martello J.; Kalinowsky S.; “Electrical and Illumination Characteristics of Energy Saving Fluorescent Lighting as a Function of Potential”, IEEE Transaction on Industry applications, vol. 25, N°2, mar, 1989.
  - [Ma98] Matlab – Power System Blockset User’s Guide – For use with Simulink, TEQSIM International, Hydro-Quebec, Math Works, 1998.
  - [Mc95] Monte Carlo, Concepts, Algorithms and Applications – Ed. Springer, George S. Fishman, 1995.

- 
- [Mi02] Manual de instruções do registrador MARH-21 da RMS Sistemas Eletrônicos, 2002.
  - [Ni85] Niskier, J.; Macintyre, A.J.; “Instalações Elétricas”, Livro Ed. Guanabara Dois, 1985.
  - [No97] NBR 5410, Novembro/1997; “Instalações Elétricas de baixa Tensão”.
  - [No99] NBR 14418, Dezembro/1999; “Reatores eletrônicos alimentados em C.A. para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares, Prescrições de desempenho”.
  - [OI02] Oliveira, J. C.; “A Power Quality Comparative Analysis Related to Electronic and Electromagnetic Fluorescent Ballast Operation”, 10th ICHQP, Outubro 2002.
  - [Pa01] Pastora, R.; Albuquerque, I.; “Avaliação do desempenho de lâmpadas de descarga compactas”, Revista Eletricidade Moderna, Agosto 2001.
  - [PaPr] Padrão Procel-Inmetro para lâmpadas fluorescentes compactas e circulares.
  - [Pi93] Pileggi, D.J.; Gulachenski, E.M.; Root, C.E.; Gentile, T.J.; Emanuel, A.E.; “The effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion”, Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 8 Issue: 3, Jul 1993, Page(s): 1451-1459
  - [Po00] Pollis, H.; “A experiência brasileira em projetos de conservação de energia”, Procel, Revista Eletricidade Moderna, Setembro 2000.
  - [Pr99] Prado, R.N.; “Low Cost High-Power-Factor Electronic Ballast for Compact Fluorescent Lamps”, 0-7803-5589-X/99, IEEE 1999, Page(s): 256 – 261.
  - [Ra02] Raizer, A.; “Analysis of Harmonic Distortion and Electromagnetic Interference due to Electronic and Electromagnetic Ballasts”, IEEE, 10th ICHQP – International conference on Harmonics and Quality of Power, Outubro 2002.
  - [Ro91] Rocha, M.; “Elementos para maior eficiência dos sistemas de iluminação”, Revista Eletricidade Moderna, Setembro 1991.
  - [Ro97] Rocha, A.C.O.; Mello, C.A.F.; Gomes, H.G.; “Harmônicos causados pela operação simultânea de televisores”, Revista Eletricidade Moderna, Abril 1997.
  - [St92] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-1992.
  - [To93] Topalis, F.V.; “Efficiency of energy saving lamps and harmonic distortion in distribution systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N°4, October, 1993.
  - [Tr84] “Transformadores, teoria e ensaios”, Abreu, J.P.G, Oliveira, J.C., Cogo, J.R., Ed. Edgard Blücher Ltda, 1984.
  - [Um96] User manual PM100/300, version 04, 13/11/1996, Voltech Instruments Ltd.
  - [Ve89] Verderber, R.R.; Morse, O.C.; Rubinstein, F.M.; “Performance of electronic ballast and controls with 34 and 40 Watt F40 fluorescent lamps”, Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 25 Issue: 6 , Nov/Dec 1989 Page(s): 1049 –1059

- 
- [Ve91] Verderber, R.R.; Morse, O.C.; Alling, W.R.; “Harmonics from compact fluorescent Lamps”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE, 28 Sep-4 Oct 1991, Page(s): 1853-1858 vol.2
  - [Vi98] Vieira, J.L.F.; Brioschi, R.; Lamengo, M.; “Reator eletrônico de baixo custo e alto fator de potência”, SBA Controle e Automação Vol. 9 N° 3, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro de 1998.
  - [Ya98] Yamachita, R.A.; “ Conservação de Energia Elétrica utilizando Sistemas de Iluminação”, Dissertação de Mestrado, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1998.
  - [Yi99] - Yildirim, D. and Fuchs, E.F., “Commentary on Various Formulations of Distortion Power D”, IEEE Power Engineering Review, volume 19, number 5, pp. 50-52, May 1999;
  - [Wp03] – Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements Under Nonsinusoidal Conditions, IEEE Instrumentation and Measurement Society, Milano, Outubro de 2003.