COPPE/UFRJ

IMPACTOS ECONÔMICOS DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE DAS CARGAS NÃO LINEARES EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO RESIDENCIAIS

Carlos Henrique Duarte

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador: Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro

Abril de 2010

IMPACTOS ECONÔMICOS DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE DAS CARGAS NÃO LINEARES EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO RESIDENCIAIS

Carlos Henrique Duarte

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

_____
Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D

_____
Prof. José Policarpo Gonçalves de Abreu, D.Sc.

_____
Prof. José Antenor Pomílio, D.Sc.

_____
Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

_____
Prof. Maurício Cardoso Arouca, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2010

Duarte, Carlos Henrique

Impactos Econômicos dos Harmônicos de Corrente das Cargas Não-Lineares em Redes Elétricas de Distribuição Residenciais / Carlos Henrique Duarte – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2010.

XVI, 224 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Roberto Schaeffer

Tese de Doutorado - UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2010

Referencias Bibliográficas: p. 143-160.

1. Eficiência Energética. 2. Distorção Harmônica. 3. Impactos Econômicos. I. Schaeffer, Roberto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Titulo

DEDICATÓRIA

Com grande carinho,

dedico este trabalho aos

meus pais, pelo empenho

em me prover educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo a Deus, pelas graças que me foram dadas de determinação, entusiasmo e obstinação por realizar com qualidade e eficiência.

Ao professor Richard Magdalena Stephan, amigo de longa data do qual sou fã, pelo seu profissionalismo científico que foi espelho para minha reflexão de caminhar até aqui.

Ao professor Maurício Tolmasquim, que acolheu minha proposta inicial, e ao professor Luiz Pinguelli Rosa, que mesmo diante de tantas demandas sempre se prestou solícito.

Ao professor Maurício Cardoso Arouca, que me "adotou" numa ocasião em que por vicissitudes fiquei sem "pai" nem "mãe", ou seja, sem orientador e sem bolsa.

Ao professor Roberto Schaeffer, pela segunda adoção, que se tornou definitiva, que muito mais do que um orientador é um verdadeiro amigo e que, diante tantas virtudes, tanto profissionais quanto pessoais, não caberiam expressá-las aqui.

Ao professor José Policarpo Gonçalves de Abreu e ao Mestre Herivelto Bronzeado, que me incentivaram a prosseguir neste tema tão espinhoso, mas muito importante.

Ao professor Edson Watanabe, pela preciosa atenção e orientação informal.

Ao professor José Antenor Pomílio, ao Mestre Flávio Resende Garcia e ao engenheiro Ernesto Mertens, pela atenção e pelo apoio nas informações essenciais ao trabalho.

Ao professor Reinaldo Castro Pontes e Christiano da PUC, pelo apoio incondicional na compreensão das informações das Pesquisas de Posse e de Hábitos de Uso.

Aos engenheiros do ONS, Antônio Pádua Guarini, Antônio Felipe Cunha Aquino, Dalton Oliveira Camponês do Brasil, José Roberto Medeiros e Paulo Diniz de Oliveira.

Aos Engenheiros da Ampla, Francisco Eduardo Rizzo Fraga, da Light, Paulo Maurício Senra, e da Energias do Brasil, José Rubens M. Júnior que hoje é professor na UFU.

À engenheira Cecília Helena, da CH Consultoria, e ao engenheiro Álvaro Tupiassu, da Petrobrás, pelo apoio prestado quando solicitados.

Ao diretor Luiz Menandro e engenheiros Hamilton Pollis e Raphael, da Eletrobrás.

À Dona Diva, Dona Dora, Tia Clemilda e ao casal de professores Ângela Cristina e Fernando Duda, pela acolhida.

Aos amigos do projeto PNUD, Alexia, Cristiane Camacho, Luciana Rocha, Márcio Giannini, Rita Passos, Valéria Monnerat e Leonardo Rocha, este último que me prestou um auxílio fundamental para o tratamento e para a estruturação dos dados.

Aos pesquisadores do CEPEL, João Carlos Aguiar, José Francisco Sobrinho, Luiz Felipe W. Souza, Mária Q.F. Balthazar, Ricardo Dutra e Ricardo Penido Dutt-Ross.

Aos meus pais, em especial minha mãe, que partiu dessa vida durante meu mestrado, pelo esforço para prover formação de alto nível a todos os seus filhos.

Aos tios, tias, primos e minha madrinha, pela compreensão da minha falta de tempo.

Ao meu amigo Marcos Henrique S. de Paula, minhas amigas Lilian Villas Boas e Suzane Ortiz, e também a minha avó Maria Nogueira de Mello (Lolô).

À Sagrada Família, Marcos Antônio Gomes, Andréa Norberto e minhas lindas afilhadas Clara e Iara.

Aos amigos da microturma de engenharia elétrica "Antônio Lopes de Souza", Antônio Raad, Nelson Pereira Ramos e Paulo Quintão.

Aos preciosos profissionais da saúde que foram imprescindíveis para que eu me mantivesse vivo, Álvaro Afonso, Fernando Valente, João Américo, Luiz Augusto, Paula Chaves, Ricardo Fittipaldi, e, em especial, aqueles que também são meus amigos, Ângela Maria Eugênio, Marcos Antônio Gomes, Rosane Barroso Salerno.

À ASM e ALÉIA, André, Antônio, Cynthia, Bianca e especialmente Leonardo Ciuffo.

Ao técnico Sérgio Ferreira e família, D. Cidléa, Sr. Cáceres e minha gatinha.

Aos funcionários do PPE, Paulo, Fernando, Simone e, em especial, Rita e Sandrinha.

Ao (CNPq), pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

IMPACTOS ECONÔMICOS DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE DAS CARGAS NÃO LINEARES EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO RESIDENCIAIS.

Carlos Henrique Duarte

Abril / 2010

Orientador: Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

Para se obter um uso mais eficiente de energia elétrica podem ser utilizados sistemas de eletrônica de potência (PES - p*ower electronics systems*). Entretanto, a utilização destes dispositivos, que se comportam como cargas não-lineares (NLL - *nonlinear loads*), resulta na geração de freqüências indesejadas, que são harmônicas (múltiplas) da freqüência fundamental (60 Hz no Brasil). Consequentemente, equipamentos que usam PES apresentam maiores eficiências, mas também contribuem significativamente para a degradação da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Além disso, tanto as regras convencionais de projeto e de operação para sistemas de potência, quanto as premissas usuais utilizadas em programas de eficiência energética, sem contar o consumo próprio de eletricidade dos equipamentos, consideram as formas de onda de tensão e corrente senoidais com freqüência fundamental da rede elétrica fixa (60 Hz no Brasil). Assim, a redução no consumo de eletricidade em programas de eficiência energética pela aplicação de PES considera a redução dos kWh para o usuário final, não observando as perdas adicionais devido ao aumento da distorção harmônica. Desta forma, por meio de um estudo de caso de posse e de hábitos de uso de TVs, esta tese tem o objetivo de estimar impactos econômicos advindos do uso de dispositivos de eletrônica de potência em redes de distribuição residenciais no Brasil.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ECONOMIC IMPACTS OF CURRENT HARMONIC FROM NONLINEAR LOADS ON RESIDENTIAL ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS.

Carlos Henrique Duarte

April / 2010

Advisor: Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

To achieve more efficient energy use, power electronics sytems (PES) may be employed. However, this introduce nonlinear loads (NLLs) into the system by generating undesired frequencies that are harmonic in relation to (multiples of) the fundamental frequency (60 Hz in Brazil). Consequently, devices using PES (p*ower electronics systems*) are more efficient but also contribute significantly to degradation of power quality (QEE). Besides this, both the conventional rules on design and operation of power systems and the usual premises followed in energy efficiency programs (without mentioning the electricity consumed by the devices themselves) consider the sinusoidal voltage and current waveforms at the fixed fundamental frequency (60 Hz in Brazil) of the power grid. Thus, analysis of electricity consumption reductions in energy efficiency programs that include the use of PES considers the reduction of kWh to the final consumer but not the additional losses caused by the increase in harmonic distortion. This dissertation investigates this problem by exploring a case study of the ownership and use of television sets (TV sets) to estimate the economic impacts of residential PES on a mainly residential electricity distribution system.

Sumário

Capítulo 1 1
Introdução 1
Capítulo 2 14
Conversão de Energia e Eficiência Energética 14
2.1. Conversão de Energia 17
2.2. Eficiência Energética 21
2.3. Programas de Eficiência Energética 25
2.4. Considerações Finais 29
Capítulo 3 31
Qualidade da Energia Elétrica 31
3.1. Considerações Iniciais 32
3.2. Definição da QEE 35
3.3. Distúrbios Relacionados à QEE 37
3.3.1. Variações Transitórias de Tensão (*Transient Voltages*) 37
3.3.2. Variações Momentâneas de Tensão de Curta Duração (*Short Duration Voltage Variations*) 38
3.3.3. Variações Sustentadas de Tensão (*Long Duration Voltage Variation*) 39
3.3.4. Variações Momentâneas de Frequência (*Power Frequency Variations*) 39
3.3.5. Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion*) 39
3.3.6. Flutuação de Tensão (Voltage Flutuation) 39
3.3.7. Cintilação (*Flicker*) 40
3.3.8. Desequilíbrio de Tensão (*Voltage Imbalance*) 40
3.3.9. Algumas Causas de Distúrbios Relacionados à QEE 41
3.4. Distúrbios Relacionados à QEE 44
Capítulo 4 45
Distorções Harmônicas 45
4.1. Considerações Iniciais 46
4.2. Geração e Consequências dos Harmônicos 48
4.3. Tipos de Fontes: Propagação de Harmônicos nas Redes Elétricas 56
4.4. Considerações Finais 62
Capítulo 5 64
Impactos das Distorções Harmônicas 64
5.1. Considerações Iniciais 65
5.2. Os Programas de Eficiência Energética no Brasil e os Harmônicos 68

5.3. Algumas Medidas de Eficiência Energética e Seus Impactos nas Distorções Harmônicas 72
5.4. Procedimentos Internacionais de Padronização 76
5.4.1. Contexto Regulatório 76
5.4.2. International Electrotechnical Commission - IEC 78
5.4.3. Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE STd. 519-1992 81
5.5. Considerações Finais 83
Capítulo 6 85
Estimativas dos Impactos Econômicos dos Harmônicos 85
6. 1. Introdução 85
6. 2. Metodologia 86
6. 3. Estimativas de Potência Ativa Para Todos os Cenários 91
6. 4. Estimativas para o Cenário Referência 105
6. 5. Estimativas para o Cenário Alternativo Baixa DHTi 115
6. 6. Estimativas para o Cenário Alternativo Alta DHT_i 125
Capítulo 7 137
Conclusões e Trabalhos Futuros 137
7.1. Conclusões 137
7.2 Trabalhos Futuros 141
Referências Bibliográficas 143
Apêndice A 161
Sistemas Não Lineares 161
A.1 Conceitos de Distorções e Não Linearidades 162
A.2. Circuitos Elétricos com Formas de Ondas de Tensão e Corrente Senoidais 164
A.3. Circuitos com Distorção e sua Representação por Série de Fourier 167
A.4. Potência sob Condições Não-Senoidais 170
A.4.1. Potência no Domínio da Freqüência. 170
A.4.2. Potência no Domínio do Tempo 172
A.4.3. Definições da Norma IEEE 1459 173
Apêndice B 176
Componentes de Sequência 176
B.1 Componentes Ímpares, Pares e Contínua 176
B.2 Componentes de Sequência 178
Apêndice C 186
Ressonância 186
C.1 Ressonância Paralela 187

Apêndice D 191
Potência Ativa 191
Apêndice E 204
Potência Aparente 204
Apêndice F 209
Potência Não Ativa 209
Apêndice G 214
Perdas em Condutores - Rede Interna e Ramal de Ligação 214
Tabela G1. Quantidade de Consumidores e Potência Média Ponderada por Residência 215

Lista das Figuras

Figura 1. Forma de Onda Distorcida e sua Decomposição em Ondas Senoidais. 47
Figura 2. Fator de Deslocamento num Sistema com Carga Linear.....52
Figura 3. Espectro Harmônico de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente com Reator Eletromagnético.....53
Figura 4. Forma da Onda de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente com Reator Eletrônico (a) e seu Espectro Harmônico (b). 54
Figura 5. Capacitor para Correção do Fator de Potência vs. Fluxo Harmônico. 58
Figura 6. Retificador com Filtro Capacitivo.....59
Figura 7. Formas de Onda de Tensão Senoidal, “Plana” e “com Pico”. 71
Figura 8. Conversor Eletrônico com Fonte Chaveada. 75
Figura 9. Diagrama Utilizado Para a Rede Elétrica Tipicamente Residencial. 88
Figura 10. Fluxograma Para Estimação dos Impactos das Correntes Harmônicas. 90
Figura 11. Estimativa do Consumo Anual de Eletricidade de TVs. 92
Figura 12. Impactos Econômicos do Consumo de Eletricidade de TVs. 93
Figura 13. Estimativa do Consumo de Eletricidade Devido a Variação de 1% na Potência de TVs.....94
Figura 14. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs Devido à Variação de 1% na Potência.....96
Figura 15. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs Devido ao Uso da Função *Standby* (4 W). 97
Figura 16. Impactos Econômicos do Consumo de Eletricidade de TVs Desligadas em *Standby* (4 W).....98
Figura 17. Diminuição do Consumo de Eletricidade Pela Redução de 1 W na Potência de TVs. 100
Figura 18. Impactos Econômicos da Redução o Consumo de Eletricidade de TVs em *Stand-by* Pela Variação de 1 W na Potência. 101
Figura 19. Perdas Adicionais em Condutores Devido às Distorções Harmônicas de Corrente. 103
Figura 20. Impactos Econômicos das Perdas Adicionais em Condutores Devido às Distorções Harmônicas de Corrente.....104
Figura 21. Aumento da Capacidade Instalada (kVA) Devido às Distorçôes Harmônicas. 106
Figura 22. Impactos Econômicos do Aumento da Capacidade Instalada.....107
Figura 23. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição.....108
Figura 24. Impactos Econômicos do Aumento das Perdas Fixas em Transformadores Adicionais.....110
Figura 25. Impactos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa.....111

Figura 26. Impactos Econômicos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa. 113
Figura 27. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos. 114
Figura 28. Impactos Econômicos da Correção do Fator de Potência. 115
Figura 29. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada. 116
Figura 30. Impactos Econômicos do Aumento da Capacidade Instalada. 117
Figura 31. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição. 119
Figura 32. Impactos Econômicos Devido ao Aumento das Perdas Fixas em Transformadores Adicionais 120
Figura 33. Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa nas Redes Elétricas. 121
Figura 34. Impactos Econômicos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa. 123
Figura 35. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos. 124
Figura 36. Impactos Econômicos da Correção do Fator de Potência. 125
Figura 37. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada. 126
Figura 38. Impactos Econômicos Devido ao Aumento da Capacidade Instalada. 127
Figura 39. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição. 129
Figura 40. Impactos Econômicos Devido ao Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição. 130
Figura 41. Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa nas Redes Elétricas. 131
Figura 42. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos. 133
Figura 43. Impactos Econômicos Para Correção do Fator de Potência. 134

Lista de Tabelas

Tabela 1. Rendimentos Energético e Exergético 20
Tabela 2. Estrutura da Capacidade Instalada e do Consumo Final por Setor 21
Tabela 3. Relação de Alguns Distúrbios Relacionados à QEE.....41
Tabela 4. Relação de Alguns Distúrbios Relacionados à QEE.....42
Tabela 5. Medições de Distintas Cargas Residenciais Monofásicas.....52
Tabela 6. Distorções Harmônicas de Tensões e Correntes de Televisores.....55
Tabela 7. Distorções Harmônicas para Lâmpada Fluorescente Circular.....61
Tabela 8. Correntes Eficazes no *No-Break*.....66
Tabela 9. Razão R_{ac}/R_{dc} para Condutores em Função da Ordem Harmônica 67
Tabela 10. Benefícios e Efeitos da Conservação Sobre a Qualidade de Energia Elétrica.....69
Tabela 11. Influência da THD_i no Aumento da Corrente Eficaz (I_{rms}) e na Redução do Fator de Potência (*fp*) 70
Tabela 12. Comparação da Potência Ativa e do 3º Harmônico para Diferentes Ondas de Tensão de Alimentação 72
Tabela 13. Comparação Lâmpada Incandescente x Fluorescente Compacta 73
Tabela 14. Conservação de Energia Elétrica Pelo Uso de LFCs 74
Tabela 15. Limites de Distorção Harmônica de Corrente 80
Tabela 16. Limites de Distorção Harmônica de Corrente (I_h) em % de I_{LMAX} 82
Tabela 17. Limites de Distorção de Tensão Conforme IEEE Std.519-1992.....83
Tabela 18. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs (MWh/ano) 91
Tabela 19. Impactos Econômicos (R$) do Consumo de Eletricidade de TVs (MWh/ano).....92
Tabela 20. Estimativa da Alteração no Consumo Anual de Eletricidade (MWh/ano) Devido à Variação de 1% na Potência de TVs 94
Tabela 21. Impactos Econômicos (R$) do Consumo de Eletricidade Devido à Variação de 1% na Potência de TVs 95
Tabela 22. Estimativa das Perdas de Eletricidade (MWh/ano) da Função *Stand-by* de TVs (4W) 96
Tabela 23. Impactos Econômicos (R$) das Perdas de Eletricidade de TVs Desligadas em *Standby* (4 W).....98
Tabela 24. Diminuição do Consumo de Eletricidade (MWh/ano) em Função da Redução de 1 W na Potência da Função *Stand-by* de TVs 99
Tabela 25. Impactos Econômicos (R$) da Redução do Consumo de Eletricidade de TVs Devido à Redução de 1 W na Potência em *Standby* de TVs 100
Tabela 26. Perdas em Condutores (MWh/ano) Devido às Distorções Harmônicas de TVs.....102
Tabela 27. Impactos Econômicos (R$) Devido as Perdas nos Condutores 104

Tabela 28. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA) 105
Tabela 29. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada 106
Tabela 30. – Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais 108
Tabela 31. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais 109
Tabela. 32. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs. 111
Tabela. 33. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs 112
Tabela 34. Correção do Fator de Potência (kvar) 113
Tabela 35. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência 114
Tabela 36. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA) 116
Tabela 37. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada 117
Tabela 38. – Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais 118
Tabela 39. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais 119
Tabela. 40. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs. 121
41. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs 122
Tabela 42. Correção do Fator de Potência (kvar) 123
Tabela 43. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência 124
Tabela 44. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA) 126
Tabela 45. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada 127
Tabela 46. Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais 128
Tabela 47. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais 129
Tabela. 48. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs. 131
49. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs 132
Tabela 50. Correção do Fator de Potência (kvar) 132
Tabela 51. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência 133
Tabela 52. Sumário dos Impactos de Potência dos Harmônicos de Corrente Para o Estado Analisado 135
Tabela 53. Sumário dos Impactos Econômicos (R$) dos Harmônicos de Corrente Para o Estado Analisado 135
Tabela 54. Estimativa dos Impactos Econômicos (R$) dos Harmônicos no Brasil 136

LISTA DE NOMENCLATURAS

BEN	–	Balanço Energético Nacional
BEU	–	Balanço de Energia Útil
COP	–	Coeficiente de Performance
D	–	Potência de Distorção
EPE	–	Empresa de Pesquisa Energética
EST	–	Energy Saving Trust
f	–	Fator de Potência
f_{desl}	–	Fator de Potência de Deslocamento
fp_{dist}	–	Fator de Potência de Distorção
GLD	–	Gerenciamento do Lado da Demanda;
INEE	–	Instituto Nacional de Eficiência Energética
LFC	–	Lâmpada Fluorescente Compacta
LI	–	Lâmpada Incandescente
N	–	Potência Não Ativa
NLLs	–	Cargas Não Lineares;
P	–	Potência Ativa
PES	–	Sistemas de Eletrônica de Potência;
PIR	–	Planejamento Integrado de Recursos
PROCEL	–	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PPH	–	Pesquisa de Posse e de Hábitos de Uso;
QEE	–	Qualidade da Energia Elétrica

Capítulo 1

Introdução

A produção de energia, seja pela queima de combustíveis fósseis, seja pela fissão nuclear, ou ainda por meio de hidrelétricas e até de recursos da biomassa, provoca impactos ambientais locais e globais, cabendo citar a poluição do ar, a geração de rejeitos radioativos, o assoreamento das margens dos rios, o desflorestamento, a erosão do solo (SWISHER *et. al*, 1997).

Conforme JANUZZI e SWISHER (1997), a eficiência energética parte da constatação da possibilidade técnica da contínua oferta de produtos e serviços ensejando menores suprimentos de energia, como também por não existir necessariamente uma relação entre crescimento econômico e um maior consumo de energia. Acrescentam ainda que, na maioria das vezes, investimentos em eficiência energética representam

apenas uma fração do necessário para produzir mais energia, podendo, assim, atuar como uma alternativa à geração adicional de energia. Desta forma, a eficiência energética torna-se um poderoso instrumento diante do esgotamento de alguns recursos energéticos, das maiores restrições ambientais, bem como da possibilidade de utilizar os investimentos destinados à geração de mais energia em outras áreas, como por exemplo, em saúde e educação.

Cabe ressaltar que os objetivos de se investir em eficiência energética não estão relacionados somente à necessidade de uma menor produção de energia, mas também a uma maior competitividade comercial e industrial, à redução da probabilidade de falta de energia (segurança energética), dos impactos ambientais (globais e locais), das emissões de CO_2, bem como dos custos da energia para o consumidor final, além de possibilitar ainda aumentar a confiabilidade do sistema elétrico e postergar as necessidades de investimentos em geração, transmissão e distribuição (JANNUZZI, 2006).

Por outro lado, o uso eficiente da energia pode ser afetado por alguns fatores que são determinados pela natureza (clima, dimensão territorial, fontes primárias utilizadas), por razões sócio-econômicos (adensamento industrial, cultural) ou políticos (escolhas das trajetórias dos países), e mesmo pelo nível de renda e desenvolvimento tecnológico (MACHADO, 2004).

Neste contexto, foi lançado em dezembro de 1985 o PROCEL – Programa de Conservação de Energia Elétrica -, coordenado pelo Ministério das Minas e Energia e sob controle executivo da Eletrobrás, cujo principal objetivo é a conservação da energia elétrica, seja no lado da produção como na ponta do consumo, destacando-se a redução nas perdas técnicas das concessionárias, a racionalização do uso da energia elétrica e o aumento da eficiência energética em aparelhos elétricos. Tem contribuindo também para reduzir os impactos ambientais e fomentar a criação de empregos. No período 1986-2007 ações do PROCEL resultaram numa economia de energia total acumulada de 28,5 bilhões de kWh, um valor equivalente a cerca de 7,6% do consumo de eletricidade no Brasil em 2007 ou 31% do consumo residencial (ELETROBRÁS/PROCEL,2009).

Entretanto, na elaboração e execução de programas de conservação de energia, considera-se o sistema elétrico de potência trabalhando sob condições praticamente senoidais, em que os níveis de tensão e freqüência estão na faixa de valores estabelecidos por normas, desconsiderando, por conseguinte, os problemas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), cabendo citar, por exemplo, as distorções das formas de ondas de corrente e tensão.

Desde 1970, com o advento dos PES aplicados em retificadores, controladores de motores e sistemas de suprimento de energia, o aumento do nível das distorções em sistemas elétricos de potência vêem preocupando engenheiros de sistemas de potência (KEY e LAY, 1993). A partir de 1980, passou a haver uma acentuada preocupação com a qualidade da onda da tensão, especialmente no setor industrial (DUGAN *et al.*, 2003). Nas últimas décadas, tem se tornando evidente que os equipamentos elétricos apresentam mau funcionamento devido a falhas na energia recebida.

Convém ressaltar que a busca por diminuir custos pode reduzir investimentos em manutenção e na expansão dos sistemas elétricos, resultando como conseqüência, na degradação da confiabilidade do sistema.

Conforme LIMA e ROSS (1996), a QEE vem adquirindo cada vez mais uma maior relevância, em virtude da substituição de sistemas eletromecânicos, insensíveis a interrupções de segundos, por sistemas eletroeletrônicos, sensíveis a oscilações de milissegundos. Esta mudança tem contribuído para um aumento da produtividade industrial pelo uso mais eficiente da energia elétrica, como forma de competir na economia globalizada, mas também é mais exigente quanto aos requisitos de QEE.

Assim, transitórios no sistema elétrico, a exemplo das energizações de linhas de transmissão e de transformadores, como curtos-circuitos em quaisquer pontos do sistema, podem resultar na interrupção de unidades industriais automatizadas. Há que se lembrar que a geração de energia elétrica distante dos grandes centros de consumo requer longas linhas de transmissão, o que torna o sistema nacional particularmente vulnerável aos efeitos dos curtos-circuitos, exigindo conhecimento e estratégias próprias. Acrescente-se a isso o aumento considerável nos setores comercial, industrial

e comercial, da quantidade de cargas que utilizam dispositivos de eletrônica de potência (PES), que apresentam comportamento não linear. Essa situação torna-se mais agravada quando há o uso simultâneo de uma grande quantidade de cargas não-lineares num período em que o sistema opera sob carga leve com pouco uso de cargas lineares[1]. Medições de grandezas elétricas relacionadas à QEE têm sinalizado ocorrências que podem levar a uma situação crítica em termos de impactos ao sistema elétrico e resultar na atuação intempestiva dos relés de proteção das redes elétricas de transmissão ou distribuição[2].

As lâmpadas de descarga apresentam uma característica tensão versus corrente fortemente não linear, incrementando o conteúdo de harmônicos na rede (FARIAS *et al*., 2003). De acordo com esta referência, as lâmpadas de descarga geralmente são utilizadas em conjunto com reatores que podem apresentar um baixo fator de potência, absorvendo reativos, bem como causando distorções nas redes elétricas.

Assim, o aumento da distorção harmônica se deve, em muito, à proliferação do uso de PES, que são muito utilizados para aumentar a eficiência energética dos equipamentos elétricos, cabendo citar a aplicação de inversores de freqüência para o controle da velocidade de motores e de controladores de fluxo luminoso (*dimmers*), bem o uso de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos em substituição às incandescentes, por, além do aumento expressivo do número de fontes chaveadas, a exemplo dos computadores pessoais, televisores modernos, carregadores de celulares; que se somam à grande utilização de lâmpadas de descarga, levando-se em consideração ainda os impactos devidos às cargas pesadas como fornos a arco e laminadores.

---

[1]Um exemplo se refere ao uso simultâneo de milhares de TVs durante a realização dos jogos da seleção brasileira nas Copa do Mundo de Futebol (DUARTE *et al*., 2007).

[2]Para transmissão em corrente contínua (CC) de Itaipu até a estação de Furnas em Ibiúnas (SP), a corrente alternada (CA) é convertida para CC por meio de retificadores instalados em Itaipu e transformada novamente em CA utilizando inversores localizados em Ibiúnas (FARIAS, 2006). Como tanto o processo de retificação quanto de inversão originam correntes harmônicas, foi previsto originalmente no projeto de Furnas a instalação em Ibiúnas de dois filtros de harmônicos, um principal e outro reserva, para filtrar estes harmônicos oriundos dos inversores em Ibiúnas. Segundo esta referência, mesmo em ocasiões quando este elo CC não se encontrava em operação, ou seja, sem a operação dos inversores, foram observadas ocorrências com consideráveis níveis de harmônicos em linhas da rede básica, inferindo-se, pois, que estes harmônicas seriam oriundos das cargas conectadas ao sistema elétrico (FARIAS *et al*., 2006).

Por outro lado, os PES são bastante sensíveis à QEE, sendo que, na avaliação do ganho em eficiência energética, são consideradas condições de fornecimento da energia pelo distribuidor sob uma forma de onda de tensão senoidal e não de maneira distorcida. Assim, os próprios equipamentos economizadores de energia, ao mesmo tempo em que demandam uma energia de qualidade numa forma de onda senoidal, contribuem fortemente para a poluição do sistema elétrico. Em virtude da pequena potência, individualmente os equipamentos eletrônicos não causam impactos nas redes elétricas, mas a proliferação do uso de milhares destas cargas pode provocar a degradação da qualidade do sistema elétrico, atuando de forma a aumentar as perdas, além de causar danos e prejuízos aos consumidores, à concessionária, como a todos os agentes do sistema interligado nacional (SOUZA e ROSS, 2003).

Esta situação normalmente ocorre em sistemas de distribuição, quando as tensões aumentam, incorrendo em maiores correntes harmônicas[3] nos transformadores de distribuição, devido ao fato de existirem menos cargas lineares para amortecerem a ressonância[4], ou seja, situação em que as reatâncias capacitiva e indutiva se igualam, tornado mínima a impedância da rede elétrica (DUGAN *et al.*, 2003).

Uma energia de má qualidade gera prejuízos e perdas de produção, sendo que os custos não são pequenos, tanto para consumidores quanto para concessionárias. Pela análise da relação entre o Produto Interno Bruto e o consumo de energia elétrica nacional, entre os anos de 1985 a 1994, estima-se que o prejuízo médio de 1 MWh de interrupção seja de aproximadamente US$ 2.500 (GOMES *et al.*, 1995).

Conforme relatório do EPRI (EUA) de junho de 2001, as perdas econômicas relacionadas a fenômenos de QEE nos EUA atingiram um montante de US$ 24 bilhões anuais. Este relatório enfatiza a necessidade de eletricidade de qualidade digital com

---

[3] A geração de energia elétrica no Brasil, assim como sua transmissão e distribuição, como também o funcionamento das cargas, se baseiam numa operação com freqüência centrada em 60 Hz, denominada de freqüência fundamental. Entretanto, além de outras ocorrências, a exemplo da energização de transformadores de potência e manobras de bancos de capacitores, a proliferação do uso de cargas não-lineares que operam em altas freqüências (centenas e milhares de Hertz), tem aumentado consideravelmente o conteúdo de correntes em freqüências múltiplas (harmônicas) da fundamental.

[4] A condição de ressonância é apresentada no Apêndice C.

continuidade (*always on*) e conformidade *(always perfect*). A estimativa atual é que estes valores alcancem cerca de US$ 35 bilhões (VASCONCELOS, 2006). Considerando-se somente a relação entre os PIBs, podemos inferir estimativas de perdas para o caso do Brasil na ordem de US$ 3,5 bilhões.

No caso específico da presença de harmônicos nos sistemas de potência, surgem problemas de interferências com sistemas de comunicação, além de ocorrerem um aumento das perdas relacionadas com o transporte e a distribuição de energia elétrica, bem como uma maior degradação e possível mal funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede, em especial daqueles constituídos de eletrônica de potência, que vem aumentando cada vez em quantidade e são mais sensíveis por incluírem sistemas de controle microeletrônicos que operam com níveis de energia muito baixos.

No setor industrial podemos ter os seguintes custos diretos por interrupção: de reparo ou reposição, da produção interrompida, de recuperação e reinicio da produção, de geração própria, de proteção contra interrupção, custo de produtos estragados (antes/durante e depois do processo industrial), os associados à perda de dados, extras (seguro, imagem, meio ambiente, quebra de contrato) e de sazonalidade (LEITE, 2005).

Não somente à indústria, mas também ao comércio, ao setor de serviços e até mesmo ao consumidor residencial podem ser associados custos de interrupção do fornecimento de energia elétrica. O antigo GCOI (1991) realizou uma pesquisa para a obtenção dos custos nacional e regional de interrupção, para as classes de consumidores comercial e industrial, considerando os custos diretos incorridos pelo consumidor devido à interrupção, referentes à perda de matéria prima ou de produto, da mão-de-obra ociosa e do capital ocioso, do tempo necessário para o reinício do processo produtivo, etc. No caso do consumidor residencial, esta pesquisa considerou a residência como uma unidade de produção, em que os produtos são consumidos internamente, não possuindo, pois, valor de mercado. Isso porque dentre as atividades predominantemente relacionadas à residência estão os serviços com ênfase no lazer. Neste caso a produção de lazer difere da produção de alguns outros bens domésticos haja vista a relativa impossibilidade de reprogramação. A premissa é que o indivíduo

seja capaz de substituir o lazer por trabalho adicional, desde que a remuneração tenha o valor percebido no seu trabalho normal ou o supere.

Num mercado globalizado há grande preocupação com a competitividade em níveis mundiais, devendo-se, pois, eliminar todo tipo de perda, como também modernizar a produção, por meio do uso de máquinas sensíveis e altamente automatizadas, além de se produzir bens de maior valor agregado para aumentar a participação econômica nas exportações. Por exemplo, laminação, produção de automóveis, fabricação de tintas e corantes, entre tantos outros, requerem um suprimento de energia sem falhas. Assim, a eletricidade torna-se um relevante insumo do setor produtivo.

A partir do início da última década, com a acentuada abertura das importações brasileiras ao mercado internacional, houve uma busca por maior eficiência nos processos produtivos industriais, bem como facilitação de acesso a equipamentos eletro-eletrônicos mais modernos. A aprovação da lei de eficiência energética, Lei 10.295/2001, e, principalmente, o racionamento de energia no ano de 2001, provocaram profundas mudanças técnicas e comportamentais quanto ao consumo de energia elétrica no Brasil. Sob a ótica do consumidor uma questão econômica muito importante é a redução do consumo de energia ativa. De outra forma, pelo lado da oferta o distribuidor de energia elétrica deve dimensionar sua rede para suportar a ocupação da potência aparente, garantir quanto à energia faturada o desempenho dos seus medidores, bem como a qualidade de tensão fornecida e a freqüência de operação.

No tocante às inter-relações entre fabricação, comercialização e consumo de equipamentos elétricos, os fornecedores de equipamentos geralmente se encontram num mercado muito competitivo em que a maioria dos consumidores compra baseando-se no menor custo. Diante da inexistência de limites de distorções harmônicas nos próprios equipamentos elétricos, não há incentivo para o fabricante adicionar componentes de compensação harmônicas nos equipamentos por ele produzidos (PILEGGI *et al*., 1995). Adicionalmente, muitos fabricantes também não têm conhecimento dos distúrbios que os equipamentos elétricos por eles fabricados podem ocasionar nos sistemas de potência. Finalmente, aos usuários finais que não têm a percepção destes problemas, por

apenas realizar a compra e operação dos equipamentos elétricos, deve recair por último a responsabilidade para se corrigir inadequações nas cargas, ainda mais quando se constata que em inúmeros equipamentos elétricos sequer há informação acerca do consumo de eletricidade (ELETROBRÁS, 2007).

Dessa forma, há a necessidade de regulação com as especificações dos equipamentos elétricos que inclua critérios tanto de QEE quanto da performance de potência. Também seria de muita utilidade que os fornecedores de energia pudessem disseminar as informações a respeito da QEE, assim como os requerimentos para que as cargas pudessem operar adequadamente em condições reais de uso.

No ambiente não linear e desequilibrado, além das potências ativa e não ativa definidas para o domínio linear e equilibrado para circuitos elétricos em regime permanente, surgem os conceitos das potências harmônicas e de desequilíbrio, conforme definição no Apêndice I. O fator de potência, definido no ambiente linear pela razão entre as potências ativa e aparente, passa a ser alterado incluindo o fator de potência de distorção no ambiente distorcido das cargas não lineares. Consequentemente, diante do aumento massivo contínuo das cargas com características não lineares deve-se pensar no planejamento energético, tanto da operação quanto da expansão do sistema elétrico, considerando-se o fator de potência, incluindo os casos onde somente existe tarifação da energia ativa, como ocorre com a grande maioria dos consumidores residenciais.

As distorções harmônicas provocam uma diminuição do fator de potência, implicando num aumento da potência aparente a ser disponibilizada pelo sistema de potência. Ocorre nesse caso, um incremento na capacidade instalada, consequentemente, há um aumento no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia, para entregar cada quilowatt adicional requerido para suprir todas as perdas, incluindo a de condutores e transformadores.

A proliferação das cargas que utilizam PES leva a este contraponto: o crescente aumento da geração de harmônicos nas redes elétricas por cargas que são mais sensíveis à qualidade de energia. Some-se a isso a possibilidade da atuação intempestiva dos

elementos de proteção das redes elétricas e obtêm-se os requisitos básicos que ensejam a necessidade da elaboração de uma regulação específica para o tema em questão.

Não obstante, torna-se importante lembrar que conforme SANTOS *et al.*, (2005), hoje em dias uma das grandes preocupações da engenharia de distribuição se refere à propagação de grandezas harmônicas na rede, de forma a avaliar a influência da distorção nas formas de onda de tensão ou de corrente, produzida por um dado consumidor, nas instalações dos outros consumidores da rede.

Quando a implementação da Eficiência Energética é realizada pelo uso de cargas com PES, correntes elétricas distorcidas são drenadas das redes elétricas que, em interação com a impedância do sistema elétrico, provoca distorções na tensão de alimentação, o que resulta em distúrbios não só na própria carga não linear, mas também em outras cargas supridas por esta tensão distorcida. Esta degradação causa perdas adicionais de potência, maior sobreaquecimento dos elementos da rede elétrica (transformadores, condutores, etc.), bem como aumento da deterioração dos dielétricos. Estes efeitos danosos devem ser considerados, como instrumentos de gestão de políticas energéticas e de gerência do insumo energético, fazendo com que a análise técnico-econômica do planejamento energético do sistema elétrico evolua para as condições do ambiente não linear.

Neste contexto, a confiabilidade e a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), cuja melhor denominação seria aquela dada por Qualidade da Potência (*Power Quality*), tornaram-se assuntos de vital relevância em economias fortemente dependentes de sofisticadas Tecnologias de Informação (TI), assim como de processos industriais controlados por computadores, além de baseadas no uso de circuitos digitais, que necessariamente se utilizam dos sistemas de telecomunicações. Todas estas aplicações são muito sensíveis aos distúrbios e às distorções da onda senoidal tanto da tensão quanto da corrente elétrica.

Por outro lado, tanto o desenvolvimento econômico dos países quanto a necessidade de se inserir grandes massas humanas a um patamar mínimo de condições dignas de vida, requer um aumento da necessidade de geração de energia adicional.

Entretanto, diante da limitação dos recursos energéticos, para atender a estas demandas, o conceito de desenvolvimento econômico evoluiu para um conceito mais amplo, de desenvolvimento sustentável, que busca uma maior inserção na matriz energética de fontes renováveis de energia, além do uso racional da energia, especialmente pela aplicação de tecnologias eficientes.

Estas questões afetam não apenas os entes do setor elétrico, geradores, transmissores e distribuidores, mas alcançam todos os setores da economia, incluindo o industrial, o comercial e o residencial, além de outros (agropecuário, público, transportes, etc.). No caso específico das distorções harmônicas de tensão ou de corrente existem diversas razões para a redução de seus níveis nos sistemas elétricos de potência, cabendo citar, a imposição de limites pelas concessionárias baseando em normas e/ou padronizações, as interferências em sistemas de telecomunicações, a redução do sobreaquecimento dos equipamentos instalados no sistema de potência, assim como a diminuição do estresse sofrido por estes equipamentos submetidos a tensões distorcidas.

Cabe ressaltar que as relações entre Eficiência Energética e QEE não se restringem ao caráter técnico e econômico, mas incluem, entre outros, aspectos institucionais e alcançam o ordenamento jurídico. Entretanto, estas questões não caminham em conjunto, cabendo citar que são realizados congressos, seminários e *workshops* relacionados à Eficiência Energética separadamente daqueles afetos à QEE, da mesma forma que existem associações e entidades envolvidas com Eficiência Energética, mas que não tratam das questões de QEE.

Em adição, em empresas do setor elétrico, sejam atuantes na transmissão ou distribuição de energia, em centros de pesquisa ou em instituições de operação e planejamento do sistema elétrico, assim como em órgãos de regulação ou normatização, nota-se que geralmente eficiência energética e QEE são assuntos tratados em departamentos ou diretorias distintas, sendo que em alguns casos a QEE não é um assunto recorrente, ainda que medidas de eficiência energética implementadas por PES contribuam consideravelmente para a degradação da QEE, resultando num aumento dos custos não contabilizados desde a geração, passando pela transmissão e chegando às redes de distribuição de energia elétrica.

Consultando a literatura, foram encontradas inúmeras publicações abordando os impactos das distorções harmônicas provocadas por equipamentos que utilizam PES, alguns trabalhos enfocando a relação entre suas aplicações e o consumo de eletricidade, mas poucos quantificando os impactos econômicos quando se trata de cargas eletrônicas monofásicas em redes de distribuição tipicamente residenciais. Entretanto, não foi encontrada na literatura estimativa dos impactos econômicos dos diversos componentes das redes de distribuição de baixa tensão (perdas em condutores, transformadores, correção do fator de potência, etc.) em virtude das distorções harmônicas de correntes geradas por cargas com PES em longo período a partir de dados de posse e de hábitos de uso de equipamentos com PES.

Assim, utilizando dados das Pesquisas de Posse e de Hábitos de Uso (PPHs) para o Setor Residencial, realizada pela PUC-Rio sob a coordenação da Eletrobrás nos anos de 1997 e 2005, e baseando-se nos valores das distorções harmônicas de corrente medidas em redes de distribuição tipicamente residenciais (DECKMANN *et al.*, 2005; DECKMANN e POMÍLIO, 2005; POMÍLIO e DECKMANN, 2004), este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia para avaliar os impacto devido as distorções harmônicas de corrente nas redes elétricas de distribuição tipicamente residenciais e estimar os respectivos valores econômicos relacionadospor uma maior circulação de correntes harmônicas originadas por cargas eletrônicas monofásicas com PES.

Para avaliar os impactos econômicos da degradação da QEE no tocante às distorções harmônicas de corrente devido ao uso massivo de cargas com PES, utilizados para aumentar a eficiência energética dos equipamentos elétricos, foi feito um estudo de caso analisando a posse e uso de TVs, que são a maior fonte de distorções harmônicas de correntes nas redes de distribuição tipicamente residências (DECKMANN *et al.*, 2005; LUNDQUIST, 2001). As implicações econômicas entre a aplicação da eletrônica de potência, que tem como um de seus objetivos aumentar a eficiência energética, e seus impactos nas redes elétricas são de vital importância, para os entes de planejamento e operação do sistema elétrico, assim como para órgãos reguladores e normatizadores, principalmente no sentido deestabelecer procedimentos mínimos de performance dos equipamentos elétricos, tanto no que se refere à eficiência energética quanto à QEE. A

importância da QEE tem como razão os seus impactos econômicos envolvendo as empresas do setor elétrico, de transmissão, geração e distribuição, seus clientes, como também os fornecedores de equipamentos (DUGAN *et al*., 2003).

O Capítulo 2 abordará os conceitos da conversão de energia e eficiência energética, procurando mostrar que geração e consumo de energia podem ser melhor definidos como conversão de formas de energia e que os vetores ou fluxos energéticos possuem diferentes conteúdos tanto quantitativo quanto qualitativo.

De forma a propiciar uma adequada compreensão do termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE), que também pode ser designada como Qualidade da Tensão, o Capítulo 3 apresentará algumas definições da QEE e seus diversos distúrbios relacionados.

Considerando que o propósito deste trabalho é estimar os impactos dos harmônicos de corrente nas redes elétricas de distribuição, no Capítulo 4 serão apresentadas a origem do termo harmônica, seus conceitos, assim como as principais fontes de harmônicos.

No Capítulo 5 serão abordadas as implicações correlacionadas às medidas de aumento da eficiência energética que causam distorções harmônicas. Também serão apresentadas as duas principais recomendações internacionais no tocante à limitação das distorções harmônicas nas redes elétricas.

No Capítulo 6 será desenvolvida uma metodologia para estimar os impactos de potência das distorções harmônicas de corrente nas redes elétricas e estimar as respectivas implicações econômicas em comparação com a situação sem distorção harmônica. Para isso, será realizada uma análise da sensibilidade da variação da potência dos equipamentos elétricos, do aumento tanto da corrente de neutro quanto da capacidade instalada do sistema de distribuição e das perdas fixas em transformadores, bem como da necessidade da correção do fator de potência de distorção e o custo de oportunidade da comercialização de energia não ativa como energia ativa.

No Capítulo 7 serão feitas as Considerações Finais e apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conversão de Energia e Eficiência Energética

Este Capítulo tem por objetivo mostrar que os termos geração e consumo de energia são de fato conversões de formas de energia e abordar as questões de eficiência energética tanto quanto aos seus aspectos quantitativos como qualitativos. Além disso, serão abordadas as questões relativas à eficiência energética e aos programas de eficiência energética no Brasil.

Segundo Leite (2007, p.468), de modo que se possa alcançar o objetivo de atender a demanda de energia com o mínimo impacto sobre o meio ambiente num horizonte de médio prazo, a conservação caracteriza-se como a mais importante fonte de energia. De acordo com esta referência, a conservação é entendida como "a soma das ações voltadas para o controle do desperdício de energia e materiais, operação racional

de máquinas e utensílios, eficiência dos projetos e da construção dos equipamentos de produção e transformação de energia e eficiência das próprias máquinas, instalações e equipamentos em que a energia é utilizada".

De uma forma geral, o termo eficiência energética conduz a visão tradicional do problema energético sob uma ótica quantitativa ou entálpica. Contudo, como será descrito mais adiante, existe um caráter qualitativo na análise energética que distingue entalpia (ênfase quantitativa) de exergia (ênfase qualitativa). Uma definição mais adequada para energia foi proposta por Maxwell em 1872: "energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança" (NOGUEIRA, 2001). De acordo com esta referência este conceito se relaciona com mudanças de condições e alterações de estado de um sistema, além de incluir a idéia de que a energia permite modificações de estado que implicam em vencer resistências. Assim, qualquer processo relacionado a alguma mudança de estado requer a existência de fluxos energéticos.

Numa sociedade em que tempo é uma questão de relevada importância, um conceito usualmente associado à energia é o da potência que corresponde ao fluxo de energia no tempo. Mesmo que haja uma preocupação em atender uma determinada demanda energética em kWh, de uma forma geral existe uma imposição de tempo dado pelo requerimento de potência avaliada em kW. Neste sentido, verifica-se que a taxa de utilização dos fluxos energéticos tem tanta importância quanto sua simples disponibilidade.

Segundo NOGUEIRA (2001, p.1), atualmente energia tem uma acepção relacionada a um conceito que surgiu a partir de meados do século XIX, criado paralelamente à termodinâmica. Convencionalmente energia é definida como a capacidade de um sistema realizar trabalho. Porém, o uso desta definição pode ser corretamente aplicado somente para algumas formas de energia, como a mecânica e a elétrica. Um exemplo se refere à comparação entre energia térmica e trabalho em que este tem uma maior qualidade já que pode ser totalmente convertido em calor que, por sua vez, tem apenas parte da energia contida de seu fluxo térmico convertida em trabalho. Dentre as principais formas de energia incluem-se (NOGUEIRA, 2001):

- nuclear – resultante da fusão dos núcleos de átomos leves por meio de um processo físico em que ocorre um déficit de massa, entre os reagentes e os produtos de reação, que corresponde a uma considerável quantidade de energia liberada. Tem aplicação destrutiva por ainda ser uma reação não adequadamente controlável como ocorre nas bombas de hidrogênio;
- atômica – relacionada aos processos de fissão de átomos pesados (urânio, tório, plutônio) devido à instabilidade natural ou forçada de alguns isótopos destes materiais, que têm a tendência de ser converterem em outros materiais de menor número atômico, liberando energia em virtude da perda de massa ocorrida. Tanto o processo de fusão quanto o de fissão apresentam uma dependência entre a variação de massa e a energia liberada, dada pela expressão proposta por Albert Einstein, em que a energia é o produto da variação da massa pelo quadrado da velocidade da luz. Haja vista ser a velocidade da luz muito elevada, para pequenas variações de massa são obtidas grandes quantidades de energia;
- química – relacionada às ligações químicas existentes nas moléculas dos reagentes. Em geral sua aplicação mais usual associa-se aos processos de combustão de motores, fornos e caldeiras, onde a energia química de combustíveis é convertida em energia térmica. A energia química dos combustíveis também pode ser convertida diretamente em energia elétrica através das células combustíveis, num processo com alta eficiência, por meio de reações isotérmicas a temperaturas relativamente baixas;
- térmica – pode se apresentar essencialmente como radiação térmica ou energia interna. A energia térmica pode ser resultante da conversão da energia química por meio de uma reação de combustão. A energia interna se relaciona à capacidade de propiciar mudanças, associada à agitação térmica de um material, podendo ser medida por sua temperatura. A transferência de energia de um corpo para outro ocorre por meio dos processos de condução de calor, quando o fluxo de energia se dá através de meios estáticos, ou de convecção térmica, quando o fluxo de energia requer a movimentação de um fluido.
- mecânica – pode ser apresentar nas formas de energia mecânica potencial, associada diretamente a uma força estática, ou de energia mecânica cinética, relacionada à inércia das massas em movimento. A energia potencial pode ser subdivida em elástica, como a acumulada tanto em molas quanto em gases comprimidos, e gravitacional, a exemplo da energia hidráulica na água acumulada em uma represa. A

energia cinética pode considerar velocidades lineares, como ocorre com a energia eólica, ou movimentos rotacionais, a exemplo dos volantes de inércia;

- magnética – relacionada à acumulação de campos magnéticos que podem ter aplicação prática, por exemplo, na ação de transformação de energia elétrica em transformadores;
- elétrica – ainda que sua existência seja observada nas cargas estacionárias (nuvens eletricamente carregadas, capacitores elétricos, etc.), usualmente se relaciona ao fluxo de cargas elétricas através de um campo de potencia elétrico. É dada pelo produto da potência elétrica pelo tempo em que se desenvolve esta potência. A potência, por conseguinte, é obtida pelo produto entre a corrente elétrica e a tensão medida entre os dois pontos em que se observou a circulação desta corrente, que pode se dividir em corrente contínua, como ocorre nas baterias onde seu valor é constante com o tempo, ou corrente alternada, como ocorre nas redes elétricas onde seu valor é senoidalmente variante no tempo com freqüência de 60 Hz no caso brasileiro. A corrente alternada é a forma mais simples tanto para produção e transformação quanto para transporte e utilização em máquinas elétricas.

2.1. Conversão de Energia

Diante da constatação de que a principal característica dos potenciais energéticos é a sua possibilidade de interconversão de forma a propiciar mudanças, tanto o uso do termo "geração de energia" quanto "consumo de energia" deveria se denominar "conversão de energia". A conversão de uma forma de energia em outra pode ser de modo natural ou forçado. Segundo NOGUEIRA (2001, p.10), os processos de conversão de energia são regidos por duas leis fundamentais: 1) Lei da Conservação da Energia[5] ou Primeira Lei da Termodinâmica e 2) Lei da Dissipação de Energia ou 2ª Lei da Termodinâmica.

A 1ª Lei da Conservação da Energia, formalmente estabelecida de modo independente por Joule e Meyer em torno de 1840, estabelece como postulado que

[5] A exceção ocorre para as reações atômicas ou nucleares onde ocorrem transformações de massa em energia.

energia não se cria nem se destrói, mas pode ser transformada em diferentes formas, ou seja, os fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema tem somatória constante, como representada pela Equação 1 (NOGUEIRA, 2001).

$$\sum E_{entra} = \sum E_{sai} + \Delta E_{sistema} \tag{1}$$

De acordo com a Equação 1, a somatória da energia que entra em um sistema é igual a somatória da energia que saí mais as variações no estoque de energia do sistema considerado.

Por meio da 1ª Lei da Conservação de Energia pode se quantificar os fluxos energéticos por meio da realização de balanços e da determinação das perdas. Além disso, como para um processo em regime permanente invariante no tempo, ou seja, em que não ocorrem variações médias de estoque, $\Delta Esistema$, a soma do fluxo energético de entrada é igual ao de saída, por meio desta lei pode ser derivado o conceito de eficiência energética ou desempenho de um sistema energético, conforme a Equação 2 (NOGUEIRA, 2001).

$$\eta_{energ} = \frac{E_{útil}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}} \tag{2}$$

Pela Lei da Dissipação da Energia, em todos os processos reais de conversão de energia, sempre haverá como produto uma parcela de energia térmica, ou seja, inevitavelmente existirão perdas térmicas nestes processos resultando numa degradação ou perda da qualidade da energia. Deste modo para todo fluxo energético (*E*) há uma fração passível de ser transformada em trabalho mecânico, denominada exergia, e outra fração que não pode ser transformada em trabalho e é perdida na forma de dissipação térmica, chamada de anergia (SZKLO, 2003). Diferentemente da energia, a exergia, que é o máximo trabalho que pode ser efetuado por um processo, não se conserva em um processo real. Já o conceito de trabalho perdido tem associação com a irreversibilidade das conversões, sendo a entropia a medida desta irreversibilidade. Diante deste conceito, a variação da entropia possibilita medir a reversibilidade de um determinado processo, ou seja, permite medir a perda de capacidade do sistema de realizar trabalho. Assim,

quanto maior a entropia total de um sistema, menor será a exergia do fluxo energético e maior será a indisponibilidade de energia para produzir trabalho.

Em 1865, Rudolf Clausius mostrou que são as imperfeições nos processos de conversão energética que determinam o aumento líquido da entropia no Universo (NOGUEIRA, 2001). Segundo esta referência, Carnot mostrou que para o caso dos ciclos térmicos de potência, a reversibilidade dos fluxos contidos na energia térmica em energia mecânica depende da temperatura da fonte térmica, de acordo com a Equação 3 do rendimento máximo das máquinas térmicas:

$$\eta revers = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{3}$$

onde:

T_1 – fonte térmica de maior temperatura;

T_2 - fonte térmica de menor temperatura;

Verifica-se por esta equação, válida para máquinas térmicas reversíveis, que o rendimento aumenta com a elevação de T_1 e a redução de T_2, mas é sempre menor do que 100%. Como o trabalho pode ser totalmente convertido em qualquer outra forma de energia, mas o calor pode apenas ser parcialmente convertido, um fluxo de energia diretamente conversível em trabalho está associado a uma energia de alta qualidade, ao passo que um fluxo térmico é relacionado a uma energia de baixa qualidade (NOGUEIRA, 2001). Por conseguinte, tanto para um fluxo de energia elétrica quanto mecânica corresponde totalmente à energia, enquanto que num fluxo de calor a exergia é dependente da temperatura.

O rendimento exergético apresenta várias formulações. Como exemplo, pode considerar a razão da exergia requerida para alcançar um determinado objetivo por meio de um processo totalmente reversível pela exergia consumida num processo real para atingir este mesmo objetivo, conforme a Equação 4 (NOGUEIRA, 2001):

$$\varepsilon_1 = \frac{Ex_{util}}{Ex_{consumida}} \tag{4}$$

como também pode indicar que fração da exergia fornecida ao processo pode ser convertida (NOGUEIRA, 2001), conforme a Equação 5:

$$\varepsilon_2 = \frac{Ex_{util} + Ex_{não usada}}{Ex_{consumida}} \tag{5}$$

A Tabela 1 mostra os rendimentos energéticos para alguns processos e equipamentos.

Tabela 1. Rendimentos Energético e Exergético

Sistema	Rendimento (%)	
	Energético	Exergético
Motor Diesel (> 20.000 HP)	36 [44 – 30]	36
Motor Elétrico (> 5 HP)	90 [95 – 85]	90
Chuveiro Elétrico	90 [97 – 75]	5
Ar Condicionado Elétrico (COP = 2) [4 – 2]	-	14
Refrigerador Doméstico (COP =1) [1 – 0,9]	-	12
Bomba de Calor (COP = 3,5) [4,5 - 2]	-	54

Fonte: SCHAEFFER, R. (1990).

Observando a Tabela 1, onde pode se notar que no aquecimento por meio do uso da energia elétrica é acentuada a degradação da energia devido à conversão de energia de alta qualidade, eletricidade, em calor de baixa temperatura, ou seja, é baixa a razão entre a soma das exergias útil e não consumida, contidas no fluxo da energia térmica na saída, e a exergia consumida, contida no fluxo energético de eletricidade na entrada. Em outros termos, isso significa que enquanto o conteúdo energético do fluxo térmico de baixa qualidade na saída, em torno de 30º a 40ºC, pode ser apenas conversível numa pequena fração de energia mecânica, o conteúdo energético de eletricidade pode ser totalmente conversível em trabalho.

Pela análise da Tabela 1, pode se observar, que diferentemente do rendimento energético onde o fluxo energético não utilizado é rejeitado como energia térmica de baixa qualidade, o coeficiente de performance (COP) apresenta valores maiores do que a unidade. A explicação é que para alguns equipamentos, tais como ar-condicionado,

geladeira e bomba de calor, o fluxo energético não utilizado é rejeitado como energia térmica de maior qualidade. Assim, o COP é dado pela razão entre o conteúdo energético total consumido e o conteúdo energético útil para a realização do processo.

Conforme visto, existem diferentes formas de energia com diferentes qualidades em seus fluxos energéticos relacionados à capacidade de conversão em outros tipos de energia. Dessa forma, a performance energética dos sistemas não pode ser totalmente descrita por meio do balanço entálpico ou quantitativo, mas deve-se avaliar também a característica qualitativa ou exergética. Assim, como será discutido mais adiante, pode se observar que diferentemente da visão tradicional, a eficiência energética também deve ser abordada pela ótica da qualidade da energia.

2.2. Eficiência Energética

Entre 1996 e 2004 no Brasil, que é a maior economia da América do Sul, houve um aumento da capacidade instalada total de geração elétrica de aproximadamente 61 GW para cerca de 91 GW, ao mesmo tempo em que ocorreu um aumento do consumos finais de eletricidade total e do setor residencial, respectivamente, de uma faixa 278 TWh e 69 TWh para um patamar de 360 TWh e 79 TWh (EPE, 2009). A Tabela 2 apresenta a estrutura da capacidade instalada de geração de energia elétrica segundo a natureza da fonte (hidroelétrica, termoelétrica convencional, termoelétrica nuclear), ressaltando o percentual de participação das fontes não-renováveis, e do consumo final de energia elétrica por setor (industrial, residencial, comercial, outros).

Tabela 2. Estrutura da Capacidade Instalada e do Consumo Final por Setor

Capacidade Instalada			Consumo Final por Setor		
Ano	1996	2004	Ano	1996	2004
Hidro	87,4%	76,0%	Industrial	46,7%	47,8%
Termo	11,6%	21,7%	Residencial	24,9%	21,8%
Nuclear	1,1%	2,2%	Outros	15,9%	13,9%
Não Renovável	12,6%	24,0%	Comercial	12,5%	16,5%

Fonte: EPE (2009).

Da Tabela 2 pode-se notar que neste período ocorreu um aumento da capacidade instalada de geração de energia elétrica, com uma elevação considerável da participação de fontes não-renováveis de energia e, consequentemente, redução do percentual de fontes renováveis de energia. Do lado do consumo, foi observado um aumento da participação dos setores industrial e comercial ao mesmo tempo em que houve uma diminuição do percentual de consumo do setor residencial, assim como de outros setores (transportes, público, agropecuário).

Em virtude do aumento dos custos da oferta e das maiores restrições ambientais, o planejamento elétrico convencional cuja prática preferencial se baseia na expansão da oferta a custo mínimo de modo a atender a demanda futura de energia com segurança, deve caminhar para a integração de variadas opções tecnológicas, dentre as quais a aplicação da eficiência energética e o gerenciamento do lado da demanda (GLD), bem como do maior uso de fontes de geração descentralizadas e produtores independentes (JANUZZI *et al.* 1997). De acordo com esta referência, esta visão introduzida pelo Planejamento Integrado de Recursos (PIR) tem como resultado esperado a criação de um ambiente econômico mais propício para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias limpas, com produção menos centralizadas, com papel de destaque para as fontes renováveis, e de uso final mais eficiente. Acrescenta ainda que no contexto da avaliação e seleção das alternativas técnicas potenciais, isto significa integrar outros componentes ao custo, cabendo citar custos ambientais e sociais. O custo ambiental, que representava uma dificuldade da implementação destas medidas na economia de mercado, após a aplicação do Protocolo de Kyoto, após a adesão da Rússia em 2005, passou a ter conotação econômica. Já o custo social passou a incorporar os ganhos com a criação de milhares de empregos que requerem menor especialização do que aqueles demandados para a geração adicional de energia, o que se torna bastante relevante especialmente em países menos desenvolvidos como o Brasil.

Segundo Geller (2003, p.2), a eficiência energética atualmente é uma questão crucial para a humanidade, considerando que as atuais fontes de energia e os padrões de uso são insustentáveis. De acordo com esta referência, os problemas relacionados aos atuais padrões de uso de energia, bem com suas tendências, podem ser mitigados pela aplicação da eficiência energética e pelo uso de fontes alternativas de energia.

Devido às alterações na estrutura do setor elétrico brasileiro, que se caracterizou nas últimas décadas por uma forte influência governamental, como pela aplicação de tarifas reduzidas comparativamente ao mercado governamental, e também em virtude do aumento do valor das tarifas, atualmente é crescente o interesse por programas e projetos de eficiência energética (MARTINEZ, 2009).

Constatando-se que os maiores ganhos de eficiência energética podem ser obtidos na conversão para os usos finais, como forma de possibilitar uma estimação da ordem de grandeza da economia possível do uso final da energia, foram conduzidos estudos do Balanço de Energia Útil (BEU)[6] que apresentou como resultado o rendimento médio energético por setores de atividade (energético, residencial, transportes, industrial, etc.) para os anos de 1983, 1993 e 2003. Mesmo sendo um método questionável por Garcia (2003, p.37), também por meio do BEU as informações setoriais de consumo de energia do Balanço Energético Nacional (BEN) podem ser processadas a fim de se obter o potencial de conservação de energia (GARCIA, 2003), bem como a as estimativas da energia final e da energia útil (EPE, 2007).

Uma comparação entre 1993 e 2003 mostra que o rendimento médio energético no setor residencial aumentou de 43,4% para 47,4%, enquanto a elevação do rendimento médio energético total foi de 53,9% para 57,5% (EPE, 2007). Assim, conforme mencionado anteriormente, neste período tanto o aumento no consumo total de eletricidade, de 29,6%, quanto o do setor residencial, de 13,8%, vêm acompanhados de uma elevação percentual de seus rendimentos médios energéticos, respectivamente, 4% para o setor residencial e 3,6% para o consumo total final. Este incremento decorreu em parte devido à evolução tecnológica dos equipamentos, resultado da melhora efetiva do rendimento de uso final, bem como pela mudança da matriz energética do País, tendo em vista a substituição da participação de energéticos de uso menos eficiente, a exemplo de lenha e carvão, para outros de uso mais eficiente, cabendo citar GLP/gás natural e energia elétrica (EPE, 2007). Cabe acrescentar ainda a contribuição do maior uso de aparelhos eletrônicos, além da substituição de sistemas de iluminação com lâmpadas incandescentes por fluorescentes.

---

[6] Os estudos do BEU foram feitos com base nos anos de 1983, 1993 e 2003, sendo suas estimativas apresentadas nos Balanços Energéticos Nacionais, respectivamente, dos anos subseqüentes. Para maiores detalhes sobre a metodologia utilizada pelo BEU consultar Garcia (2003, p.33-39).

Entretanto, projeções do Energy Saving Trust (EST) indicam que na Inglaterra o consumo residencial de eletricidade tanto de eletrodomésticos quanto da iluminação serão ultrapassados pelo consumo de aparelhos eletrônicos, em que os modelos novos consomem mais do que os modelos antigos, entre outros motivos, porque trazem consigo cada vez mais à oferta de outros serviços, além de utilizarem a função *stand-by*, alguns tampouco dispondo do botão de desligar (ELETROBRÁS, 2007).

Segundo esta referência, houve um aumento de domicílios britânicos com um único morador, muitos destes possuindo, entre outros, TVs de tela grande, computadores pessoais, impressoras, equipamentos de conexão tanto à Internet quanto à TV a cabo, e que consomem cada vez mais energia elétrica.

Outra pesquisa realizada na Inglaterra e publicada no *The Daily Record*, mostrou que entre 350 TVs, DVDs, caixas digitais e laptops avaliados, apenas um único item apresentou informações de quanta energia é consumida por este equipamento (ELETROBRÁS, 2007b).

Torna-se importante frisar, contudo, que tanto ou mais importante do que aumentar a eficiência das máquinas, assim como dos equipamentos elétricos de uso final, é possibilitar construções mais eficientes (ELETROBRÁS, 2007a). De acordo come esta referência, por mais eficiente que seja o sistema de condicionamento ambiental é a concepção do projeto arquitetônico que possibilita maiores eficiências no uso da energia. Acrescenta ainda, que num país tropical com incidência de calor quase o ano inteiro, ao invés do uso excessivo de vidros nas fachadas das edificações, há que se privilegiar a ventilação natural, por exemplo, com janelas de boas aberturas e posicionadas de acordo com o sentido dos ventos, uma escolha que também influencia na iluminação natural. Estes casos podem ser bons exemplos para justificar a importância de se inserir a variável qualidade no uso da energia.

2.3. Programas de Eficiência Energética

O objetivo dos programas de eficiência energética é possibilitar a contínua oferta de produtos ou serviços que demandam um menor fornecimento de energia, mantendo um mesmo nível de conforto ou resultado. Dessa forma, investimentos em eficiência energética, que na maioria das vezes são menos onerosos do que aqueles para produzir mais energia, podem propiciar a postergação das necessidades da geração adicional de energia, bem como de sua transmissão e distribuição (JANUZZI *et al*., 1997).

Seus objetivos também estão relacionados à necessidade de uma maior competitividade comercial e industrial, redução dos custos de energia para o consumidor final e minimização da probabilidade de falta de energia. Pode ainda contribuir para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico, assim como para reduzir os impactos do efeito estufa (JANUZZI, 2006). Leite (2007, p.461) observa que são inseparáveis as relações entre a conservação de energia, bem como a eficiência no seu uso, com os danos ao meio ambiente, seja pela contenção da demanda de energia seja pela redução das emissões provenientes da queima de combustíveis.

É importante ressaltar que, enquanto os investimentos em eficiência energética são incrementais e modulares, há uma indivisibilidade dos investimentos na produção de energia, representando um ônus a mais, particularmente para os países menos desenvolvidos, que necessitam recorrer a empréstimos com pagamento de juros por vários anos antes que haja a produção de energia pelo empreendimento (JANUZZI, 2006).

Com o intuito de combater o desperdício de energia elétrica, em dezembro de 1985 foi lançado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)[7], coordenado pelo Ministério das Minas e Energia e sob controle executivo da Eletrobrás. Uma das atividades deste programa foi instituir o selo PROCEL de economia de energia concedido atualmente para os equipamentos, tais como lâmpadas, reatores para lâmpadas de descarga, motores elétricos de alto rendimento, entre outros eletrodomésticos, que apresentem os melhores índices de eficiência energética.

[7]Para maiores detalhes sobre o histórico e atuação do PROCEL consultar Garcia (2003, p.42-45).

Entretanto, o objetivo do PROCEL é conservar energia elétrica, tanto na produção quanto no consumo e contribuir para a redução dos impactos ambientais, além de fomentar a geração de empregos.

Segundo Leite (2007, p. 496), o PROCEL avaliou quantitativamente em 2004 o potencial de conservação de eletricidade no País, tanto as do próprio setor elétrico quanto do lado da demanda, resultando em perdas num patamar de 17% da energia total disponível junto às usinas geradoras. Entre estas perdas estão incluídas as perdas técnicas intrínsecas, ou seja, originadas da dissipação de energia na transmissão e distribuição de energia elétrica, além dos desperdícios evitáveis ou perdas comerciais por falta de medidores, desvios e furtos.

Além do PROCEL, que conduz estudos e pesquisas de eficiência energética correlacionadas às diretrizes governamentais, na esfera empresarial foi criado o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), sem contar as Escos – Energy Service Company – que vêm atuando no Brasil desde o fim dos anos 80 com o objetivo de auxiliar outras companhias a diminuir gastos com energia e água (GONÇALVES, 2009). De acordo com esta referência, o potencial de mercado para a eficiência energética no país estimado pela Abesco seria de 17 bilhões de reais ao ano.

Além destas iniciativas, até 31/12/2015 , as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica têm de aplicar no mínimo 0,5% de sua receita operacional líquida tanto para projetos de pesquisa e desenvolvimento quanto para programas de eficiência energética (BRASIL, 2010). De acordo com esta referência, 60% dos recursos dos programas de eficiência energética devem ser aplicados em consumidores beneficiados pela Tarifa Social. Neste caso para o setor residencial de baixa renda as ações destas concessionárias têm foco principalmente na substituição de geladeiras antigas por novas mais eficientes e pela doação de lâmpadas fluorescentes para serem utilizadas no lugar das incandescentes. Como para obter tais benefícios os consumidores devem estar regularizados junto às concessionárias ou pelo menos negociar suas dívidas, estas ações além de possibilitar a inclusão social destas populações, que passaram a contar com um comprovante de endereço por meio da fatura de energia elétrica, também se revelou ser uma ótima oportunidade de negócios

para as concessionárias, pois fez com houvesse uma considerável queda das perdas comerciais, seja pela redução da inadimplência por parte dos consumidores, seja pela diminuição da ocorrência de desvios ou furtos de energia elétrica, feitos por meio de instalações elétricas clandestinas com péssimas condições, resultando em maiores perdas de eletricidade (FERNANDES, 2007; POLITO, 2007).

Cabe comentar, contudo, que apesar das medidas de eficiência energética permitir por um lado a redução do uso da energia sem implicar em custos para a economia, ou seja, o seu uso racional não requer uma diminuição do nível da produção (SAURDERS, 2000). Entretanto, diante dos custos de implementação da política de eficientização, a diminuição no consumo de energia pode não atingir o potencial de conservação almejado.

Por outro lado, a redução no consumo de energia possibilita um aumento da eficiência dos processos produtivos, o que permite reduzir o custo de produção, podendo resultar numa diminuição do preço final e acarretar num aumento da aquisição de produtos e/ou serviços. Isso faz com que o potencial de redução do uso da energia fique aquém do esperado pela implementação das medidas de eficientização energética ou, ainda, este potencial ser totalmente anulado, resultando num maior consumo absoluto de energia. Assim, mesmo diante da aplicação de tecnologias eficientes, a conservação de energia global pode não ser alcançada, ocorrendo o chamado *efeito-boomerangue*, ou a expansão destes produtos e/ou serviços ser tão alta que eleve o consumo global de energia além do patamar anterior, incorrendo no denominado efeito-backfire (AGUIAR, 2006).

Em adição, um estudo da relação entre ganhos de eficiência energética e consumo de energia, por meio da análise estatística para diversos países desenvolvidos e o Brasil, afirma que no longo prazo ganhos de eficiência energética alcançados no plano microeconômico acarretam num maior consumo de energia no plano macroeconômico (AMADO, 2006).

Com base nas informações das Pesquisas de Posse e de Hábitos de Uso (PPHs) para os anos de 1997 e 2005[8], realizadas pela PUC-Rio sob a coordenação executiva da Eletrobrás, foi feita uma estimativa que mostrou para o caso das TVs um aumento da participação percentual do consumo de energia anual das TVs tanto em relação ao aumento do consumo residencial quanto ao do consumo total anual de eletricidade, sem contar a considerável elevação da participação de seus equipamentos acessórios, tais como videocassetes mais DVDs e, principalmente, dos *set-top-boxes* (DUARTE, 2008). Além disso, apesar de ter ocorrido neste período uma redução na potência média dos aparelhos de TVs de mesma diagonal (tamanho de tela), houve um aumento da potência média ponderada das TVs existentes, assim como da potência média ponderada por residência (DUARTE *et al*., 2009).

Cabe acrescentar que não somente ocorreu um aumento das potências médias de TVs ponderada tanto por tamanho de tela quanto por residência, mas também do número médio de horas de uso de TVs ao longo deste período, conforme atestam estatísticas de audiência, as quais constataram que em média a dedicação do tempo diário do brasileiro a este meio de comunicação passou de 4h27m em 2001 para 4h54m em 2004 e alcançou 5h04m em 2006 (PAVLOVA, 2007).

Adicionalmente, cabe ressalvar o desenvolvimento da eletrônica de potência contribuiu para várias transformações, tanto de processos industriais quanto de hábitos empresariais, além daquelas inerentes à própria sociedade. Este processo se iniciou com a introdução da informática e mudanças nas tecnologias de comunicações, prosseguindo com a realidade de uma sociedade digital, cada vez mais dependente das tecnologias de informação e comunicação, uso da Internet e da telefonia celular, assim como dos computadores pessoais, incluindo ainda processos automáticos de produção industrial e novas formas de comércio eletrônico (LEITE, 2007). Segundo esta referência, o balanço entre a economia de eletricidade, em virtude da maior eficiência das operações por meio de instrumentos digitais programados, e o aumento do consumo pela introdução de novos tipos de equipamentos, só poderá ser avaliado com melhor precisão no médio prazo, tarefa a qual se propõe este trabalho.

---

[8] A coleta de dados da PPH-1997 foi feita em 1996 e 1997, enquanto para a PPH-2005 os dados foram coletados em 2004.

Finalmente, devido às cadeias de interconexão e da sensibilidade dos instrumentos, cabe comentar que a aplicação da eletrônica de potência como uma das formas de aumentar a eficiência energética de uso final de equipamentos elétricos, incorre num aumento das responsabilidades "quanto à segurança e qualidade do suprimento, sem interrupções e flutuações" (LEITE, 2007). Os sistemas elétricos, antes eletromecânicos, insensíveis a interrupções de segundos, passam a se transformar em sistemas eletrônicos, sensíveis a oscilações de milisegundos (LIMA e ROSS, 1996).

2.4. Considerações Finais

Como discutido neste Capítulo, os termos geração e consumo de energia se referem à conversão de formas de energia. As principais formas de energia são a nuclear, atômica, química, térmica, mecânica, magnética e elétrica, que têm diferentes qualidades em seus fluxos energéticos no que se refere à capacidade de conversão em outras formas de energia. Nos processos de conversão de energia devem ser observados tanto o aspecto quantitativo, de acordo com a Lei da Conservação da Energia ou 1ª Lei da Termodinâmica, quanto o qualitativo, segundo a Lei da Dissipação de Energia ou 2ª Lei da Termodinâmica.

Pode se observar ainda que por meio da 1ª Lei da Termodinâmica podem ser quantificados os fluxos energéticos por meio da realização de balanços energéticos e também estimadas as perdas, além de permitir se derivar o conceito de eficiência energética. Já pela 2ª Lei da Termodinâmica sempre existirão perdas térmicas em todos os processos reais de conversão de energia, o que implica na perda da qualidade da energia. Desta forma, ocorre a degradação da exergia, ou seja, há uma redução da máxima quantidade de trabalho mecânico disponível numa forma de energia, em cada processo de conversão de energia.

Também foi comentado que houve um aumento da eficiência energética dos equipamentos elétricos pelo aumento do uso de aparelhos eletrônicos que ultrapassarão a demanda por eletricidade de eletrodomésticos e da iluminação, em virtude dos

eletrônicos aumentarem sua potência com modelos cada vez maiores que também ofertam novos serviços, além de incluir a função stand-by, cabendo citar o exemplo da TV.

Em adição foi mostrado que entre os principais programas de eficiência energética no Brasil, destacam-se o PROCEL na esfera governamental, o INEE no meio empresarial, cabendo ainda citar a atuação ESCOS. Além disso, por força da legislação as distribuidoras de energia devem aplicar 0,5% de sua receita operacional líquidos em programas de eficiência energética.

Como os equipamentos eletrônicos contribuem tanto para propiciar maior eficiência energética quanto aumentar a degradação da qualidade da energia, no Capítulo 3 serão abordados especificamente os conceitos, definições e alguns problemas relacionados à QEE.

Capítulo 3

Qualidade da Energia Elétrica

Este capítulo abordará a questão da Qualidade de Energia Elétrica, assunto de especial interesse nos dias atuais, haja vista a proliferação nos setores comercial e residencial de cargas com componentes eletrônicos, que são mais sensíveis aos distúrbios nas redes elétricas ao mesmo tempo que também são causadores destes distúrbios.

Inicialmente será feita uma abordagem a respeito das peculiaridades do setor elétrico e sua relação com o termo Qualidade. Será visto que a eficiência energética almejada pelo usuário de energia elétrica pode comprometer a QEE. Como exemplo, cabe citar que para atingir metas de produtividade e qualidade dos processos, bem como propiciar aumentar a eficiência no uso final da energia elétrica, os equipamentos

elétricos passaram a incorporar a eletrônica de potência, que causa distorções nas redes elétricas, degradando a sua Qualidade. Estes efeitos contraditórios estão relacionados a aspectos técnicos, econômico-financeiros, bem como regulatórios.

Na seção 3.2 serão apresentadas algumas definições mais usuais da QEE.

Na seção 3.3 serão definidos diversos distúrbios relacionados à QEE, sejam eles transitórios, momentâneos, quase-permanentes ou permanentes, bem como algumas das causas destes mencionados distúrbios.

Assim, o objetivo deste Capítulo é mostrar a grande relevância do termo QEE, enfocando especialmente o problema dos harmônicos de corrente, como forma de possibilitar uma adequada operação das cargas consumidoras, constituídas atualmente em sua maioria por equipamentos possuindo dispositivos de eletrônica de potência, que degradam a QEE das redes elétricas, mas também são mais susceptíveis à qualidade do fornecimento de energia elétrica.

3.1. Considerações Iniciais

O setor elétrico, que é parte da indústria de infra-estrutura, apresenta características técnico-econômicas peculiares que o distingue de outros setores industriais. Em função das suas especificidades técnicas é considerada uma indústria de rede, sendo formada por diferentes atividades que constituem uma rede física necessária à operação e prestação do serviço. Haja vista as dificuldades técnicas, bem como devido ao alto custo do armazenamento da energia elétrica, a geração e o consumo, que não ocorrem no mesmo espaço físico, se processam simultaneamente. Outras questões específicas deste setor se referem à essencialidade do consumo, à obrigação jurídica de fornecimento, à ocorrência de externalidades na prestação do serviço, à necessidade de capital intensivo, à existência de economias de escala, de densidade e de coordenação. (TOLMASQUIM, 2002).

Conforme ROSS *et al*. (1995), os processos e equipamentos utilizados pelos consumidores de energia elétrica, que eram constituídos preponderantemente por

equipamentos eletromecânicos, vêm continuadamente se transformando em sistemas eletroeletrônicos, estes possuindo uma estreita relação com a qualidade da energia, sendo, por conseguinte, muito sensíveis aos distúrbios e às distorções da onda senoidal. Estes fatores passam a ensejar o fornecimento pela concessionária de uma energia de alta qualidade. O assunto "Qualidade" e "Qualidade Total" estão cada vez mais em evidência nos tempos modernos, sinalizando para as indústrias e prestadores de serviço a necessidade de melhoria tanto de seus produtos e ou serviços finais quanto da obtenção destes. Cabe considerar também, principalmente diante de um ambiente competitivo, onde o mercado de distribuição de energia elétrica se constitui em sua grande maioria por fornecedores privados, que a oferta de energia com qualidade passa a se tornar um dos fatores de competição entre as empresas distribuidoras.

Hoje em dia, para atingir as metas gerenciais de produtividade e qualidade dos processos, os equipamentos industriais são automatizados, realizando tarefas controladas por microprocessadores, que são muito vulneráveis à qualidade do fornecimento de energia. Desse modo, as interrupções em virtude do mau funcionamento dos microprocessadores, podem comprometer toda a produção industrial, trazendo grandes prejuízos, não só pela parada do processo em si, mas pelas perdas de insumos, dos custos associados à mão-de-obra, do reparo de equipamentos, bem como dados dos sistemas de informação; sem contar possíveis prejuízos advindos com multas ou penalidades impostas por atraso e a não realização de negócios (MELO e CAVALCANTI, 2003).

A QEE e os seus problemas correlatos se tornam cada vez mais importantes em virtude de maiores exigências das diversas classes de consumidores, em face do aumento do número de cargas sensíveis a perturbações na tensão de suprimento, como também pela legislação que se firma no novo ambiente do setor elétrico brasileiro. No caso específico dos harmônicos, os seus impactos vão desde o consumidor final, passando pelo sistema de distribuição de energia e alcançam a operação da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (DUARTE, *et al.*, 2007; FARIAS *et al.*, 2003; ROCHA, 1997).

No atual ambiente competitivo e regulatório, a degradação da QEE pode contribuir para o desgaste da imagem empresarial das distribuidoras de energia elétrica, sem contar os custos devido aos pedidos de ressarcimento dos prejuízos sofridos por consumidores, em função da má qualidade da energia. Nesse cenário, a concessionária deve classificar seus clientes em graus de vulnerabilidade em relação à qualidade de energia. Também devem ser determinados indicadores, qualitativos e quantitativos, que expressem a QEE tanto em pontos de conexão com a transmissora quanto em alguns pontos de fornecimento. Estas medidas visam à coleta de dados cujas relações de causa e efeito permitam a empresa decidir com segurança quanto à expansão e a melhoria de redes, inserção de novos clientes, como também solucionar problemas existentes e outros já reclamados por clientes, atuando de forma preventiva e/ou corretiva na operação e no planejamento do sistema elétrico (MEDEIROS *et al*., 2003).

Estudos demonstram que a maioria dos trabalhos de QEE realizados nas indústrias resulta em soluções dentro da própria instalação, sendo que muitas das vezes o projeto da instalação não considera fatores que têm estreita ligação com a QEE, como o devido balanceamento de fases, os efeitos das cargas não lineares, a interligação dos pontos de aterramento, o ajuste da proteção, a ressonância de bancos de capacitores para correção do fator de potência com outros elementos reativos da rede, entre outros (CAMARGO *et al.*, 2003).

Em conseqüência, a qualidade de energia é um assunto que terá um grande impacto no setor elétrico brasileiro num futuro próximo. As distribuidoras de energia terão de decidir se a qualidade de energia será um valor adicionado aos seus produtos, no caso, a potência disponível, a tensão e a freqüência, delimitadas numa faixa estreita previamente combinada; ou se será um problema a ser resolvido para evitar as penalidades da legislação. Esta questão está direcionada às questões econômicas, principalmente pelo fato da existência de um ambiente competitivo na geração e distribuição de energia elétrica, tornando-se um diferencial tanto para a manutenção dos clientes existentes quanto para a aquisição de novos.

3.2. Definição da QEE

A qualidade de energia elétrica pode tomar definições conflitantes sob a ótica do consumidor, do fabricante de equipamentos ou do fornecedor de energia elétrica. O fornecedor de energia pode definir a QEE como confiabilidade e mostrar estatisticamente que seu sistema opera com 99,99% de confiabilidade. Os critérios estabelecidos pelas agências usualmente adotam a mesma linha. A definição da QEE pelo usuário, assim como para os fabricantes de equipamentos, pode englobar características de suprimento de energia que permitam um equipamento funcionar adequadamente. Entretanto, estas características podem ser bastante diferentes para diferentes critérios adotados por cada. Por sua vez, o ponto de vista do consumidor deve ser precedente no tocante às questões da QEE (Lei 8.078/1990).

Os distúrbios elétricos, por sua vez, incluem as faltas de tensão, estas caracterizadas como a ausência total de tensão tanto por milissegundos quanto por horas, e também fenômenos de QEE, que serão definidos a seguir, cabendo citar as variações de tensão ou de freqüência, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, cintilação, harmônicas, entre outros (EPRI/CEIDS, 2003). De acordo com esta referência, enquanto as faltas de tensão são mais facilmente identificadas, os fenômenos associados à QEE são detectados pelos seus sintomas, tais como, cintilação luminosa, aquecimento excessivo de equipamentos, mau funcionamento de computadores ou controladores, entre outros.

As faltas de tensão podem resultar de faltas nos sistemas de transmissão ou distribuição, falhas nos equipamentos ou curto-circuitos na geração. Já os fenômenos associados à QEE podem ser originados de cintilação, chaveamento de capacitores, partidas de grandes cargas, sobrecarga ou desbalanceamento de cargas, harmônicos, entre outras causas. Os distúrbios elétricos podem atingir não somente instalações industriais e comerciais automatizadas, mas também alcançar eletrodomésticos de uso comum nas residências, como por exemplo, televisão e computadores.

Idealmente, as tensões em qualquer ponto de um sistema trifásico, em todos os pontos da rede, devem ser de forma contínua praticamente senoidais e equilibradas, sendo constantes as suas freqüência e amplitude. De fato, quando existe um problema

de QEE, ocorre na verdade um desvio na forma de onda da tensão de alimentação, podendo a QEE, geralmente, ser representada pela qualidade da tensão elétrica do ponto onde a carga está ligada (MELO e CAVALCANTI, 2003).

Assim, pode-se definir a QEE como uma ausência relativa de variações de tensões na rede elétrica, em especial no que se referem à inexistência de desligamentos, flutuações e surtos de tensão, bem como de harmônicos, medidos no ponto de entrega da energia (GAMA, HADDAD e MARTINS, 2001). Segundo BRONZEADO (1997), focando sob a ótica do consumidor, "*energia elétrica de boa qualidade, é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas*". A Energia Elétrica de boa qualidade também pode ser definida como aquela que possibilita ao usuário operar sua instalação com a máxima eficiência permitindo aos setores produtivos operar sem ou com a mínima interrupção de energia, bem como atuar livres de quaisquer distúrbios que possam afetar a produção (CAMARGO *et al*., 2003).

De forma menos subjetiva, medições de parâmetros de QEE podem quantificar um desvio da amplitude, frequência ou forma da onda senoidal, com frequência fundamental fixada em 50 Hz ou 60 Hz, seja da tensão ou da corrente elétrica, e inclui fenômenos de curta ou de longa duração (EPRI/CEIDS, 2003). No Brasil, os principais indicadores da QEE aplicados às concessionárias são mensurados por meio de índices individuais, DIC[9] (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC[10] (Freqüência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora) e DMIC[11] (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora), como também por índices coletivos, DEC[12] (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC[13] (Freqüência Equivalente de Duração por Unidade Consumidora) (ANEEL, 2000).

---

[9]Intervalo de tempo que, no período de observação, em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
[10] Número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora.
[11]Tempo máximo de interrupção contínua, da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer.
[12]Intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
[13] Número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.

Como para as cargas não lineares as correntes são distorcidas, a QEE pode ser relacionada a um conjunto de fatores estreitamente ligados à qualidade de tensão e de corrente, estas podem ser definidas por meio da freqüência, forma de onda, amplitude e do desequilíbrio em sistemas trifásicos. Os principais fenômenos eletromagnéticos que incorrem em distúrbios na QEE são as variações transitórias de tensão, variações momentâneas de tensão, variações sustentadas de tensão, variações momentâneas de freqüência e os distúrbios quase-permanentes, estes últimos causados pela operação de cargas não lineares (BRONZEADO, 1997 e IEEE 1159, 1995). Um sinal elétrico indesejado e esporádico, denominado ruído, caracterizado como uma interferência eletromagnética proveniente de outros equipamentos, também pode ser considerado um fenômeno relacionado à QEE (HEI, 1998).

3.3. Distúrbios Relacionados à QEE

3.3.1. Variações Transitórias de Tensão (*Transient Voltages*)

São variações súbitas (nanossegundos a microssegundos) do valor instantâneo da tensão que dependem da quantidade de energia acumulada nos componentes do sistema, no instante de tempo inicial da ocorrência, como do comportamento transitório do sistema, até atingir o seu novo tempo de operação. Podem ser (BRONZEADO *et al.*, 1997):

- Surtos de Tensão (*Impulsive Transient*) – em geral causados por descargas atmosféricas, sendo caracterizadas pelo tempo de subida ou de crista, tempo de descida ou de cauda e pelo valor máximo ou de pico da tensão; ocorrendo normalmente com polaridade unidirecional;
- Transitórios Oscilatórios de Tensão (*Oscillatory Transient*) – são oscilações do valor instantâneo da tensão superpostas ao seu valor instantâneo normal, causadas usualmente por manobras de equipamentos e de linhas de transmissão;
- Cortes de Tensão (*Voltage Notching*) – são descontinuidades do valor instantâneo da tensão, em geral, ocasionadas por curtos-circuitos fase-fase, quando da comutação da corrente entre as fases dos conversores de potência operando em condições normais. Em geral são seguidos por transitórios

oscilatórios e, devido ao seu comportamento periódico, também são analisados como harmônicos.

3.3.2. Variações Momentâneas de Tensão de Curta Duração (*Short Duration Voltage Variations*)

São variações momentâneas do valor eficaz da tensão entre dois níveis consecutivos num tempo aleatório menor do que 1 (um) minuto, originadas em geral por curtos-circuitos no circuito elétrico, como por manobras de equipamentos que exigem altas correntes de energização. Considerando a tensão nominal como o valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado, expresso em volts ou quilovolts, as variações momentâneas de tensão de curta duração podem se classificar em (BRONZEADO *et al.*, 1997):

- variações momentâneas de tensão:
    - Subtensão Momentânea ou Afundamento Momentâneo de Tensão (*Voltage Sags*) – redução momentânea do valor eficaz da tensão, em pelo menos uma das fases do circuito, para valores entre 10% a 90% da tensão nominal de operação, num intervalo de tempo entre 1/2 ciclo a 1 minuto;
    - Sobretensão Momentânea ou Elevação Momentânea de Tensão (*Voltage Swell*) - elevação momentânea do valor eficaz da tensão, em pelo menos uma das fases do circuito, para valores acima de 110% da tensão nominal de operação, num intervalo de tempo entre 1/2 ciclo a 1 minuto;
    - Interrupção Momentânea de Tensão (*Short Duration Interruption*) - redução momentânea do valor eficaz da tensão, em pelo menos uma das fases do circuito, para níveis de tensão inferiores a 10% da nominal, num intervalo de tempo entre 1/2 ciclo a 1 minuto;

De acordo com a última referência, as Variações Momentâneas de Tensão podem ser dividas em termos de sua duração:

- Curtíssima Duração (*Instantaneous*) com duração entre 1/2 ciclo a 30 s;
- Curta Duração (*Momentary*) com duração entre 30 ciclos a 3 s;
- Temporária (*Temporary*) com duração entre 3 s a 1 m.

3.3.3. Variações Sustentadas de Tensão (*Long Duration Voltage Variation*)

São variações do valor eficaz da tensão entre dois níveis seguidos, com duração aleatória maior ou igual a 1 minuto, ocasionadas, normalmente, pela entrada e saída de grandes blocos de carga, linhas de transmissão e equipamentos de compensação de reativos, tais como banco de capacitores e reatores. Podem ser subdivididas em (BRONZEADO *et al*., 1997):

- Subtensão Sustentada (U*ndervoltage*) – para níveis de tensão entre 10% a 90% da nominal;
- Sobretensão Sustentada (*Overvoltage*) – para níveis de tensão superiores a 110% da nominal;
- Interrupção sustentada de tensão (S*ustained Interruption*) – para níveis de tensão inferiores a 10% da nominal ou faltas de tensão;

3.3.4. Variações Momentâneas de Frequência (*Power Frequency Variations*)

São pequenas variações momentâneas, do valor da freqüência fundamental da tensão, ocasionadas pelo desequilíbrio entre a geração de energia elétrica e a demanda solicitada pela carga. A sua duração e intensidade têm estreita relação com a dimensão do desequilíbrio ocorrido, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações de potência (BRONZEADO *et al*., 1997).

3.3.5. Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion*)

Termo usado para quantificar o nível de distorção da forma de onda de sinais de tensão ou de corrente em relação à forma de onda ideal senoidal à freqüência fundamental (BRONZEADO *et al*., 1997).

3.3.6. Flutuação de Tensão (Voltage Flutuation)

São diversas variações de tensão, sistemáticas e intermitentes, numa faixa entre 95% e 105% da tensão nominal (BRONZEADO *et al*., 1997).

3.3.7. Cintilação (*Flicker*)

A cintilação luminosa é uma impressão visual das variações rápidas, repetitivas e de baixa amplitude do fluxo luminoso em lâmpadas incandescentes, resultante das flutuações na amplitude do valor eficaz da tensão de alimentação em lâmpadas incandescentes (LIMA e ROSS, 1996). De acordo com esta referência, estas flutuações podem ser ocasionadas por grandes cargas elétricas que apresentam variações bruscas, repetitivas e aleatórias, como os fornos a arco e as máquinas de solda.

Entretanto, diante de uma maior proliferação das cargas eletrônicas utilizadas, por exemplo, nos sistemas de controle de velocidade de motores elétricos ou em lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs), surgiram novas formas do efeito da cintilação luminosa, bastando apenas que amplitudes de tensões com frequências inter-harmônicas[14], a serem definidas no Capítulo 4, se sobreponham ao sinal da onda fundamental de tensão, possibilitando visualizar perfeitamente este fenômeno (JÚNIOR e SIMONETTI, 2009).

A severidade da cintilação luminosa é mensurada pela sensibilidade do conjunto lâmpada-cérebro[15], cujo resultado representa a sensação de incômodo que um observador percebe durante a ocorrência do fenômeno (FILHO, 1997). De acordo com esta referência. Os impactos desta flutuação não se resumem aos resultados negativos sobre o conforto visual dos seres humanos, mas podem danificar os bancos de capacitores, haja vista ser a capacitância função do quadrado da tensão aplicada.

3.3.8. Desequilíbrio de Tensão (*Voltage Imbalance*)

De um modo geral, é estabelecida como a razão entre as componentes de seqüências negativa e positiva do sistema trifásico (BRONZEADO *et al.*, 1997), definidas no Apêndice B. O IEEE, contudo, também a considera como a relação entre as componentes de seqüência zero e positiva (IEEE-1159, 1995).

---

[14]As freqüências inter-harmônicas são aquelas que não são múltiplas inteiras da fundamental (LANGELLA *et al.*, 2008).

[15]O olho humano é mais sensível à frequência de 10 Hz, dessensibilizando-se rapidamente para freqüências mais baixas e praticamente não sente irritação para freqüências superiores a 25 Hz (MAMEDE FILHO, 1997).

3.3.9. Algumas Causas de Distúrbios Relacionados à QEE

A Tabelas 3 e 4 apresentam alguns distúrbios da QEE relacionando as suas causas, como suas conseqüências, além de listar algumas medidas de mitigação ou eliminação de tais problemas, por meio do uso de dispositivos de condicionamento.

Tabela 3. Relação de Alguns Distúrbios Relacionados à QEE

Distúrbio	Causas	Conseqüências	Dispositivo de Condicionamento[16]
Transitórios Impulsivos	Descargas Atmosféricas Manobra de Carga	Distúrbios em Dispositivos Eletrônicos.	Pára-Raios, Filtros, Transformador de Isolamento.
Transitórios Oscilatórios	Descargas Atmosféricas Manobras de linhas, cabos, capacitores, transformadores ou de cargas.	Distúrbios em Dispositivos Eletrônicos.	Pára-Raios, Filtros, Transformador de Isolamento, DVR (*Dynamic Voltage Restorer*).
Variações de Curta Duração	Falhas Remotas Manobra de Carga	Distúrbios em Processos Industriais	Regulador de Tensão, Transformador de Tensão Constante.
Variações de Longa Duração	Partida de Motor Variação de Carga Manobra de Capacitor Sobrecargas	Distúrbios em Processos Industriais	Sistemas UPS[17] (*Uninterrupted Power Systems*), Geradores de Reserva.
Interrupções	Faltas Manobras de Disjuntores	Distúrbios em Processos Industriais	Sistemas UPS, Geradores de Reserva.

Fonte: BRASIL (1997).

[16]Dispositivos de condicionamento de potência são aqueles destinados a isolar a barra de carga de ocorrências anormais ocorridas na barra de suprimento de potência.
[17] Sistema de suprimento ininterrupto de potência.

Tabela 4. Relação de Alguns Distúrbios Relacionados à QEE

Distúrbio	Causas	Conseqüências	Dispositivo de Condicionamento
Harmônicos	Cargas Não lineares	Ocupação do Sistema, Sobreaquecimento, Distúrbios em Contadores	Filtros, Transformador de Isolamento
Cortes de Tensão (*Notching*)	PES[18] com Comutação de Corrente Entre Fases	Má Operação de Equipamentos Eletrônicos, Interferências	Filtros Passivos ou Ativos, Blindagem
Ruído	Manobra de Equipamentos de Eletrônica de Potência, Arcos, Radiação Eletromagnética	Distúrbios em Computadores e Controladores Programáveis	Aterramento, Bobina de Bloqueio, Filtro de Bloqueio, Blindagem
Flutuação de Tensão	Cargas Intermitentes, Cargas a Arco, Partida de Motor	Cintilação (*Flicker*)	Componentes Estáticos, Capacitor Série, Compensadores Estáticos
Variação de Frequência	Variação de Carga e Geração	Afeta a Operação de Máquinas Girantes e Contadores	Controladores de Frequência, Conversores CA/CA

Fonte: BRASIL (1997).

Conforme estudos conduzidos pelo *Electrotechnical Power Research Institute* (EPRI), as variações transitórias de tensão, as depressões de tensão (*voltage sags*) e os

[18] Equipamentos de eletrônica de potência (Power Electronics).

harmônicos são os três distúrbios que mais têm afetado os consumidores, podendo causar os seguintes problemas (GAMA, 2001):

a - depressão de tensão

- operação inadequada de Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), de relés da proteção do sistema elétrico e de microprocessadores usados em dispositivos de controle;
- variação da velocidade ou até a parada de motores;
- falhas em inversores de freqüência.

b – transitórios

- de um modo geral, provocam a degradação ou falha imediata nos isolamentos de equipamentos elétricos, como falhas em fontes eletrônicas e, também, desligamentos indevidos em inversores de freqüência utilizados em acionamentos de velocidade variável utilizados em motores.

c – harmônicos

- uma grande importância dos harmônicos é devido ao fato de sua geração estar intimamente ligada ao uso de equipamentos que implementam as medidas de conservação de energia elétrica. Este assunto será especificamente abordado no próximo Capítulo.

Estes diversos distúrbios de QEE, relacionados a fenômenos distintos, podem ocorrer de maneira isolada ou associada, dificultando a correta determinação da magnitude e duração dos eventos, assim como o conseqüente impacto operacional e financeiro para o sistema elétrico.

Conclui-se, portanto, que a QEE pode ser caracterizada como um conjunto de parâmetros para se avaliar a utilização da rede elétrica pelos consumidores e concessionárias. Os índices de desempenho de Qualidade são, em geral, ditados por problemas nas instalações dos consumidores finais ou nos sistemas de distribuição. Entretanto, em algumas situações, esses problemas podem ser transferidos ao sistema de transmissão, mais especificamente quando os consumidores estão conectados

diretamente nas redes de alta tensão, ocasionando problemas de qualidade na transmissão que freqüentemente afetam um número muito maior de consumidores.

3.4. Distúrbios Relacionados à QEE

Assim, neste capítulo mostrou-se que a qualidade da energia pode ser um diferencial na prestação do serviço pelas empresas que atuam num ambiente competitivo. Por sua vez, os distúrbios elétricos incluem, entre outros fenômenos, as faltas de tensão, as variações de tensão ou de freqüência, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, cintilação ou *flicker* e distorções harmônicas.

No que se refere à conceituação da QEE, esta pode ser definida como aquela que permite as instalações dos usuários operar com a máxima eficiência e sem ou com a mínima interrupção de energia, bem como atuar livres de quaisquer distúrbios que possam afetar a produção. Também pode se observar que a QEE, cuja melhor denominação seria qualidade da potência, pode ser avaliada pela qualidade da tensão. Além disso, foi visto que os principais indicadores da QEE aplicados às concessionárias são mensurados por meio tanto de índices individuais, DIC, FIC, DMIC, como também por índices coletivos, DEC e FEC.

Finalmente, como a proliferação dos equipamentos com PES têm provocado um aumento preocupante das distorções harmônicas nas redes elétricas, o próximo Capítulo tratara com mais detalhes esta questão.

Capítulo 4

Distorções Harmônicas

Este Capítulo abordará especificamente a questão dos harmônicos, sua conceituação, as principais fontes em instalações comerciais e residenciais, tais como os equipamentos eletrônicos com fontes chaveadas e as lâmpadas fluorescentes, especialmente as compactas com reator eletrônico integrado. Na seção 4.1 serão apresentadas a origem e a definição para os harmônicos, bem como para as distorções harmônicas total e individual. Na seção 4.2 serão caracterizados os tipos de fontes de harmônicos e sua propagação nas redes elétricas. Na seção 4.3 serão apresentados as formas de geração e as conseqüências dos harmônicos nas redes elétricas.

4.1. Considerações Iniciais

Em um sistema elétrico ideal a energia é fornecida com tensão numa forma de onda praticamente senoidal, freqüência fixa e amplitude constante. Entretanto, somente é possível se ter tensão praticamente senoidal nos terminais do consumidor quando a corrente absorvida pela carga for senoidal. De maneira análoga, se a impedância interna equivalente do sistema de potência, vista pelos terminais da carga, for suficientemente baixa, a composição da tensão nos terminais do consumidor com a queda de tensão sobre a impedância interna equivalente do alimentador, resultante da circulação da corrente de uma carga não necessariamente senoidal, não introduzirá distorções significativas na forma de onda da tensão. A quantificação do desvio em relação ao padrão senoidal, que provoca degradação da forma da onda de tensão, é geralmente expressa em termos do conteúdo de componentes harmônicas. O termo *harmônica* teve sua origem na Acústica, onde representa a amplitude de vibração de uma corda ou coluna de ar numa freqüência múltipla da freqüência básica de oscilação (ARENTZ e FARIAS, 2003).

Na geração de energia elétrica no Brasil a freqüência é centrada em 60 Hz, denominada de componente fundamental, sendo a forma a mais perfeitamente senoidal. Conforme mostra a Figura 1, a distorção harmônica da forma de onda, em um sistema elétrico de corrente alternada, se caracteriza pela presença, não só da componente fundamental, mas também por sinais senoidais com freqüências múltiplas e inteiras desta freqüência fundamental. Enquanto as harmônicas são freqüências múltiplas inteiras da freqüência fundamental, denominam-se inter-harmônicas as freqüências que não são múltiplas inteiras da fundamental e sub-harmônicas as freqüências menores do que a fundamental (LANGELLA *et al*., 2008; SUEMITSU, 2006).

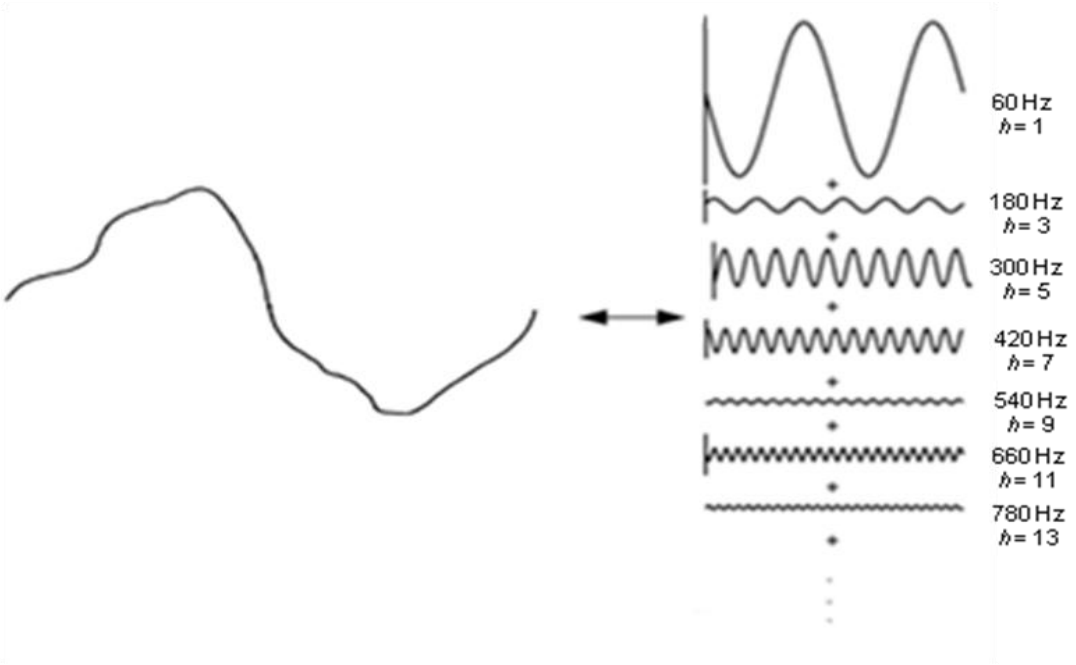


Figura 1. Forma de Onda Distorcida e sua Decomposição em Ondas Senoidais.

Estes harmônicos são conseqüência, basicamente, do aparecimento de efeitos não lineares na forma de onda de saída do sistema elétrico. A existência de componentes harmônicas está condicionada ao fato de um dos sinais de tensão ou de corrente conter alguma distorção. A onda distorcida pode ser decomposta numa onda de maior amplitude com formato de uma senoidal normal, centrada em 60 Hz e denominada de fundamental, e em outras de menores amplitudes, representando harmônicas de terceira, quinta, sétima ordens, e assim sucessivamente, com as respectivas freqüências múltiplas da fundamental.

A existência de harmônicos de tensão ou de corrente pode ser detectada de forma individual ou total, surgindo as seguintes definições (ANEEL, 2000a):

- distorção harmônica individual – obtida pela relação entre a amplitude do sinal harmônico de ordem h (V_h ou I_h) e a fundamental (V_1 ou I_1). No caso da tensão fundamental podem ser encontradas três definições, a saber, o valor real de operação obtido no instante da medição ou a tensão nominal do barramento considerado, bem como utilizar um valor de referência constante e definido pelo usuário. No caso da corrente fundamental, para evitar problemas advindos quando baixos carregamentos são impostos aos pontos de medição, defini-se este valor

como o nominal para o ponto de medição ou adotar a corrente de carga para a demanda máxima;

- distorção harmônica total – que representa uma variável quantitativa da ação conjunta de todas as freqüências harmônicas presentes nos sinais de tensão ou corrente, resultando numa distorção eficaz resultante. Conceitualmente, é dada pela relação entre o valor médio quadrático de todos os componentes harmônicos de um sinal de tensão ou de corrente e o valor médio quadrático da fundamental do mesmo sinal.

  Matematicamente, teremos:

Distorção harmônica individual de tensão: $\frac{V_h}{V_1}$x100 (%) (6)

Distorção harmônica individual de corrente: $\frac{I_h}{I_1}$x100 (%) (7)

Distorção harmônica total de tensão: $\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h\max} V_h^2}}{V_1}$x100 (%) (8)

Distorção harmônica total de corrente: $\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h\max} I_h^2}}{I_1}$x100 (%) (9)

4.2. Geração e Consequências dos Harmônicos

Os harmônicos, conhecidos de longa data, eram relativamente insignificantes no sistema elétrico, haja vista ser relativamente pequeno o número de elementos não lineares nos circuitos elétricos. Porém, com o surgimento da eletrônica de potência, os harmônicos passaram a ter uma maior relevância no sistema elétrico, numa relação direta com o expressivo aumento e uso disseminado destas ditas cargas não lineares, que apresentam um comportamento em que não é válido o principio da superposição da proporcionalidade entre a tensão de entrada aplicada e a respectiva resposta em corrente.

As cargas não lineares, tais como LFCs, reatores eletrônicos, aparelhos de aquecimento com controle estático de temperatura, microcomputadores, impressoras, vídeo cassetes, DVD's, TVs, fornos de microondas, possuindo modernos conversores estáticos de potência, muitas destes equipamentos utilizados para implementação das medidas de eficientização energética, geram harmônicos de corrente, ou seja, outras formas de onda de tensão ou corrente múltiplas da fundamental na rede elétrica (60 Hz), que, normalmente, têm uma amplitude menor do que a fundamental, mas com efeitos destrutivos sobre o sistema elétrico (BEZERRA *et al*., 2006).

No caso específico da eficiência energética aplicada aos setores residencial e comercial, um dos casos mais típicos se refere aos sistemas de iluminação eficiente. Existem programas que estimulam o uso eficiente da energia no Brasil, objetivando a redução do consumo, por meio da utilização de lâmpadas fluorescentes, sejam tubulares longas ou de base única, estas últimas denominadas simplesmente de LFCs. Isso decorre em razão de sua elevada eficiência e da baixa emissão de calor no ambiente. O uso cada vez mais acentuado de LFCs associadas a reatores eletrônicos, embora mais eficientes, provocam distorções harmônicas na rede elétrica que podem resultar no incremento do consumo de energia das cargas conectadas ao circuito (SOUZA e ROSS, 2003; BEZERRA *et al*., 2006). Além disso, conforme já comentado no item 3.3.7 do Capítulo anterior, a proliferação destas cargas eletrônicas também provocam o surgimento do fenômeno da cintilação luminosa (MACEDO JR. e SIMONETTI, 2009).

No setor industrial, cargas do tipo fornos a arco, sistemas de laminação, especialmente nas indústrias siderúrgica e de alumínio, bem como solda elétrica, são comprovadamente geradores de harmônicos. Adicionalmente, conversores, inversores ou retificadores, utilizados em quase todos os processos industriais, também estão sendo usados em equipamentos conectados a sistemas comerciais.

Dessa forma, atualmente, os sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão alimentam cada vez mais cargas não lineares e lineares com deslocamento de fase entre ondas de tensão e corrente. As não lineares podem ser representadas por retificadores seguidos por filtros capacitivos, enquanto as lineares com deslocamento de fase por elementos predominantemente indutivos ou capacitivos, como um reator

eletromagnético sem o capacitor para correção de fator de potência, utilizado na iluminação pública. Ambas drenam grandes quantidades de potência não ativa da rede de alimentação, provocando um aumento no fluxo da corrente circulante. A presença de harmônicos nas redes elétricas de distribuição pode afetar a operação dos componentes e equipamentos elétricos, cabendo citar (POMILIO *et al.*, 2007; BIANCHIN *et al.*, 2005; NAVES e GARCIA, 2005; RODRIGUES *et al.*, 2005):

- erros em medidores;
- atuação intempestiva de sistemas de proteção e controladores lógico programáveis;
- operação inadequada de cargas sensíveis devido à interferência eletromagnética;
- aumento considerável da taxa de distorção harmônica de corrente;
- tensão de alimentação com elevados níveis de distorção harmônica;
- elevação do potencial de neutro em relação ao de terra devido ao aumento da corrente de neutro;
- grande quantidade de energia não ativa circulante devido ao baixo fator de potência, exigindo o sobre-dimensionamento de condutores e transformadores elétricos;
- sobreaquecimento e a redução da vida útil de transformadores e de máquinas elétricas
- aumento das perdas em transformadores operando fora da condição nominal;
- deterioração da isolação de unidades capacitivas provocando a redução da vida útil;
- problemas com bancos capacitivos que podem se danificar por completo na presença de freqüências harmônicas;
- ressonâncias[19] dos componentes indutivos da rede elétrica com capacitores.

A circulação de correntes harmônicas pela rede provoca também o aumento das perdas por efeito joule nas linhas de transmissão e distribuição, assim como nos

[19] A ressonância ocorre quando a reatância indutiva (X_L) se iguala a reatância capacita (X_C). Para maiores detalhes consultar o Anexo A.2.

transformadores de potência, porque há um aumento no valor eficaz verdadeiro das tensões e das correntes nos circuitos de distribuição, alterando, por conseguinte os fluxos das potências ativas e não ativas nestes circuitos (TOFOLI *et al.*, 2006). No entanto, estas perdas, devido ao fluxo das correntes harmônicas, podem não estar sendo contabilizadas pelas empresas distribuidoras de energia (RESENDE *et al.*, 2003).

A presença de harmônicos na rede elétrica causa ainda um problema pouco estudado, a redução da expectativa de vida útil dos equipamentos sob efeito das harmônicas (FUCHS *et al.*, 1986), causando o desperdício de matéria prima. Assim, os harmônicos provocam a elevação da tensão, que causa uma maior deterioração do isolamento, no caso dos capacitores de potência, e o incremento de corrente, resultando no aumento do sobre-aquecimento dos componentes do sistema elétrico, tais como transformadores e motores (DIAS *et al.*; NAVES e GARCIA, 2005).

Segundo James (2001), o mau funcionamento de computadores é um outro problema que pode ser provocado pelos harmônicos. Assim, além dos impactos financeiros diretos em consumidores comerciais e industriais, existem diversos custos indiretos e intangíveis relacionados à qualidade de energia. Tal fato passa a impactar também o consumidor residencial que passa a utilizar cada vez mais o computador pessoal para realizar inúmeras transações pela Internet.

Sendo as cargas de pequena potência, individualmente não provocam problemas apreciáveis no sistema de potência, que passa a ser afetado pela aplicação massiva destas pequenas cargas que geram correntes distorcidas, com um alto nível de componentes harmônicas, que interagindo com a impedância da rede elétrica provoca alterações na forma onda da tensão de suprimento senoidal (MANSOOR *et al.*, 1995; DE VRÈ, 1994) Consequentemente, o rápido crescimento de um grande número de cargas não lineares drenando correntes harmônicas das redes elétricas em interação com as impedâncias do sistema de potência pode resultar na distorção de tensão que alimenta tanto estas próprias cargas quanto outras conectadas na mesma rede de alimentação, com a elevação desta distorção de tensão ocorrendo em níveis preocupantes no longo prazo (RYLANDER *et al.* , 2009; MERTENS JR. *et al.*, 2006; PILEGGI *et al.*, 1995).

Em tempos passados, a QEE estava associada principalmente à continuidade do serviço, isto é, a maior preocupação era de que não houvesse interrupções no fornecimento de energia, e que tal suprimento ocorresse com tensões e freqüência mantidas em determinados limites considerados aceitáveis. Isto se devia ao fato da grande parte dos receptores conectados às redes de energia elétrica consistir de cargas lineares, que podiam resultar apenas no defasamento entre a tensão da alimentação aplicada e da corrente drenada na freqüência fundamental, dado pelo ângulo φ, cujo coseno neste caso é o fator de potência de deslocamento, fp_{desl}, conforme se vê na Figura 2.

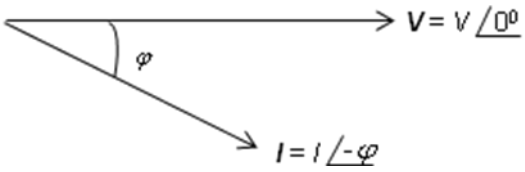


Figura 2. Fator de Deslocamento num Sistema com Carga Linear.

A Tabela 5 apresenta para cargas residenciais monofásicas usuais os valores de medições da THD_i, além do fator de potência de deslocamento (fp_{desl}) e de distorção (fp_{dist}) mais o produto de ambos que resulta no fator de potência total (fp).

Tabela 5. Medições de Distintas Cargas Residenciais Monofásicas

Carga (W)	THD_i	fp_{desl}	fp_{dist}	fp
Ventilador (120)	2,1%	0,660	1,000	0,660
Microondas (1520)	26,9%	0,921	0,966	0,890
PC (100)	108,2%	0,999	0,682	0,681
Televisão (50)	118,4%	0,962	0,645	0,621
2 Lâmpadas Fluorescentes com reator eletromagnético (102)	35,5%	0,942	0,904	0,852
4 lâmpadas compactas PL (100)	140,6%	0,953	0,580	0,552

Fonte: GALHARDO e PINHO (2003).

O fator de potência de distorção, fp_{dist}, é numericamente dado pela Equação 10 (GAMA, 2001):

$$fp_{dist} = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{n} I_h^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \tag{10}$$

As lâmpadas fluorescentes requerem um reator para prover uma alta tensão inicial, a fim de iniciar uma descarga e, assim, permitir o fluxo da corrente elétrica entre os dois eletrodos no tubo fluorescente. Uma vez estabelecida esta descarga, a tensão inicial diminui, enquanto o arco de corrente aumenta. Isto significa essencialmente um curto-circuito entre os eletrodos, sendo que o reator tem que reduzir rapidamente a corrente a um nível que mantenha a luminosidade conforme especificada. A Figura 3 mostra o espectro harmônico de uma corrente lâmpada fluorescente com reator eletromagnético.

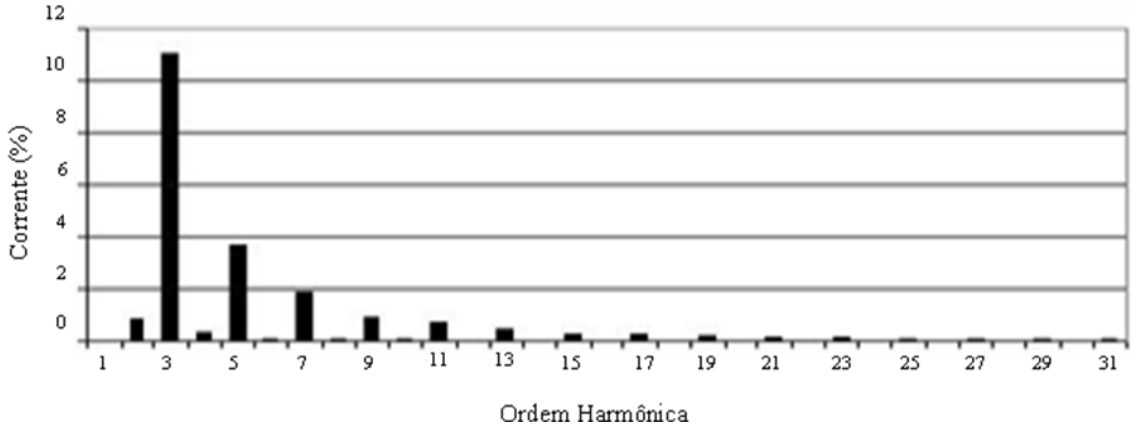


Figura 3. Espectro Harmônico de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente com Reator Eletromagnético.

Consistindo-se basicamente de um núcleo de cobre enrolado num núcleo magnético e com um capacitor encapsulado em material isolante, um reator eletromagnético atua como um dispositivo limitador de corrente para as lâmpadas

fluorescentes. Apesar de contribuir para maiores perdas adicionais por calor dissipado quando comparado com um reator eletrônico, a distorção total de corrente (THD_i) de um reator eletromagnético, causada principalmente pelo comportamento do arco, é moderada da ordem de 15% (DUGAN *et al*., 2006).

Por outro lado, um reator eletrônico utiliza fonte chaveada para converter a tensão na freqüência fundamental para outra freqüência muito mais alta, tipicamente na faixa de 25 a 40 kHz, propiciando duas vantagens (DUGAN *et al*, 2006). A primeira é que um pequeno indutor é suficiente para limitar o arco de corrente. Segundo, que a alta freqüência elimina ou reduz drasticamente a cintilação em 120 Hz associada com o núcleo do cobre magnético do reator. Como utiliza fonte chaveada pode produzir o dobro ou o triplo do conteúdo harmônico quando comparado com um reator eletromagnético. A Figura 4 mostra o espectro harmônico de corrente de uma lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico.

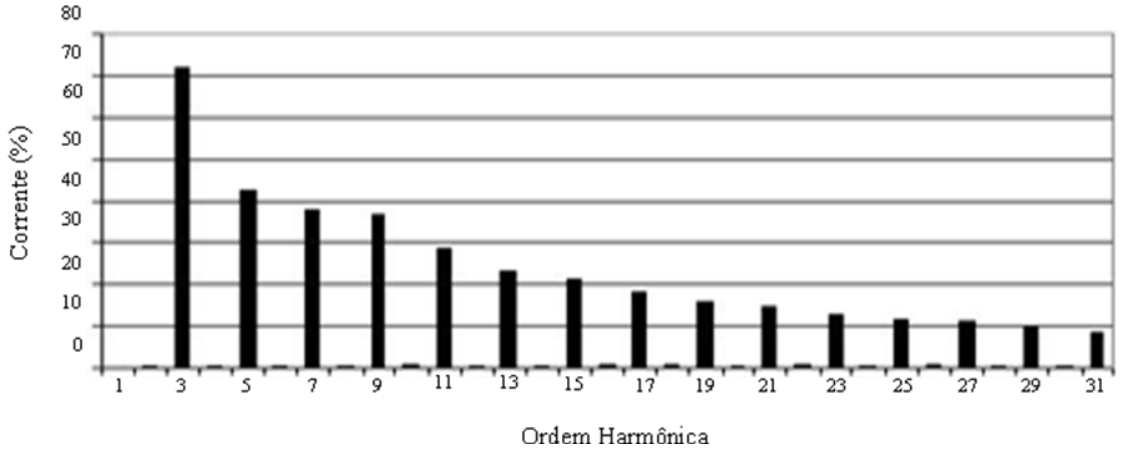


Figura 4. Forma da Onda de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente com Reator Eletrônico (a) e seu Espectro Harmônico (b).

A magnitude da corrente de uma lâmpada fluorescente com um reator eletrônico permanece nula durante boa parte do ciclo, atingindo abruptamente um valor máximo e depois decresce mais lentamente até retornar a zero. Como se verifica pelo espectro da Figura 4, a DHT_i é elevada, em que os sinais harmônicos podem apresentar correntes com pequenos valores eficazes, mas com elevados valores de pico. Este fato, em alguns casos, resulta no disparo de dispositivos de proteção termomagnéticos ou diferenciais.

Como inexiste motivações econômicas ou legislação específica[20], em sua grande maioria os reatores no mercado nacional são de baixo fator de potência devido ao elevado conteúdo de correntes harmônicas, incrementando a poluição das redes elétricas de distribuição. Cabe acrescentar que medições harmônicas para o mesmo tipo de carga, no caso TVs de 14" e 20", resultaram em diferenças consideráveis entre diferentes fabricantes, como segue na Tabela 6.

Tabela 6. Distorções Harmônicas de Tensões e Correntes de Televisores

Item	Fabricante	Diagonal (Polegadas)	*THD* (%)	
			V	*I*
1	Fabricante 1 – Tipo 1	14	1,07	111,63
2	Fabricante 2 – Tipo 1	14	2,98	103,29
3	Fabricante 3 – Tipo 1	14	3,03	95,96
4	Fabricante 4 – Tipo 1	20	2,90	103,00
5	Fabricante 5 – Tipo 1	20	1,69	136,17

Fonte: LOSADA y GONZALES *et al.* (2006.)

Verifica-se pelas Tabelas 5 e 6, que as distorções de corrente de TVs, PCs e LFCs com reator eletrônico integrado, são bastante elevadas, de lâmpadas fluorescentes com reator eletromagnético e microondas moderadas, enquanto a do ventilador é pequena, o que será explicado a seguir.

[20]A Portaria INMETRO 289/2006 estabelece que as LFCs com reator integrado devem ter um fator de potência mínimo de 0,5 caso a potência seja inferior a 60 W. Se a potencia for superior ou igual a 60 W, o fator de potência mínimo é de 0,92, situação em que o produto pode ser designado de alto fator de potência.

4.3. Tipos de Fontes:[21] Propagação de Harmônicos nas Redes Elétricas

O uso de equipamentos que utilizam eletrônica de potência tem se disseminado cada vez mais nos sistemas elétricos de potência, tanto em redes de transmissão em alta tensão (equipamentos FACTS), quanto em residências (por LFCs e televisores). Em instalações industriais as fontes de distorção harmônica tendem a ser de grandes cargas trifásicas concentradas, a exemplo de retificadores de alta potência ou grandes variadores de controle de velocidade para motores (TOFOLI *et al*., 2006). De acordo com esta referência, no setor comercial, a quantidade de cargas não lineares tem crescido com a evolução para escritórios automatizados, que se baseiam cada vez mais em equipamentos eletrônicos computadorizados, assim como pelo esforço em buscar eficiência energética por meio da aplicação de equipamentos com eletrônica de potência.

No caso residencial, onde ocorre uma grande dispersão natural de pequenas cargas monofásicas equipadas com eletrônica de potência, a melhor forma de reduzir os impactos dos harmônicos é garantir que estes equipamentos poluidores injetem o menor nível de harmônicos nas redes elétricas (WATSON *et al*., 2009). Isso porque se torna um tanto difícil atribuir responsabilidade a cada um, como também se determinar a parcela de mitigação individual das correntes harmônicas geradas por diversos consumidores no sistema de distribuição primário. A maior causa para a elevação das distorções de tensão se deve a proliferação de inúmeras pequenas cargas não lineares dispersas ao longo dos alimentadores (PILEGGI *et al*., 1995). Diante da grande quantidade de equipamentos que utilizam eletrônica de potência, a geração, propagação e os efeitos dos harmônicos nas redes elétricas de potência, envolvendo distribuidoras e

[21] De acordo com QUEVEDO (2000, p. 60), a noção intuitiva de fonte é que ela fornece energia ao circuito, o que fez surgir a classificação das fontes como elementos ativos, enquanto os resistores, indutores e capacitores, como elementos passivos. Contudo, uma bateria que é uma fonte recebe energia ao ser carregada, ao passo que um capacitor que não é uma fonte entrega energia ao circuito quando está se descarregando. Dessa forma, uma fonte se caracteriza por não manter uma relação tensão-corrente como ocorre com os elementos passivos que têm a tensão estabelecida como função do tempo quando são conhecidas a corrente em função do tempo em um capacitor ou indutor, por exemplo.

consumidores, têm se consolidado como um dos mais expoentes fatores de degradação da QEE (OMRAN *et al*., 2009; APOLÔNIO *et al*., 2003; LIMA e ROSS, 1996).

Conforme ilustrado na Figura 5, em sistemas radiais de distribuição, a tendência é que as correntes harmônicas de corrente fluam da carga geradora de harmônicos para o sistema de potência por este apresentar uma menor impedância sob o ponto de vista das correntes harmônicas. Entretanto, a inserção de capacitores para correção do fator de potência pode alterar esta tendência, e, assim, drenar parte da corrente harmônica que fluiria para o sistema de potência, como mostra a Figura 5 (DUGAN *et al*., 2006). Além disso, como capacitores conectados ao sistema de potência têm menor impedância para maiores freqüências[22], correntes harmônicas podem facilmente causar a destruição destes capacitores nas redes elétricas (WATSON *et al*., 2009).

Segundo GARCIA (2006), os bancos de capacitores mais comumente utilizados no Brasil apresentam problemas quando submetidos a 3% de distorção harmônica de tensão e 15% de distorção harmônica de corrente. Isso decorre do fato das placas das unidades capacitivas serem envolvidas em polipropileno metalizado que não toleram este nível de distorção. De acordo com esta referência, neste caso uma alternativa para limitar os harmônicos seria inserir na entrada da unidade capacitiva um reator, que em virtude de seu núcleo de ferro tem um limite de saturação para que este reator possa atuar. Assim, acrescenta que para resolver este problema, devem ser utilizadas placas envolvidas por SF_6, tecnologia adotada para bancos de capacitores de média tensão e também utilizada em filtros harmônicos, mas que tem um custo que é cerca do triplo da célula em polipropileno metalizado.

[22] A impedância de um capacitor é dada por

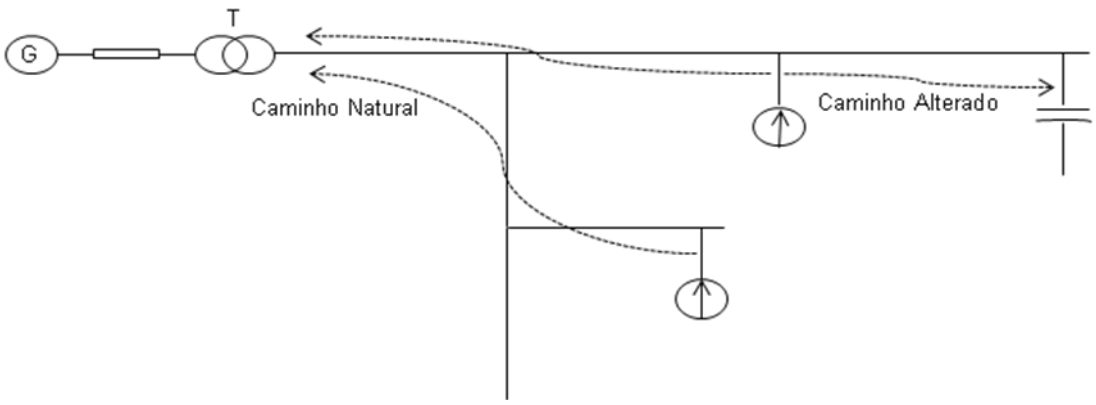


Figura 5. Capacitor para Correção do Fator de Potência vs. Fluxo Harmônico.

Medições realizadas antes e após a compensação capacitiva em redes de baixa tensão com consumidores domésticos, mostraram que a inserção dos capacitores resulta num caminho de baixa impedância para correntes de alta freqüência e num aumento tanto da distorção de corrente quanto de tensão, além de provocar um aumento do consumo de eletricidade dos equipamentos consumidores (DECKMANN *et al.*, 2005).

De acordo com esta referência, a explicação para o aumento deste consumo de eletricidade é que a instalação de bancos de capacitores pelas concessionárias para correção do fator de potência de deslocamento[23] possibilita reduzir o carregamento de transformadores e as perdas joulicas nas redes elétricas, assim como melhorar a regulação da tensão de suprimento para valores mais próximos da nominal, mesmo sob carga pesada. Assim, considerando cargas de impedância constante (eletromagnéticas como motor ou transformador), a elevação do perfil de tensão acarreta num maior consumo de eletricidade, já que a potência é diretamente proporcional ao quadrado da tensão e inversamente proporcional à impedância da carga.

Ainda no que se refere à compensação dos harmônicos nas redes elétricas, deve-se considerar que algumas cargas não lineares são modeladas como "fontes harmônicas de corrente" ou "fontes harmônicas de tensão"[24] dependendo do comportamento

[23] Refere-se ao ângulo entre as formas de onda de tensão e de corrente na freqüência fundamental (60 Hz) e conhecido simplesmente como fator de potência para sistemas lineares.
[24]De acordo com DESOER e KUH (1988, p. 22-25) Um componente de dois terminais é denominado uma fonte independente de corrente se ele mantém uma determinada corrente especificada entrando e saindo de um circuito ao qual esteja ligado, ao passo que se este componente mantém uma tensão

apresentado pela carga não linear[25] (POMÍLIO e DECKMANN, 2007). Segundo esta referência, no caso de equipamentos eletromagnéticos, as indutâncias destes equipamentos limitam a taxa de variação de corrente, conferindo um comportamento de fonte de corrente conforme apresentado por refrigeradores, freezers, máquinas de lavar roupas, reatores eletromagnéticos e condicionadores de ar. Por outro lado, para cargas possuindo diodos retificadores com filtro capacitivo CC[26] de saída, Figura 6, e sem significante impedância série, o capacitor CC limita a taxa de variação de tensão, resultando num comportamento de fonte de tensão, cabendo citar computadores, monitores de vídeo, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos e televisores.

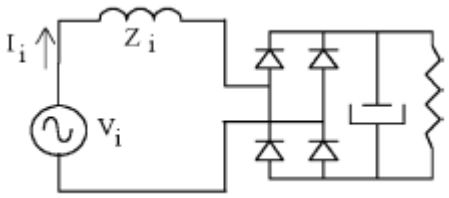


Figura 6. Retificador com Filtro Capacitivo.

Medições em laboratório da associação de uma TV de 56 W mais 3 (três) LFCs, cada uma de 15 W, mostraram que esta carga total, do tipo fonte harmônica de tensão, produziu 700 mA de 3^0 harmônico, um valor sete vezes maior que a corrente harmônica gerada por um refrigerador simples de cerca de 108 W, do tipo fonte harmônica de corrente (DECKMANN *et al*., 2005).

As cargas tipo fonte de tensão se caracterizam por apresentar potência constante em que suas correntes variam para compensar mudanças na tensão de alimentação de suprimento, enquanto as cargas eletromagnéticas por serem modeladas como fontes de corrente, mantêm constante a emissão de correntes harmônicas (DECKMANN *et al*.,

---

especificada nos terminais de um circuito no qual está ligado ele é denominado uma fonte independente de tensão.

[25]No caso de componentes eletrônicos, que se caracterizam como elementos não lineares, as fontes de tensão ou de corrente são ditas dependentes por serem controladas por algum dos parâmetros do circuito (DESOER e KUH, 1988). Neste caso, uma fonte de corrente dependente pode ser controlada a corrente ou tensão, ocorrendo o mesmo para uma fonte de tensão dependente. Para maiores esclarecimentos consultar DESOER e KUH (1988, p. 341-343).

[26] Corrente contínua.

2005). Como se vê na Figura 5, por questões técnicas[27], o capacitor para correção do fator de potência de deslocamento é instalado em paralelo à rede elétrica de modo a compensar o fluxo de reativos gerado pelas cargas.

Considerando a mesma solução para o caso da instalação em paralelo de filtros harmônicos, de modo a compensar harmônicos gerados por fontes de corrente, em que a carga tende a manter as correntes harmônicas fixas, a expectativa é que o filtro em paralelo absorva parte destas correntes que seriam injetadas na rede de suprimento. Entretanto, no caso de fonte de tensão ideal, a expectativa é que a instalação de filtro harmônico em paralelo aumentará a emissão de correntes harmônicas da carga não linear, dado que o filtro representa um novo caminho de baixa impedância para harmônicas de fontes de tensão.

Adicionalmente, se as tensões de suprimento já contiverem componentes harmônicas que deverão ser filtradas, o uso da compensação em paralelo pode produzir o efeito inverso em termos da melhoria da forma de onda, tendo em vista que o caminho de baixa impedância drenará corrente do sistema de potência, aumentando as distorções de corrente e de tensão no alimentador (DECKMANN *et al*., 2005).

Conforme esta referência as medições mostraram que os impactos das cargas tipo fonte de tensão (TV, lâmpada fluorescente compacta) nas distorções harmônicas tanto de tensão quanto de corrente são muito maiores do que o das cargas tipo fonte de corrente (geladeira) (DECKMANN *et al*., 2005).

A literatura mostra que as correntes harmônicas injetadas no sistema elétrico por um grande número de cargas eletrônicas monofásicas não lineares são afetadas tanto pela atenuação quanto pela diversidade (MANSOOR *et al*., 1995). Segundo esta referência, a atenuação se refere à interação entre as distorções de tensão e de corrente, especialmente em virtude da impedância do sistema elétrico, enquanto a diversidade, que implica num cancelamento parcial das correntes harmônicas entre as diferentes

[27] A instalação de compensação em série exigiria o dimensionamento do equipamento para suportar toda a corrente do circuito.

cargas devido à dispersão dos ângulos de fase[28] das correntes harmônicas, é devida principalmente às variações nos parâmetros da carga e do circuito, tais como impedância, potência demandada, etc. Dessa forma, as variações nos parâmetros dos circuitos e das cargas que provocam o cancelamento parcial das correntes harmônicas, faz com a magnitude das correntes harmônicas através de um transformador seja menor do que a soma das magnitudes das correntes harmônicas dos vários circuitos que este transformador alimenta. Além disso, a interação entre as correntes harmônicas e a impedância do sistema elétrico resulta numa tensão não senoidal na barra de suprimento que tende a provocar a atenuação das correntes harmônicas.

A título de ilustração, medições comparativas entre em uma LFC circular de 22 W e três LFCs ligadas em paralelo, sendo que em ambas as situações as lâmpadas foram submetidas a mesma tensão de alimentação, mostram o efeito desta redução da THD_i para o conjunto das cargas não lineares conectadas em paralelo, conforme mostra a Tabela 7 (GAMA, 2001).

Tabela 7. Distorções Harmônicas para Lâmpada Fluorescente Circular

Carga	V_{rms} (V)	I_{rms} (A)	V_1 (V)	I_1 (A)	THD_i (%)	THD_V (%)
1 LFC	125	0,55	125	0,31	83,09	2,49
3 LFCs	125	1,30	125	0,93	69,65	2,73

Fonte: GAMA (2001).

Verifica-se pela Tabela 7 que para o conjunto das 3 (três) LFCs circulares a corrente na frequência fundamental, I_1, é 3 (três) vezes a corrente de uma única lâmpada, mas a THD_i de 83,09%, caso de uma única lâmpada, se reduz para 69,65%, situação das 3 (três) lâmpadas em paralelo. Por outro lado, ocorre um aumento da THD_V para a situação das 3 (três) lâmpadas em paralelo. Entretanto, cabe frisar que esta compensação parcial dos harmônicos de corrente entre várias cargas em paralelo, significa que desprezar este efeito levará a um considerável sobre-estimação do

[28]Conforme pode ser visto na seção B.1 do Apêndice B, a corrente e a tensão elétrica são ondas senoidais variantes no tempo que se caracterizam como um fasor, que possui magnitude (intensidade) e um ângulo referente à sua posição angular em relação ao eixo horizontal de referência (0º), a partir da qual os ângulos são positivos no sentido anti-horário e negativos no sentido horário (LEÃO, 2006)

problema, mas não implica que a proliferação de cargas monofásicas com eletrônica de potência não agravará os níveis das distorções nos sistemas de distribuição (MANSOOR *et al*., 1995).

Esta redução da THD_i com o aumento da carga pode ser explicada pelo efeito da atenuação (MANSOOR *et al*, 1995; 1995a; 1995b). De acordo com esta referência, a interação entre o somatório das correntes harmônicas das inúmeras cargas individuais dos diversos circuitos e a impedância do transformador resulta numa tensão distorcida na barra do transformador. Como consequência, ocorre a uma atenuação das correntes harmônicas. Acrescenta que a diversidade se deve ao cancelamento parcial das correntes harmônicas das diferentes cargas devido à dispersão dos ângulos fase causada pelas variações nos parâmetros tanto do sistema quanto da carga.

4.4. Considerações Finais

Por meio deste Capítulo, que tratou das distorções harmônicas, pode ser verificar que para um sistema elétrico forneça energia com tensão numa forma de onda praticamente senoidal, com freqüência fixa e amplitude constante, é necessário que a corrente elétrica absorvida pela carga nos terminais do consumidor também seja praticamente senoidal. Foi visto também que o termo harmônica, que tem origem na acústica, se refere a frequências múltiplas inteiras da fundamental (60 Hz no Brasil). Já as inter-harmônicas são frequências múltiplas não inteiras da fundamental e as sub-harmônicas são freqüência menores do que a frequência fundamental.

Foi mostrado ainda que as cargas não lineares, incluindo os equipamentos com PES que tem como um dos objetivos aumentar a eficiência energética, provocam o aumento das correntes harmônicas nas redes elétricas. Como resultado podem ocorrer erros em medidores, atuação indesejada de sistemas de proteção e controladores lógico programáveis, interferência eletromagnética em cargas sensíveis, elevação do potencial de neutro em relação ao de terra, aumento da circulação do fluxo de energia não ativa, necessidade de maior dimensionamento e sobreaquecimento de condutores e

transformadores elétricos, bem como de máquinas elétricas, além de maiores das perdas joulicas tanto nos circuitos quanto nos transformadores.

Adicionalmente, pode se constatar que o uso massivo de milhares de pequenas cargas não lineares dispersas ao longo dos alimentadores, drenando correntes harmônicas das redes elétricas, se constitue na maior causa para a elevação das distorções de tensão em redes de distribuição. As principais fontes de harmônicos são as cargas tipo fonte de corrente, caso dos equipamentos eletromagnéticos, e as cargas tipo fonte de tensão, caso de circuitos com diodos retificadores com capacitor de saída. As correntes harmônicas fluem preferencialmente da carga geradora para o sistema de potência, mas a inserção de bancos de capacitores, que também são sensíveis às distorções harmônicas, pode alterar o sentido deste fluxo e aumentar as distorções harmônicas.

Finalmente foi mostrado que as correntes harmônicas das cargas nos diversos circuitos da rede elétrica sofrem o efeito da atenuação e da diversidade, o que faz com que a corrente harmônica total no secundário de um transformador seja menor do que a soma das correntes harmônicas dos seus diversos circuitos.

Como as distorções harmônicas têm se consolidado como um dos mais relevantes fatores de degradação da QEE, no Capítulo 5 serão discutidos os seus impactos e as questões regulatórias pertinentes.

Capítulo 5

Impactos das Distorções Harmônicas

Neste capítulo serão abordados os aspectos tecnológicos e regulatórios relacionados aos impactos das distorções harmônicas. Inicialmente, dentre os diversos problemas das distorções harmônicas, será dada uma ênfase quanto ao problema de sobrecarga no condutor neutro num sistema trifásico a quatro fios. Na seção 5.2 será abordada a implementação da eficiência energética no Brasil pela aplicação de cargas não lineares e seus impactos sobre os harmônicos. Na seção 5.3 serão apresentados alguns exemplos de medidas de conservação de energia que causam distorções harmônicas. A seção 5.4 versará a respeito de algumas aplicações de eficiência energética que causam a geração e propagação de harmônicos de correntes nas redes elétricas. A seção 5.5, Impactos da Aplicação das Normas e Padronizações, se

inicia com uma breve introdução a respeito do panorama sob o contexto regulatório, seguido da apresentação das principais normas/recomendações internacionais.

5.1. Considerações Iniciais

Conforme já relatado, os harmônicos podem originar problemas na rede elétrica tais como perdas adicionais e aquecimento em máquinas e capacitores, subtensões devido a ressonâncias, interferências, aumento da corrente de neutro ou de retorno, erros em instrumentos convencionais, aumento das perdas joulicas em condutores alimentadores e transformadores, variação do consumo de eletricidade das cargas conectadas ao mesmo circuito das cargas com características não lineares, redução da vida útil de componentes e equipamentos elétricos, entre outros (RESENDE *et al.*, 2003*;* GAMA, 2001; SOUZA e ROSS, 2003).

Os sistemas de distribuição de baixa tensão trifásicos a quatro fios são largamente utilizados na distribuição de energia elétrica para escritórios, residência e indústrias. Nestes sistemas, sob condições de operação normal com as cargas razoavelmente equilibradas, espera-se que a corrente de neutro seja pequena e não exceda a 20% da magnitude normal da corrente de fase (ENJETI *et al*., 1994). Segundo MOHAN (1992), cargas não lineares demandam correntes altamente distorcidas dos sistemas de distribuição, contendo componentes de terceira harmônica comparável à amplitude da fundamental.

As cargas monofásicas não lineares injetam correntes harmônicas indesejáveis nos condutores de fase, com um alto conteúdo de seqüência zero[29], resultando em um grande fluxo de corrente harmônica fluindo no condutor neutro. As correntes harmônicas de seqüência zero não se cancelam, mas se adicionam no condutor neutro, podendo ocasionar, em sistemas de distribuição trifásicos a quatro fios, o sobreaquecimento excessivo do condutor neutro e do transformador de distribuição, assim como uma tensão excessiva tensão entre neutro e terra. Estudos relatam diversos casos de correntes de neutro em excesso de 100% da corrente de fase (ENJETI *el al*, 1994 e GRUZS, 1992).

---

[29] As componentes de sequências são definidas no Apêndice B.

O carregamento da corrente de neutro, num circuito trifásico a quatro fios com cargas lineares, é simplesmente função do equilíbrio entre as cargas nas três fases. Entretanto, em circuitos com cargas não lineares as correntes de seqüência zero se somam aritmeticamente nos condutores de neutro dos circuitos trifásicos. O terceiro harmônico de corrente é geralmente a maior componente harmônica em equipamentos eletrônicos monofásicos com fontes chaveadas, como lâmpadas compactas com reator eletrônico, computadores e estabilizadores de voltagem (TOFOLI, 2006).

SOUZA e ROSS (2003) verificaram o aumento considerável das correntes da rede de alimentação de um grande centro de processamento de dados que possui um *no-break* trifásico de 60 kVA alimentando tomadas destinadas a computadores. De acordo com esta referência, mesmo em condições de equilíbrio entre as fases, por meio de uma medição detalhada das correntes do *no-break*, em que se utilizou um equipamento de monitoração de QEE para se comparar com a leitura no painel do *no-break*, verificou-se uma elevação substancial das correntes, demonstrando que os amperímetros não mensuravam o valor eficaz real das correntes, e constatado ainda que o neutro da instalação apresentava problemas de sobrecarga, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8. Correntes Eficazes no *No-Break*

Fase	Leitura no Painel I_P	Corrente Eficaz Medida - I_{rms}	I_{ef} /I_P
A	70 A	92 A	131%
B	35 A	52 A	149%
C	41 A	64 A	156%
Neutro	-	100 A	-

FONTE: ROSS e SOUZA (2003).

Assim, o aumento da corrente de neutro ou de retorno eleva a temperatura destes condutores, reduzindo a sua vida útil, além de poder provocar o surgimento de tensões entre neutro e terra devido à interação entre a corrente e a impedância da fiação (CAMARGO *et al*., 2003).

Esse aumento eficaz da corrente total em virtude das distorções harmônicas de corrente resulta em perdas joulicas, I^2R, adicionais ao fluxo normal da corrente a 60 Hz. Conforme DUGAN (1995), a resistência efetiva dos condutores é maior com o aumento da freqüência devido ao efeito pelicular[30], em que fluxos desiguais das cargas elétricas através da seção transversal dos condutores, provocam uma maior circulação de corrente na periferia externa do cabo do condutor, o que reduz sua seção transversal efetiva e, consequentemente, sua ampacidade ou capacidade de transporte de corrente. O efeito pelicular aumenta com o incremento da freqüência e da amplitude da onda, razão pela qual as harmônicas de maiores freqüências provocam um maior grau de aquecimento nos condutores (TOFOLI *et al*., 2006).

Os catálogos dos fabricantes devem considerar o efeito pelicular no sistema em corrente alternada (CA), em que a resistência do condutor aumenta com o incremento da frequência quando comparada com o sistema em corrente contínua (CC), pois quando um condutor conduz correntes harmônicas de mais altas freqüências que a fundamental, há um expressivo aumento da razão entre a resistência CA (R_{ac}) e a resistência CC (R_{dc}), conforme mostra a Tabela 9 para condutores típicos utilizados em redes de distribuição.

Tabela 9. Razão R_{ac}/R_{dc} para Condutores em Função da Ordem Harmônica

ϕ	Ordem Harmônica								
(AWG)	1	5	7	11	13	17	19	23	25
1/0	1,00	1,09	1,17	1,35	1,44	1,62	1,71	1,87	1,94
2/0	1,01	1,15	1,26	1,50	1,61	1,83	1,93	2,11	2,19
3/0	1,01	1,22	1,38	1,69	1,82	2,07	2,18	2,37	2,46
4/0	1,02	1,33	1,53	1,90	2,06	2,33	2,45	2,65	2,74

Fonte: RICE (1986).

[30]Quando uma corrente alternada (CA) flui num condutor, a densidade de corrente varia no tempo, o que produz forças eletromotrizes desiguais na seção do condutor, que se opõem ao fluxo destas correntes com maior intensidade no centro do condutor e diminuindo para a sua periferia (TARTER, 1993). Assim, a corrente tende a fluir pela superfície do condutor, resultando no efeito pelicular (*skin effect*). Como conseqüência, este efeito acarreta um aumento da resistência efetiva do condutor para uma corrente CA em comparação a sua resistência CC.

A ABNT, por meio da norma NBR 5410, apresenta um critério de dimensionamento para circuitos trifásicos a 4 condutores, possuindo um desequilíbrio inferior a 50% em que se prevê uma corrente de 3ª harmônica no neutro.

Já as lâmpadas de iluminação pública, por serem cargas não lineares, quando alimentadas com tensão totalmente senoidal ou não, produzem correntes com elevados níveis de distorções harmônicas, o que modifica o perfil da energia elétrica nestes sistemas, afetando a qualidade das formas de onda de tensão e de corrente circulante, além de poder alterar o funcionamento de semáforos, painéis digitais de comunicação visual e de tempo, entre outros equipamentos ligados a essa mesma rede (TOSTES *et al*., 2002).

No caso de uma maior ocupação do sistema elétrico pelas potências não ativas, incluindo as harmônicas e as de desequilíbrio, haverá uma menor capacidade de transporte de energia ativa. Neste caso, tal sistema elétrico terá que ser substituído ou a ele serem incorporados novos equipamentos para o atendimento das novas cargas, incorrendo num substancial aumento de custos.

5.2. Os Programas de Eficiência Energética no Brasil e os Harmônicos

Entre 1986 e 2007, as ações do PROCEL voltadas para a eficiência energética resultaram numa economia de eletricidade total de 28.500 GWh, equivalendo a um montante de aproximadamente 6,9% do consumo total de eletricidade no Brasil em 2007 ou cerca de 31,4% do consumo no setor residencial (ELETROBRÁS/PROCEL, 2009) [31]. De acordo com esta referência, esta eletricidade economizada seria suficiente para atender 16,3 milhões de residências durante um ano, levando-se em consideração um consumo médio mensal típico no Brasil de 145,2 kWh/mês[32]. Acrescenta ainda que esse montante de energia seja equivalente àquela fornecida durante um ano por uma

[31] O consumo total de eletricidade e o consumo do setor residencial no Brasil em 2007 foram, respectivamente, de 412.130 GWh e 90.881 GWh (BEN, 2008).
[32] De acordo com o relatório da EPE, Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica - Boletim Mensal - Mês Base: Dezembro 2007.

hidrelétrica de aproximadamente 6.841 MW de capacidade, se considerado um fator de capacidade típico de 56% para usinas hidrelétricas e incluindo um fator de 15% de perdas médias nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica[33].

Em contato pessoal com a Eletrobrás/Procel, averiguou-se que estas medidas de eficiência energética incluíam o uso de LFCs em substituição às incandescentes, a compensação da potência reativa pela aplicação de bancos de capacitores, o controle do fluxo luminoso pela utilização de *dimmers*, a aplicação de controle de velocidade variável de motores e do controle eletrônico da temperatura de aquecimento da água dos chuveiros elétricos. Não se observou, contudo, uma vinculação entre estas medidas de eficientização e seus efeitos sobre a QEE, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10. Benefícios e Efeitos da Conservação Sobre a Qualidade de Energia Elétrica

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA		QUALIDADE DA ENERGIA
Ação	Benefício	Efeitos
Instalação de Controladores de Velocidade Variável de Motores	Economia de Energia Gerência do Controle de Fluxo	Geração de Harmônicos Eliminação da "Depressão de Tensão" Durante a Partida de Motores
Instalação de Lâmpadas Fluorescentes	Economia de Energia	Geração de Harmônicos Susceptibilidade à Cintilação Redução do Fator de Potência da Instalação
Instalação de Banco de Capacitores Controle do Fluxo Luminoso	Melhoria do Fator de Potência Economia de Energia Melhoria do Fator de Carga	Geração de Transitórios Amplificação de Harmônicos Geração de Harmônicos Redução do Fator de Potência Melhoria da Tensão de Regime

Fonte: ABREU (1997-2).

[33] Foi considerado um fator de perdas globais de 15%, devido à grande parcela de utilização da energia elétrica ocorrer na distribuição de eletricidade em baixa tensão.

Além dos efeitos mostrados na Tabela 10, uma consequência da geração das correntes harmônicas é o aumento total da corrente eficaz (I_{rms}) nos circuitos e a diminuição do fator de potência (*fp*) da carga, conforme demonstrado, respectivamente, pelas Equações 11 e 12 (TOFOLI *et al*., 2006):

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + TDH_i^2} \tag{11}$$

$$fp = \frac{fp_{desl}}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \tag{12}$$

Tomando como base uma corrente fundamental de 1 A, a Tabela 11 mostra o aumento de I_{rms} e a redução do *fp* em função da THD_i.

Tabela 11. Influência da THD_i no Aumento da Corrente Eficaz (I_{rms}) e na Redução do Fator de Potência (*fp*)

$\%THD_i$	Aumento de I_{rms} (%)	*fp*
0	0,00	1
5	0,13	0,999
10	0,50	0,995
20	1,98	0,981
30	4,40	0,958
40	7,70	0,928
50	11,80	0,894
60	16,62	0,857
70	22,07	0,819
80	28,06	0,781
90	34,54	0,743
100	41,42	0,707
120	56,20	0,640
130	64,01	0,610
140	80,28	0,555
150	97,23	0,507

Fonte: Elaboração Própria

Outra questão é que as distorções harmônicas de corrente geradas pelas cargas não lineares, fluindo pelas redes elétricas, em interação com a impedância do sistema, resultam na distorção harmônica de tensão. Assim, para se verificar o comportamento da carga quando submetida a distintas formas de onda de alimentação, foram feitos ensaios em laboratório a fim de se investigar a relação entre a variação da potência ativa e das distorções harmônicas de corrente, para as mesmas cargas quando alimentadas por ondas de tensão senoidal pura[34], "plana"[35] e "com pico"[36], mostradas na Figura 7 (SOUZA e ROSS, 2003).

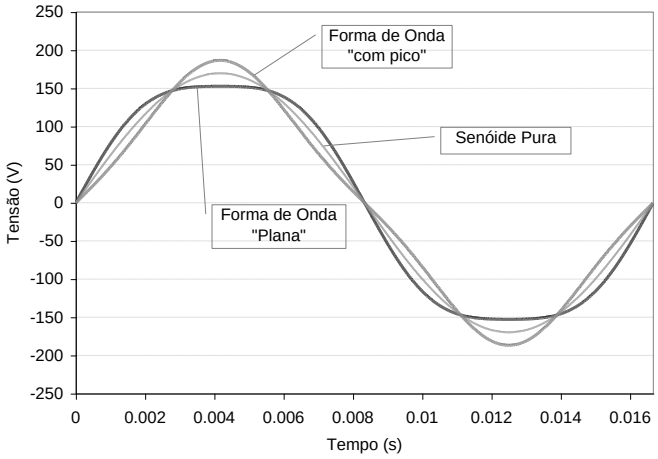


Figura 7. Formas de Onda de Tensão Senoidal, "Plana" e "com Pico".

Conforme esta referência, foram ensaiados um conjunto de 3 (três) lâmpadas fluorescentes tubulares com reator eletrônico e uma associação destas 3 (três) lâmpadas com 1 (um) *freezer* vertical mais 2 (dois) computadores, que utilizam fontes chaveadas, para comparar o consumo ativo destas cargas quando alimentadas por tensão senoidal pura, "plana" e "com pico" e tensões distorcidas, sendo os resultados apresentados na Tabela 12.

---

*Figura 7 gentilmente cedida pelo autor Luiz Felipe Wilcox de Souza.

[34]Tensão senoidal pura de 120 V.

[35] Tensão senoidal de 120 V e 10% de terceiro harmônico, I_3, em que o ângulo de fase do 3º h é de 0º em relação à fundamental, o que resulta numa forma onda "plana".

[36]Tensão senoidal de 120 V e 10% de terceiro harmônico, I_3, e mesma THD_V da onda plana, em que o ângulo de fase do 3º h é de 180º em relação à fundamental, o que resulta numa forma onda "com pico".

Observando a Tabela 12, pode se notar que em relação à tensão senoidal pura, ocorre uma redução da potência ativa da carga para a alimentação por onda plana e um aumento da potência ativa para o caso da onda com pico, tanto para as 3 (três) lâmpadas fluorescentes tubulares quanto para a associação das cargas.

Tabela 12. Comparação da Potência Ativa e do 3º Harmônico para Diferentes Ondas de Tensão de Alimentação

	Potência Ativa			Corrente de 3º Harmônico		
	Senoidal	Plana	Com Pico	Senoidal	Plana	Com Pico
3 lâmpadas	1	-12%	+13%	0,786	0,670	0,825
Associação	1	-3%	+6%	2,707	3,166	2,938

Fonte: SOUZA e ROSS (2003).

Para as lâmpadas fluorescentes tubulares, que apresentam uma moderada THD_i (Tabela 5), há uma redução da corrente de 3^0 harmônico, I_3, para a alimentação por onda plana e um aumento para a onda com pico. Entretanto, quando são associadas cargas com elevada THD_i, no caso os 2 (dois) computadores com fontes chaveadas, há um aumento da corrente de 3^0 harmônico, I_3, tanto para a onda plana quanto para onda com pico.

5.3. Algumas Medidas de Eficiência Energética e Seus Impactos nas Distorções Harmônicas

No caso da iluminação das residências, para atingir este objetivo uma das medidas mais adotadas se refere à substituição das lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas com reator eletrônico. Outra medida que pode ser utilizada é a inserção de *dimmers* para controlar o fluxo luminoso produzido pelas lâmpadas. Entretanto, estas medidas resultam na adição cada vez maior de cargas com características não lineares, propiciando um aumenta do conteúdo total de harmônicos nas redes elétricas.

Numa análise dos impactos causados pelo uso massivo LFCs na rede de distribuição da COPEL, tomou-se como amostra um condomínio residencial constituído por edifícios de três andares com doze apartamentos cada, alimentado por um transformador de 112,5 kVA, em que houve a substituição de 7,8 kW de lâmpadas incandescentes (LI) por 1,95 kW de LFCs, cada uma de 15 W. Chegou-se ao seguinte resultado comparativo, mostrado na Tabela 13, para medições no secundário do transformador, das situações com predominância de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas (TEIXEIRA *et al*., 2005):

Tabela 13. Comparação Lâmpada Incandescente x Fluorescente Compacta

Grandeza Analisada	LI	LFCs	Variação (LI/LFCs)
THD_V (%)	2,37	3,07	29,5%
THDi (%)	19,76	37,11	87,8%
P (kW) - consumo	7,80	1,95	-75%
S (kVA) - trafo	16,10	10,50	-35%
I_{neutro} (A)	17,54	17,85	+1,77%

Fonte: TEIXEIRA *et al.* (2005).

Sob a ótica dos consumidores, houve uma redução de 75% no consumo ativo em kW. Entretanto, pelo lado da concessionária a redução da ocupação do transformador, ou seja, da potência aparente a ser disponibilizada em kVA, foi de apenas 35%. É importante observar, porém, que a corrente de neutro permanece praticamente inalterada com um aumento de apenas 1,77%, haja vista a forte presença das harmônicas de corrente. Além disso, cabe ressaltar um incremento de 29,5% na THD_V e de 87,8% na THD_i.

Isto acontece porque ocorre um aumento da potência não ativa de distorção (*D*) fluindo nas redes elétricas e que pode ser explicado devido ao fator de potência (*fp*) nas lâmpadas incandescentes ser unitário, caso em que a potência aparente é igual à potência ativa, enquanto nas LFCs, que apresentam elevada THD_i, entre 82% e 109%, o *fp* varia de 0,43 a 0,69, situação em que a potência aparente é a raiz quadrada da soma dos quadrados das potências ativa e reativa (RADAKOVIC *et al*., 2005). Consequentemente, NLLs com PES possibilitam uma substancial redução da potência

ativa (*P*), mas aumentam o fluxo das potências não ativas (*N*) nas redes elétricas, resultando numa diminuição da capacidade instalada (*S*) consideravelmente menor do que a redução de *P* (TEIXEIRA *et al*., 2005).

Assim, para se analisar as economias propiciadas pela eficiência energética implementada por equipamentos com PES, deve-se não apenas avaliar a redução do consumo de eletricidade para o consumidor devido à diminuição de *P*, mas também os efeitos das maiores THD_{is} que resulta num baixo *fp*, entre outros efeitos indesejáveis.

Um estudo para investigar a redução do consumo de energia pela inserção de LFCs em substituição às lâmpadas incandescentes, considerando três diferentes cenários de substituição apresentados na Tabela 14, chegou à seguinte conclusão (PENNA *et al*., 2005):

Tabela 14. Conservação de Energia Elétrica Pelo Uso de LFCs

Percentual de Substituição	Redução no Consumo Residencial	Redução no Consumo Total
10%	2%	0,56%
20%	4%	1,12%
40%	8%	2,24%

Fonte: PENNA *et al*. (2005)

Da Tabela 14, vê-se que, sob um ponto de vista energético, a redução percentual no consumo não é tão expressiva. Entretanto, os aspectos negativos da implementação dos dispositivos em termos de incremento percentual do nível de harmônicos são bastante relevantes (WATSON e HIRSCH, 2009; RADAKOVIC *et al*., 2005; TEIXEIRA *et al*., 2005). Há que se considerar, ainda, que os investimentos para mitigação dos harmônicos são bem mais onerosos do que aqueles voltados para a eficientização energética.

Devido à enorme capacidade de produzir correntes harmônicas, os conversores de eletrônica de potência se constituem numa das mais importantes classes de cargas não lineares no sistema de potência. Estes equipamentos incluem os controladores da

velocidade de motores (elevadores, ar-condicionado), carregadores de bateria, reatores eletrônicos, retificadores, inversores, utilizados em TVs e PCs, entre outros. A porcentagem de cargas com alimentação por eletrônica de potência tem crescido largamente, cabendo citar em especial, a crescente utilização de computadores pessoais.

Existem duas tecnologias de conversores monofásicos (DUGAN *et al.*, 2003): (a) uma antiga que utiliza métodos de controle da tensão no lado CA, a exemplo de um transformador, para reduzir a tensão a níveis requeridos em CC, normalmente a 12 V. Neste caso a indutância do transformador provê um benefício suavizando a forma de onda da corrente de entrada, o que reduz o conteúdo harmônico; (b) uma tecnologia, mais moderna, utiliza técnicas de conversão CC-CC para atingir uma saída CC suave utilizando componentes mais leves, conforme mostra a Figura 8. Neste caso, a entrada da ponte retificadora é diretamente conectada a linha CA, eliminando o transformador de entrada e convertendo a corrente CA em CC. A corrente CC é, então, convertida novamente para CA em alta freqüência, o que possibilita reduzir consideravelmente tanto o tamanho quanto o peso do transformador de saída, e, na seqüência, esta corrente CA é retificada mais uma vez para CC. Computadores pessoais, impressoras, copiadoras e a maioria dos equipamentos eletrônicos atuais utilizam tal tecnologia, que tem como vantagens a redução no peso, a compactação no tamanho, a operação eficiente, além de dispensar o uso de um transformador na entrada de alimentação. Também podem tolerar uma larga variação da tensão de entrada.

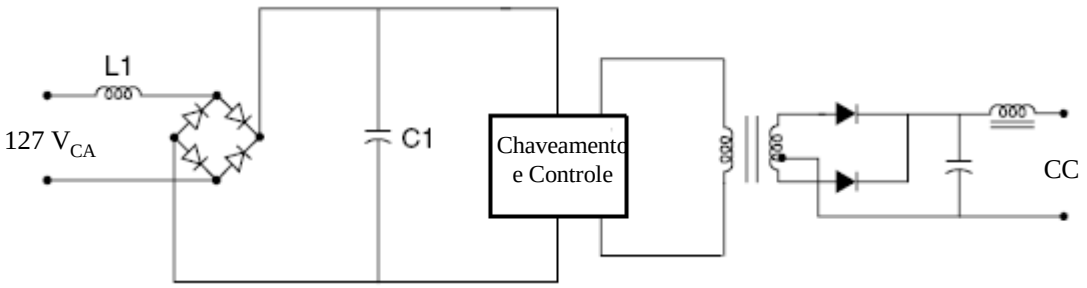


Figura 8. Conversor Eletrônico com Fonte Chaveada.

Como a indutância o lado CA é pequena, os harmônicos de corrente não são suavizados, resultando numa característica das fontes chaveadas que é a geração de um alto conteúdo de correntes harmônicas (DUGAN *et al.*, 2006). De acordo com esta

referência, como as componentes de terceiro harmônico se adicionam no neutro de um sistema trifásico a 4 (quatro) fios, a crescente aplicação desta tecnologia incorrerá em conseqüências nos condutores de neutro, especialmente em edifícios antigos onde o condutor neutro pode ter sido subestimado, cabendo considerar ainda o sobreaquecimento no transformador de distribuição.

5.4. Procedimentos Internacionais de Padronização

As duas principais organizações internacionais de padronização no que diz respeito à limitação da geração e propagação de correntes harmônicas nas redes elétricas são a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). As recomendações elaboradas por estas organizações serão discutidas após uma breve apresentação das questões envolvendo o aspecto regulatório.

5.4.1. Contexto Regulatório

Qualidade da energia que também podemos designar por qualidade da tensão, é uma questão difícil puramente técnica que não atrai somente o interesse de engenheiros, mas também dos reguladores. Isso decorre do fato de a qualidade da tensão ter um impacto econômico crescente sobre os consumidores e sobre os operadores da rede. Os custos associados à degradação da qualidade podem ser grandes, especialmente para consumidores industriais, como no caso da interrupção de uma linha de produção, que pode levar várias horas para nova partida, incorrendo em severas conseqüências financeiras (CEER, 2001).

Um dos principais fenômenos a serem tratados no âmbito da QEE, que pode causar prejuízos aos agentes consumidores, são as variações de tensão de curta duração (VTCDs), assunto que vem ganhando importância em função do crescente número de cargas sensíveis a este efeito. Entretanto, estudos indicam que muitas destas VTCDs são originadas pela presença de harmônicos no sistema elétrico. O desenvolvimento de novas tecnologias, enfocando a eficiência energética, para iluminação, motores, computadores e telecomunicações, mudou completamente a feição do mundo nas

últimas décadas, aumentando a produtividade das atividades comerciais e industriais. A moderna economia na nossa sociedade digital trabalha em rede, sendo que o fluxo de informações em tempo real depende de uma corrente de elétrons, exigindo "9-nines reliability", ou seja, eletricidade disponível 99,9999999% do tempo (VASCONCELOS, 2006).

No que se refere à limitação da distorção harmônica, a IEC 61000-3-2 (IEC, 2001) e a IEEE Standard 519-1992 (IEEE, 1992) constituem-se nas duas mais relevantes recomendações internacionais. Enquanto a primeira define limites para as correntes harmônicas produzidas por equipamentos de baixa potência que são destinados a instalações de baixa tensão, ou seja, limita os harmônicos no próprio equipamento, a segunda provê procedimentos para o controle de harmônicos em sistemas de potência e ainda os limites recomendados para injeções de correntes harmônicas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), ponto de conexão do consumidor à rede da concessionária (ANEEL, 2000b).

A aplicação de uma ou outra recomendação envolve não apenas aspectos técnicos, mas em muito as questões econômico-financeiras, de modo a se comparar os custos entre a mitigação dos harmônicos na própria fonte ou na rede de distribuição (RADAKOVIC *et al.*,2005). Contudo, por limitar a injeção de correntes harmônicas na própria carga poluidora, pode se inferir que, para limitar a geração e propagação dos harmônicos, o custo de se adotar a padronização IEC seja superior em comparação ao da recomendação IEEE. No Brasil, ainda inexiste regulamentação com limites para geração de correntes harmônicas em redes de distribuição de baixa tensão, provavelmente por falta de uma valoração dos impactos econômicos da degradação da qualidade da energia.

Um problema que surge devido as distintas metodologias empregadas por diferentes equipamentos de medição, de acordo com a recomendação IEC ou IEEE, se refere à mensuração do conteúdo harmônico. SOUZA e ROSS (2003) apresentaram dados da monitoração e análise da QEE, comparando os resultados obtidos pela medição de dois instrumentos que empregam metodologias de cálculo distintas. Neste trabalho, organizado pelo ONS, por meio de duas campanhas de medição, de uma

semana cada, vários instrumentos, denominados tipos I e II, foram utilizados para medir o mesmo sinal de tensão em uma subestação em 138 kV, que tem como carga principal uma siderúrgica com forno a arco, e outra, em 230 kV, que tem como carga principal uma indústria de alumínio com retificadores.

De acordo com esta referência, para o caso em que a carga principal é a indústria siderúrgica, o equipamento I obteve uma DHT_V de 2,46%, enquanto o equipamento II, uma DHT_V de 1,57%. Contudo, para o caso em que a principal carga é a indústria de alumínio, os equipamentos responderam de forma similar, apresentando o equipamento I uma DHT_V de 0,98% e o equipamento II uma DHT_V de 1,00%. A explicação é que a indústria siderúrgica, por possuir um grande forno a arco, se caracteriza pela rápida variação de harmônicos. Por outro lado, a indústria de alumínio, com grandes retificadores, possui a característica de uma variação lenta do seu conteúdo harmônico.

Ainda de acordo com esta referência, o equipamento II mede os harmônicos baseando-se na padronização IEC *International Standard* 61000-4-7, que calcula o índice agregado no tempo por meio de média quadrática, possibilitando obter um efeito suavizante das rápidas variações de DHT_V, observadas no caso da indústria siderúrgica, em relação àquelas registradas pelo equipamento I. Já no caso da lenta variação da distorção de tensão, ambos os equipamentos respondem de forma análoga.

Cabe considerar ainda o impasse quanto à atribuição de responsabilidades entre consumidor e concessionária. Enquanto os limites de distorção da tensão no PAC são de responsabilidade da concessionária, os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto são de responsabilidade dos consumidores (GAMA, 2001). A seguir serão apresentadas o escopo destas supracitadas padronizações internacionais.

5.4.2. International Electrotechnical Commission - IEC

A IEC é uma organização normativa mundial que tem como objetivo promover a cooperação internacional em assuntos referentes às normas e/ou recomendações nas áreas de elétrica e eletrônica, publicando normas, relatórios técnicos e manuais para uso

internacional. Os documentos que tratam das questões relativas às distorções harmônicas são os seguintes (SUHETT, 2008; BALTHAZAR, 2004; ANEEL, 2000a):

- IEC 61000-2-2 (1990) – limites de tensões harmônicas individuais e totais para baixa tensão (BT ≤ 1kV);
- IEC 61000-3-2 (2001) - limites para emissão de harmônicos de correntes harmônicas produzidas por equipamentos com consumo de até 16A por fase conectados em sistemas BT;
- IEC 61000-3-4 (2001a) - limites para emissão de harmônicos de correntes harmônicas produzidas por equipamentos com consumo superior a 16A por fase conectados em sistemas BT;
- IEC 61000-3-6 – limites de emissão de harmônicos de corrente por cargas não lineares conectadas aos sistemas de média (1kV < MT ≤ 35kV) e alta tensão (35kV < AT ≤ 230kV). Estabelece valores indicativos, expressos como valores percentuais da tensão nominal, em termos de planejamento do sistema, para se avaliar o impacto de todos os consumidores no sistema supridor;
- IEC 61000-4-7 – orientações para aplicação de instrumentos de medição de freqüências até 2.500 Hz, servindo como guia geral dos requisitos básicos da instrumentação.

Haja vista este trabalho focar em distorções harmônicas nas redes de distribuição serão enfatizados os limites de corrente e de tensão nesta faixa. A IEC 61000-3-2 é o documento mais completo para o estabelecimento dos limites de correntes harmônicas geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos de baixa potência que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, com o objetivo de proteger outras cargas e componentes do sistema elétrico (ANEEL, 2000a). Para isso os equipamentos são classificados em 4 classes com limites para os níveis máximos das distorções harmônicas de corrente (SUHETT, 2008):

- classe A – equipamentos trifásicos equilibrados, eletrodomésticos não classificados como classe D, ferramentas elétricas, controladores da luminosidade (*dimmers*) de lâmpadas incandescentes, equipamentos de áudio e todos os demais não incluídos nas outras três classes;
- classe B – ferramentas portáteis e solda elétrica a arco que não seja de uso profissional;

- classe C – dispositivos de iluminação;
- classe D – computadores pessoais (PCs), bem como monitores de PCs, além de receptores de TV com potência inferior ou igual a 600 W.

Na Tabela 15 são mostrados os limites de distorção harmônica de corrente para as diversas classes de equipamentos de acordo com a padronização IEC 61000-3-2 (IEC, 2001):

Tabela 15. Limites de Distorção Harmônica de Corrente

Ordem Harmônica *h*	Classe A Máxima Corrente (A)	Classe B Máxima Corrente (A)	Classe C % da Fundamental	Classe D (mA/W)	Classe D (A)
Harmônicas Ímpares					
3	2,30	3,45	30.*fp*	3,4	2,30
5	1,14	1,71	10	1,9	1,14
7	0,77	1,155	7	1,0	0,77
9	0,40	0,60	5	0,5	0,40
11	0,33	0,495	3	0,35	0,33
13	0,21	0,315	3	3,85/n	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0{,}15\frac{15}{h}$	$0{,}225\frac{15}{h}$	3	$\frac{3{,}85}{h}$	$0{,}15\frac{0{,}15}{h}$
Harmônicas Pares					
2	1,08	1,62	2		
4	0,43	0,645			
6	0,30	0,45			
$8 \leq n \leq 40$	$0{,}23\frac{8}{h}$				
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \cdot \frac{8}{n}$	$0.35 \cdot \frac{8}{n}$			
Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i) = 8%					

* *fp* é o fator de potência da carga e *h* a ordem harmônica

Fonte: (SUHETT, 2008; BALTHAZAR, 2004; ANEEL, 2000a).

Cabe observar na Tabela 15 são definidos os limites máximos individuais para harmônicos pares e ímpares e também o limite da distorção harmônica total de corrente.

5.4.3. Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE STd. 519-1992

A IEEE Std.519-1992 – IEEE *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* – estabelece procedimentos para o controle de harmônicos em sistemas de potência, recomendando para o Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e também os limites para injeções de correntes harmônicas pelo consumidor, com objetivo de se limitar a máxima distorção de tensão harmônica neste ponto de ligação. É uma recomendação prática utilizada para orientar projetos de sistemas elétricos, especialmente àqueles que suprem cargas não lineares. Por esta norma há uma divisão de responsabilidades. Enquanto o consumidor deve se responsabilizar em manter a emissão de harmônicos de corrente no PAC dentro dos limites determinados pela concessionária, esta será responsável pelo controle global dos níveis de distúrbios sob condições de operação normal, garantindo a manutenção da qualidade de tensão no sistema, como também em fornecer os dados de sua rede elétrica (SUHETT, 2008; BALTHAZAR, 2004 e ANEEL, 2000a).

Os limites das distorções de corrente são estabelecidos em função do nível de tensão dos sistemas, como da razão da corrente de curto-circuito (I_{SC}) no PAC em relação à máxima corrente fundamental (60Hz) da carga, ou seja, I_{SC}/I_{LMax} (SUHETT, 2008; BALTHAZAR, 2004 e ANEEL, 2000a). De acordo com estas referências, a máxima corrente fundamental da carga (I_{LMax}) é dada pela média da corrente da demanda máxima apurada ao longo de 12 meses, sendo que os limites destas distorções devem ser utilizados para as condições de operação normal do sistema, isto é, duração maior do que uma hora, sendo que para outras condições não usuais, como partidas, podem ser excedidos em 50%.

Os limites recomendados da injeção de correntes harmônicas no PAC, tanto as individuais quanto as totais, são expressos não em relação à componente fundamental, mas em valores percentuais ao nível de corrente da instalação, provendo uma base comum para avaliação no tempo (ANEEL, 2000a). A corrente total injetada será função do número de consumidores individuais, bem como do porte de cada um destes, gerando harmônicos de corrente.

Os limites das distorções harmônicas de corrente em função do nível de tensão e da corrente de curto-circuito em percentual da máxima corrente fundamental da carga no PAC é mostrada na Tabela 16.

Tabela 16. Limites de Distorção Harmônica de Corrente (I_h) em % de I_{LMAX}

I_{SC}/I_{LMAX}	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	*TDD*
$V_n \leq 69$ kV						
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20
69 kV < $V_n \leq 161$ kV						
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 – 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 - 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10
$V_n > 161$ kV						
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

TDD representa a distorção de demanda total, ou seja, a distorção harmônica de corrente em porcentagem da máxima corrente de demanda para 15 a 30 minutos de demanda.

Fonte: SUHETT, 2008; BALTHAZAR, 2004 e ANEEL, 2000a.

Os limites das distorções harmônicas de tensão no PAC por nível de tensão são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Limites de Distorção de Tensão Conforme IEEE Std.519-1992

Tensão Nominal no PAC (V_n)	Distorção Harmônica Individual de Tensão	Distorção Harmônica Total de Tensão
$V_n \leq 69$ kV	3,0%	5,0%
69 kV< $V_n \leq 161$ kV	1,5%	2,5%
$V_n > 161$ kV	1,0%	1,5%

Há que se considerar que o nível das distorções harmônicas das tensões no sistema elétrico se deve à corrente total injetada interagindo com a impedância do sistema, em cada uma das freqüências.

5.5. Considerações Finais

Foi visto neste Capítulo que cargas monofásicas não lineares drenam correntes harmônicas distorcidas das redes elétricas com conteúdo de 3º harmônico comparável à amplitude da fundamental. Estas correntes de 3º harmônico se adicionam no condutor neutro dos circuitos, em geral, dimensionados com diâmetro menor do que os condutores de fase. Além disso, as distorções harmônicas reduzem a capacidade de condução de corrente dos condutores em CA devido ao efeito pelicular, em que é maior a resistência do condutor com o aumento da freqüência.

Também foi mostrado, cabendo citar a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas, que a grande redução do consumo de eletricidade para o usuário final por meio do uso de PES, que elevam as distorções harmônicas, deve ser confrontada com uma considerável redução a menor da capacidade instalada do sistema de potência. Neste caso, deve ser avaliada os efeitos das maiores distorções harmônicas que aumentam a corrente eficaz total nos circuitos, diminui o fator de potência total, entre outros efeitos indesejáveis.

Finalmente, foi mostrado que as duas principais organizações internacionais no que diz respeito às distorções harmônicas nas redes elétricas são a IEC, que limita à

geração de correntes harmônicas geradas pelos equipamentos elétricos, e a IEEE, que limita as distorções harmônicas no PAC.

No Capítulo 6 a seguir será avaliada a relação entre a eficiência energética, implementada por equipamentos com PES, e a QEE. Para isso será apresentada a metodologia desenvolvida para estimar os impactos de potência das distorções harmônicas de correntes nas redes elétricas de distribuição, assim.como valorar os seus respectivos impactos econômicos Como meio de obter tais estimativas será utilizado um estudo de caso com os dados das PPHs para a posse e hábitos de uso de TVs entre 1997 e 2005, bem como medições das distorções harmônicas de corrente em redes de distribuição tipicamente residenciais.

Capítulo 6

Estimativas dos Impactos Econômicos dos Harmônicos

6. 1. Introdução

Tanto as regras convencionais de projeto e de operação de sistemas de potência quanto às premissas usuais utilizadas em programas de eficiência energética, implementadas por meio de equipamentos com PES, consideram as formas de ondas de tensão e corrente como sendo puramente senoidais com freqüência fundamental da rede elétrica fixa (60 Hz no caso do Brasil). Em geral, os programas de eficiência energética no Brasil em particular levam em consideração as altas eficiências, em kWh para o consumidor final, devido à aplicação de PES, mas não a contribuição destes para as perdas adicionais ocasionadas pelo aumento das distorções harmônicas de tensões e correntes nas redes elétricas. Além disso, a medição de potência ocorre sob a assunção

de uma freqüência em forma de onda senoidal a 60 Hz, fazendo com que harmônicos afetem diretamente os custos e o faturamento das concessionárias, o que tem sido ignorado por especialistas em energia (SEETO *et al*.,1995).

Inúmeras publicações abordam os impactos das distorções harmônicas provocadas por equipamentos com PES, em que alguns trabalhos enfocam a relação entre o uso de PES e o consumo de eletricidade (DUARTE *et al*., 2007a; LUNDQUIST, 2001; KEY e LAI, 1996). Contudo, poucos quantificam os impactos econômicos quando se trata de cargas eletrônicas monofásicas em redes de distribuição tipicamente residenciais (PILEGGI *et al*., 1995). Entretanto, não foi encontrada na literatura estimativa dos impactos econômicos dos diversos componentes das redes de distribuição de baixa tensão das distorções harmônicas geradas por cargas com PES em longo período a partir de dados de posse e de hábitos de uso de equipamentos com PES.

Diante da inexistência de estimativas a respeito dos impactos da geração e propagação de harmônicas de correntes pela aplicação massiva de PES no Brasil, informação de grande relevância para os agentes de planejamento e de regulação dos sistemas elétricos, utilizando as Pesquisas de Posse e de Hábitos de Uso (PPHs) horário de TVs para uma Unidade da Federação (UF) com aproximadamente 12% do consumo total de eletricidade do Brasil, esta tese tem como objetivo estimar os impactos econômicos sobre a rede de distribuição dos harmônicos gerados por TVs.

6. 2. Metodologia

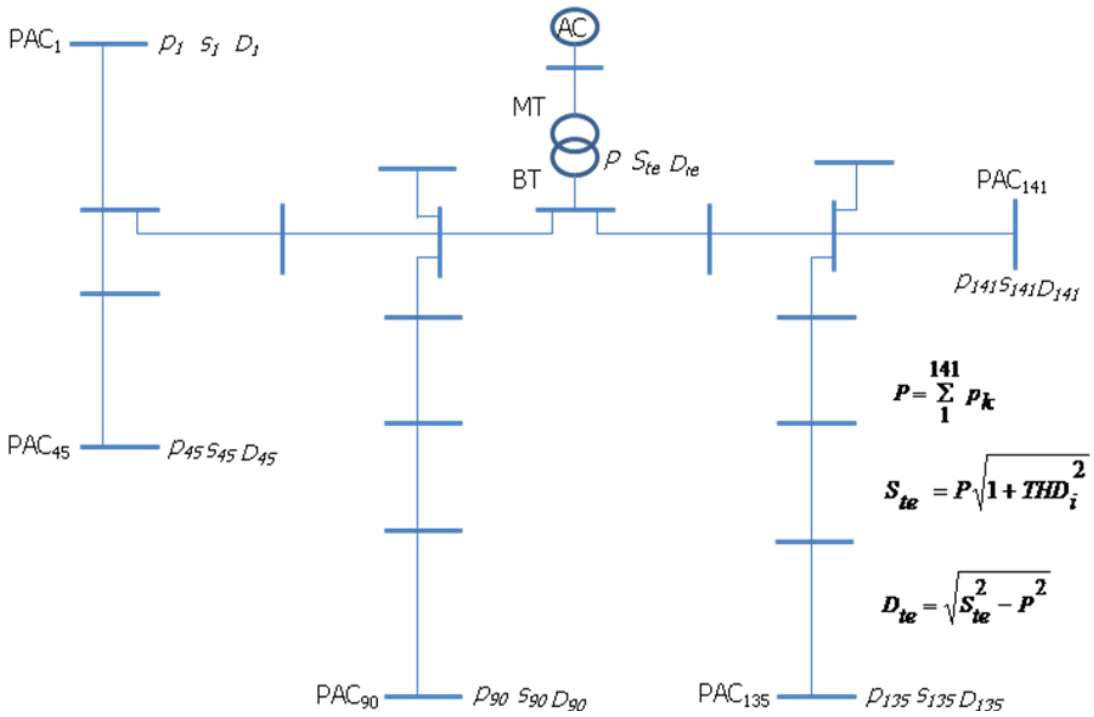
Como visto na Seção 4.3 do Capítulo 4, dentre as cargas residenciais que mais contribuem para as distorções harmônicas de correntes são as não lineares do tipo fonte de tensão (DECKMANN *et al*., 2005), De acordo com as PPHs-1997/2005, as TVs e LFCs também são as cargas residenciais não lineares com maior índice de penetração nas residências (PUC-RIO/ECOLUZ, 2005). Contudo, optou-se por utilizar o caso das TVs de 14” a 29”, devido a disponibilidade em ambas as PPHs das informações para TVs nesta faixa com as mesmas diagonais representando mais de 95% do total de TVs, para se os impactos econômicos da aplicação massiva de PES em redes elétricas de

distribuição tipicamente residências por se constituir na maior fonte de harmônicos dentre as cargas residenciais (DECKMANN *et al*. 2005; LUNDQUIST, 2001). Além disso, enquanto as LFCs têm sido utilizadas em substituição às LIs reduzindo consideravelmente tanto o consumo quanto as perdas de eletricidade (RESENDE *et al*., 2005), as TV antes de menor diagonal com ponte retificadora possuindo diodos, têm sido substituídas por TVs modernas de maiores diagonais com tiristores inseridos no circuito retificador, o que aumenta não só consumo de eletricidade como também a geração de correntes harmônicas (DUARTE, 2008; GARMENDIA e MORÁN, 1994).

Com base nas medições em redes secundárias de distribuição residências realizadas por (POMÍLIO e DECKMANN, 2007; DECKMANN e POMÍLIO, 2005; DECKMANN *et al*., 2005; POMÍLIO *et al*., 2005), foi adotado como Cenário Referência para a PPH-2005 uma THD_i de 13% no secundário de um transformador (112,5 kVA) suprindo 141 consumidores residenciais. Em virtude da não disponibilidade de informações para os anos anteriores foi adotada uma regressão linear da redução de 1% a cada ano, resultando numa THD_i de 5% para a PPH-1997. Para o Cenário Alternativo Baixa Distorção Harmônica, foi adotada a premissa de 1% de THD_i para a PPH-1997 e um aumento linear de 1% a cada ano, resultando em 8% de THD_i para a PPH-2005. Para o Cenário Alternativo de Alta Distorção Harmônica foi adotado o limite superior de 20% THD_i para a PPH-2005 com uma diminuição linear de 1% ao ano, resultando numa THD_i de 12% em 1997. Os valores de 5% e 20% são os limites inferior e superior das distorções harmônicas de corrente dados na Tabela 16, enquanto a THD_i de 1% foi adotada como um valor mínimo.

Por meio de informações amostrais do número de TVs por diagonal em uso por hora, de suas respectivas potências médias, além das quantidades amostrais da Posse e dos Hábitos de Uso de TVs de cada concessionária, foi estimada a potência ativa (P) no secundário do transformador para 141 (cento e quarenta e um) consumidores.

A partir da potência ativa e das $THD_{is,}$ para cada um dos cenários, são estimadas as potências não ativas (D_{te}) e aparente (S_{te}) equivalentes no secundário de um transformador (112,5 kVA)**,** conforme diagramatizado na Figura 9.



$$P = \sum_{1}^{141} p_k$$

$$S_{te} = P\sqrt{1 + THD_i^2}$$

$$D_{te} = \sqrt{S_{te}^2 - P^2}$$

Figura 9. Diagrama Utilizado Para a Rede Elétrica Tipicamente Residencial.

Nos anexos D a F, são apresentadas as Tabelas que mostram, para os anos de 1997 e 2005 no secundário de um transformador de 112,5 kVA, as potências ativa (W), aparente (VA) e reativa (var), bem como a sensibilidade à variação (1%) da potência ativa causada pela distorção harmônica de TVs ligadas, além da potência *standby* de TVs desligadas, de uma amostra de 141 (cento e quarenta um) consumidores, para cada concessionária e a soma para o estado, por hora do dia, para dias da semana, sábados e domingos. Como o consumo de eletricidade (Wh) no intervalo de 1 (uma) hora é numericamente igual a potência média (W) por hora, o consumo ativo de eletricidade de TVs é estimado para o horário de ponta, considerando o período entre 18 e 21 horas, e o consumo fora de ponta para o período das demais horas do dia. O consumo total de eletricidade é dado pela soma dos consumos nos horários de ponta e fora de ponta.

Adotando-se a premissa deste comportamento médio de 141 (cento e quarenta e um) consumidores para toda a população, obtém-se o consumo total de eletricidade (kWh) de TVs por hora do dia, para todos os clientes de cada concessionária, bem com para o estado, a partir do produto de cada consumo horário pela razão entre o total de consumidores de cada concessionária e o número de 141 (cento e quarenta e um)

consumidores. O número total de consumidores dado pela PPH-1997, para as concessionárias A e B, foi, respectivamente de 1.107.024 e 2.703.449, enquanto na PPH-2005 estas quantidades aumentaram, respectivamente, para 1.841.608 e 3.161.345.

Para cada um destes cenários foram estimados em termos quantitativos, os impactos do uso massivo de cargas não lineares nas redes elétricas de distribuição, avaliando: 1) as perdas joulicas adicionais nos condutores do ramal de ligação (trecho entra a medição e o Ponto de Acoplamento Comum – PAC –, que é o ponto de conexão de cada residência à rede elétrica da concessionária) e do circuito terminal (trecho entre a medição e a tomada de cada TV por residência); 2) o aumento da capacidade instalada de transformadores de distribuição e suas perdas fixas adicionais, 3) os custos devido à ocupação do sistema elétrico por energia não ativa que poderia ser comercializada como energia ativa, 4) a compensação do maior fluxo de energia não ativa nas redes elétricas, e 5) os impactos de sensibilidade da variação do consumo de eletricidade das TVs para uma variação de 1% na potência média devido à distorção harmônica de tensão causada pela distorção harmônica de corrente em interação com a impedância do sistema.

Os impactos econômicos foram estimados adotando-se as tarifas de eletricidade residencial, sem tributos, vigentes em 2010 (ANEEL, 2010) para as concessionárias da UF analisada, sendo os valores, respectivamente, de R$ 0,37394/kWh e R$ 0,31143/kWh.

O fluxograma para estimação dos impactos econômicos das distorções harmônicas de corrente devido ao uso massivo de pequenas cargas residenciais é mostrado na Figura 10.

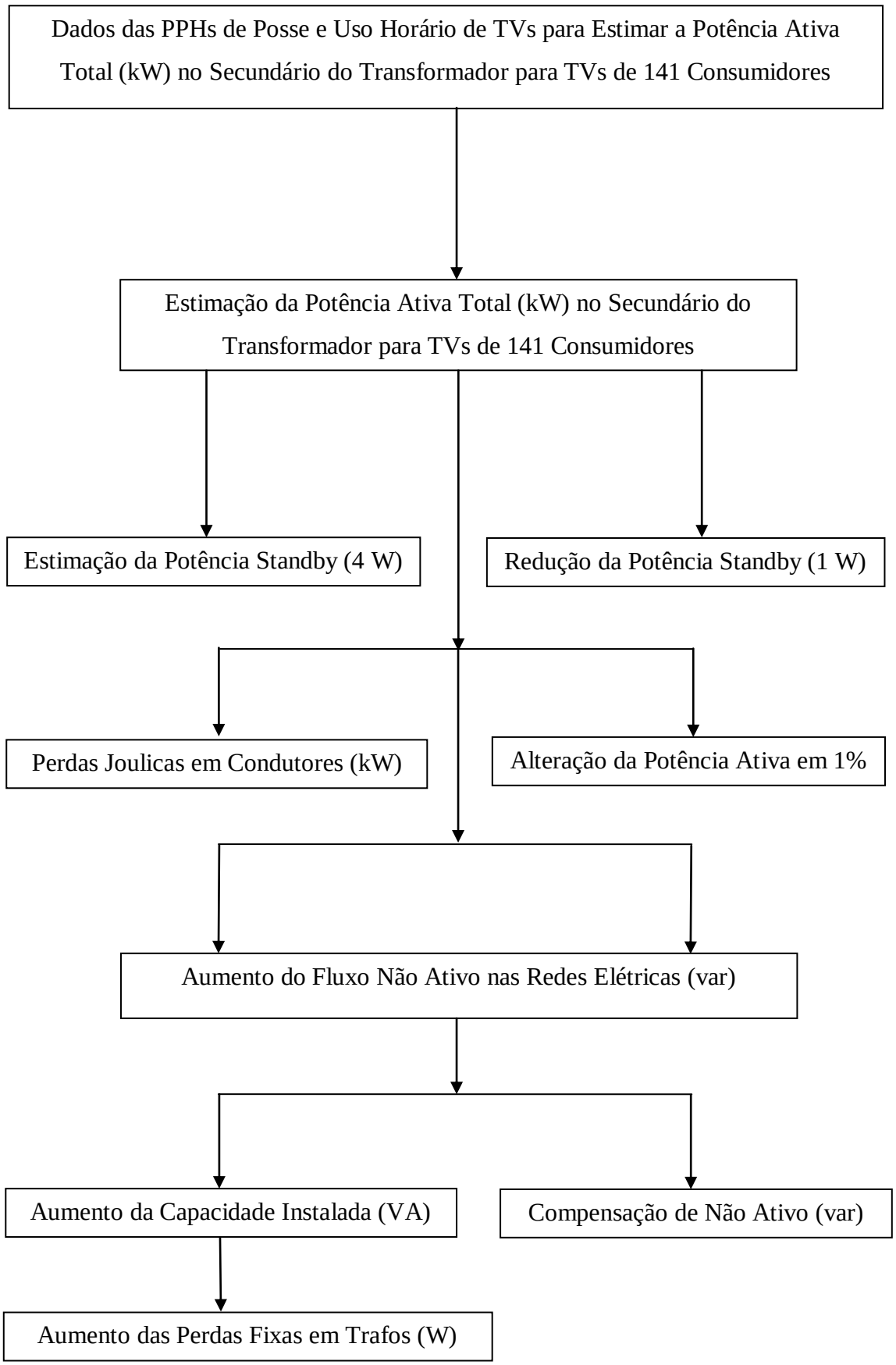


Figura 10. Fluxograma Para Estimação dos Impactos das Correntes Harmônicas.

6. 3. Estimativas de Potência Ativa Para Todos os Cenários

A Tabela 18 mostra o consumo total de eletricidade (MWh/ano) para as concessionárias A e B e também a soma para o estado analisado. Este consumo é obtido a partir do consumo total diário de eletricidade, para dias da semana, sábados e domingos, disponível nas Tabelas D.4 e D.5 do Anexo D, multiplicado, respectivamente, por 258 (duzentos e cinqüenta e oito) dias de semana, 55 (cinquenta e cinco) sábados e 52 (cinqüenta e dois) domingos, em ambas as PPHs. A estimativa do consumo de eletricidade para os demais anos intermediários foi feita considerando um crescimento linear deste consumo entre 1997 e 2005.

Tabela 18. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs (MWh/ano)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	223.507	809.904	1.033.411
1998	252.737	829.016	1.081.753
1999	281.967	848.128	1.130.095
2000	311.198	867.240	1.178.437
2001	340.428	886.352	1.226.780
2002	369.658	905.464	1.275.122
2003	398.888	924.576	1.323.464
2004	428.118	943.688	1.371.807
2005	457.349	962.800	1.420.149
1997-2005*	**3.063.850**	**7.977.167**	**11.041.017**

*MWh

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

A Figura 11 mostra graficamente a estimativa do consumo anual de eletricidade de TVs para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

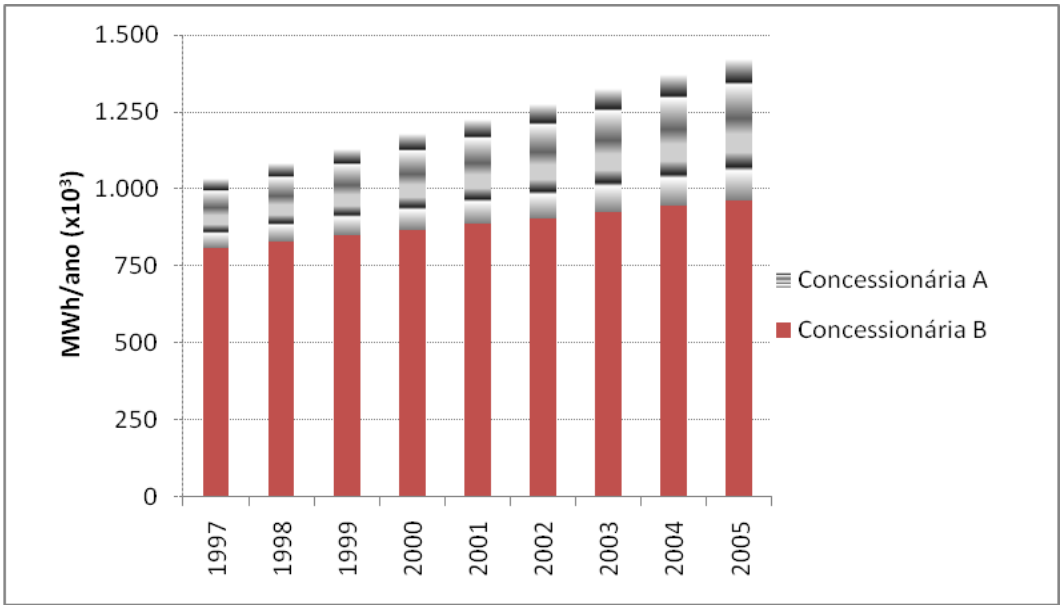


Figura 11. Estimativa do Consumo Anual de Eletricidade de TVs.

Comparando com o consumo residencial de eletricidade, para os anos de 1997 e 2005 (EPE, 2007), os valores do consumo de eletricidade de TVs passou de aproximadamente 11% em 1997 para cerca de 14% em 2005. Os impactos econômicos deste consumo de eletricidade, considerando uma tarifa residencial em 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de aproximadamente R$ 0,37394/kWh e R$ 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Impactos Econômicos (R$) do Consumo de Eletricidade de TVs (MWh/ano)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	83.578.199	252.228.273	335.806.472
1998	94.508.539	258.180.351	352.688.891
1999	105.438.880	264.132.429	369.571.309
2000	116.369.220	270.084.506	386.453.727
2001	127.299.561	276.036.584	403.336.146
2002	138.229.901	281.988.662	420.218.564
2003	149.160.242	287.940.740	437.100.982
2004	160.090.582	293.892.818	453.983.401
2005	171.020.923	299.844.895	470.865.819
1997-2005	**1.145.696.052**	**3.101.875.288**	**3.630.025.315**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

A Figura 12 mostra graficamente os impactos econômicos do consumo anual de eletricidade de TVs para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

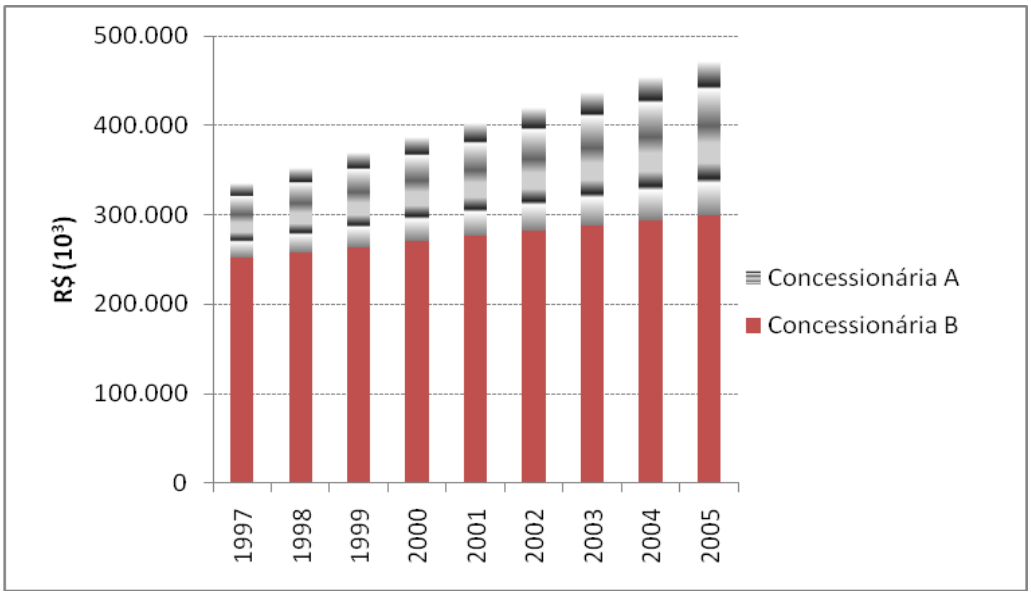


Figura 12. Impactos Econômicos do Consumo de Eletricidade de TVs.

Sendo a potência o produto da tensão pela corrente, e diante da constatação de que correntes distorcidas em interação com as impedâncias do sistema causam distorção de tensão, que por sua vez produz correntes distorcidas (RYLANDER *et al*., 2009), para se estimar a alteração no consumo anual de eletricidade devido à mudança na forma de onda de alimentação causada pelas distorções harmônicas, utilizando as Tabelas D.7 e D.8, de forma análoga à obtenção das estimativas do consumo de eletricidade de TVs (Tabela 18), foi feita uma análise de sensibilidade do consumo de eletricidade para uma variação de 1% na potência média das TVs, estando os valores apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Estimativa da Alteração no Consumo Anual de Eletricidade (MWh/ano) Devido à Variação de 1% na Potência de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	2.235	8.099	10.334
1998	2.527	8.290	10.818
1999	2.820	8.481	11.301
2000	3.112	8.672	11.784
2001	3.404	8.864	12.268
2002	3.697	9.055	12.751
2003	3.989	9.246	13.235
2004	4.281	9.437	13.718
2005	4.573	9.628	14.201
1997-2005*	**30.638**	**79.772**	**110.410**

*MWh

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

A Figura 13 mostra graficamente a alteração no consumo anual de eletricidade devido à variação de 1% na potência de TVs para o estado analisado, comparando o percentual de participação de concessionária.

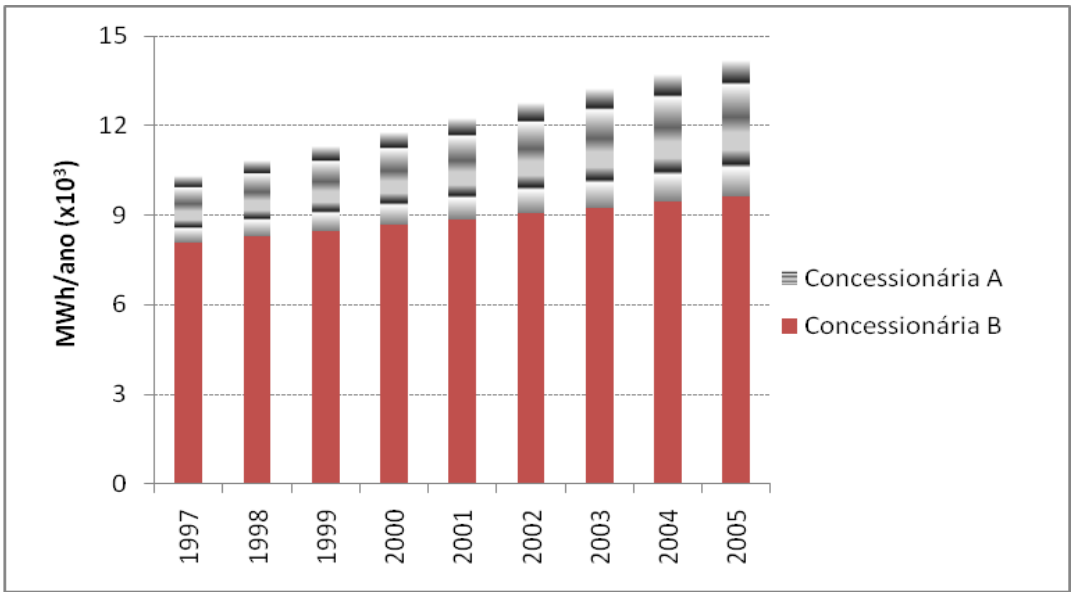


Figura 13. Estimativa do Consumo de Eletricidade Devido a Variação de 1% na Potência de TVs.

Os impactos econômicos do consumo de eletricidade devido à variação de 1% na potência de TVs, considerando uma tarifa residencial em 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de aproximadamente R$ 0,37394/kWh e R$ 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos, são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Impactos Econômicos (R$) do Consumo de Eletricidade Devido à Variação de 1% na Potência de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	891.479	2.524.631	3.416.111
1998	993.821	2.583.858	3.577.679
1999	1.096.16	2.643.085	3.739.248
2000	1.198.503	2.702.313	3.900.816
2001	1.300.844	2.761.540	4.062.384
2002	1.403.185	2.820.767	4.223.953
2003	1.505.526	2.879.994	4.385.521
2004	1.607.868	2.939.221	4.547.089
2005	1.710.209	2.998.448	4.708.658
1997-2005	**11.707.601**	**24.853.861**	**36.561.463**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005

A Figura 14 mostra graficamente os impactos econômicos da alteração do consumo anual de eletricidade devido à variação de 1% na potência de TVs para o estado analisado, comparando o percentual de participação de concessionária.

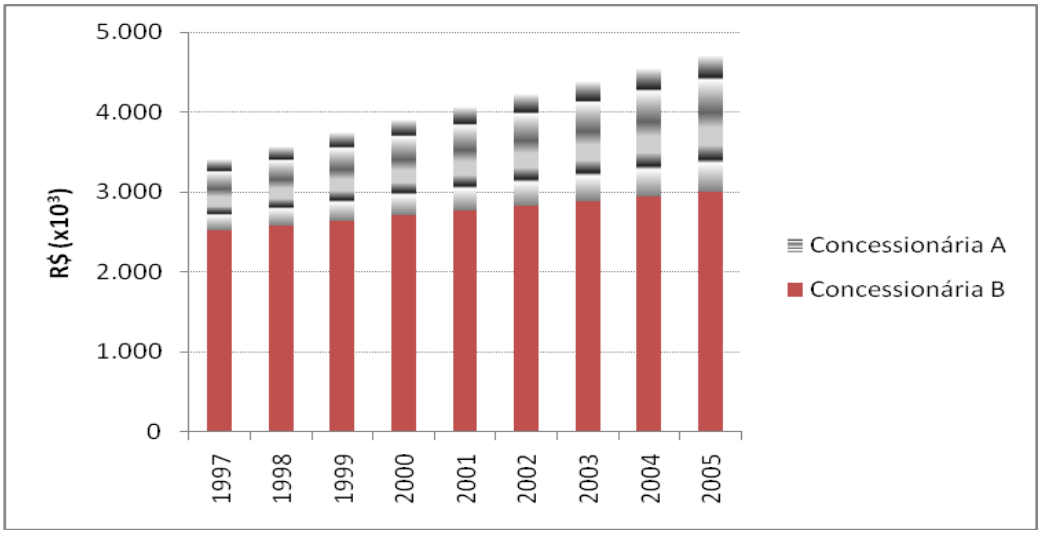


Figura 14. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs Devido à Variação de 1% na Potência.

Também de forma análoga a estimativa do consumo de eletricidade (Tabela 18), utilizando a Tabela D.10 do Anexo D, foi feita a estimativa das perdas de eletricidade devido ao uso de TVs desligadas utilizando a função *stand-by*, considerando uma potência média de 4 W neste modo de operação (MEIER e HUBER, 2009), conforme apresentada na Tabela 22.

Tabela 22. Estimativa das Perdas de Eletricidade (MWh/ano) da Função *Stand-by* de TVs (4W)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	0	0	0
1998	2.909	5.932	8.841
1999	5.819	11.863	17.682
2000	8.728	17.795	26.523
2001	11.637	23.727	35.364
2002	14.547	29.658	44.205
2003	17.456	35.590	53.046
2004	20.365	41.522	61.887
2005	23.275	47.453	70.728
1997-2005	**104.736**	**213.539**	**318.275**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

Em virtude da inexistência de dados a respeito do uso da função *standby* na PPH-1997, muito provavelmente devido ao seu uso desprezível há época, considerou-se desprezível seu uso em 1997 e, de forma análoga às estimativas das Tabelas 18 e 20, foi feito um incremento linear ao longo do período, para se estimar as perdas de eletricidade pelo uso da função *standby* de TVs. A Figura 15 mostra graficamente a estimativa do consumo anual de eletricidade de TVs desligadas em *stand-by*, considerando uma potência média de 4 W, para o estado analisado comparando o percentual de participação de cada concessionária.

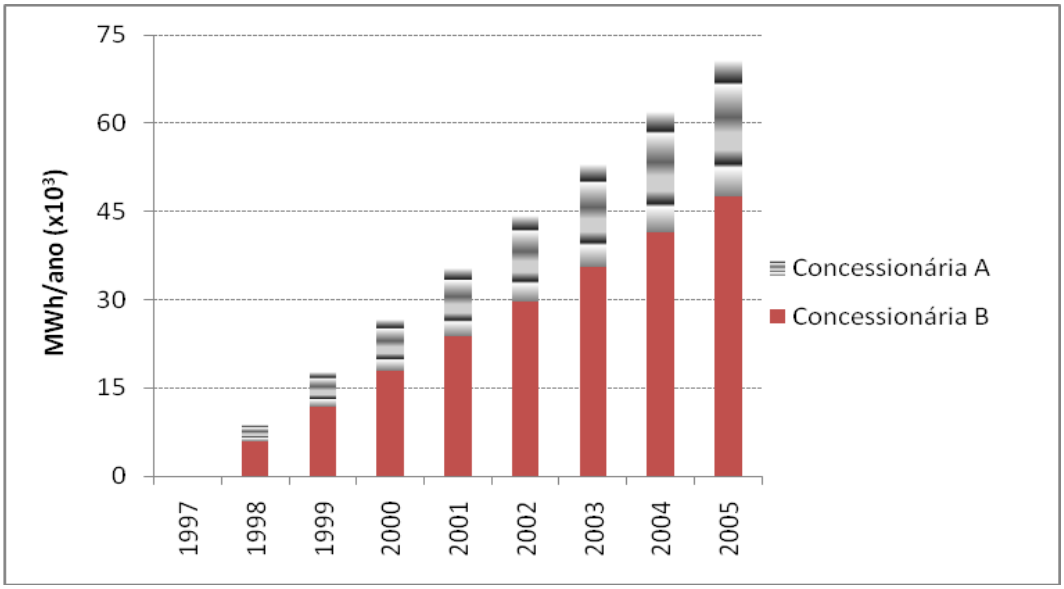


Figura 15. Estimativa do Consumo de Eletricidade de TVs Devido ao Uso da Função *Standby* (4 W).

Os valores estimativos dos impactos econômicos destas perdas de eletricidade de TVs desligadas utilizando a função *stand-by*, considerando uma tarifa residencial em 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de aproximadamente R$ 0,37394/kWh e R$ 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos, são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23. Impactos Econômicos (R$) das Perdas de Eletricidade de TVs Desligadas em *Standby* (4 W)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	0	0	0
1998	1.087.913	1.847.292	2.935.206
1999	2.175.827	3.694.585	5.870.413
2000	3.263.741	5.541.878	8.805.619
2001	4.351.654	7.389.171	11.740.826
2002	5.439.568	9.236.464	14.676.032
2003	6.527.482	11.083.757	17.611.239
2004	7.615.396	12.931.049	20.546.445
2005	8.703.309	14.778.342	23.481.652
1997-2005	**39.164.894**	**66.502.542**	**105.667.436**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005

A Figura 16 mostra graficamente os impactos econômicos do consumo anual de eletricidade de TVs desligadas em *standby*, com potência média de 4 W, para o estado analisado comparando o percentual de participação de cada concessionária.

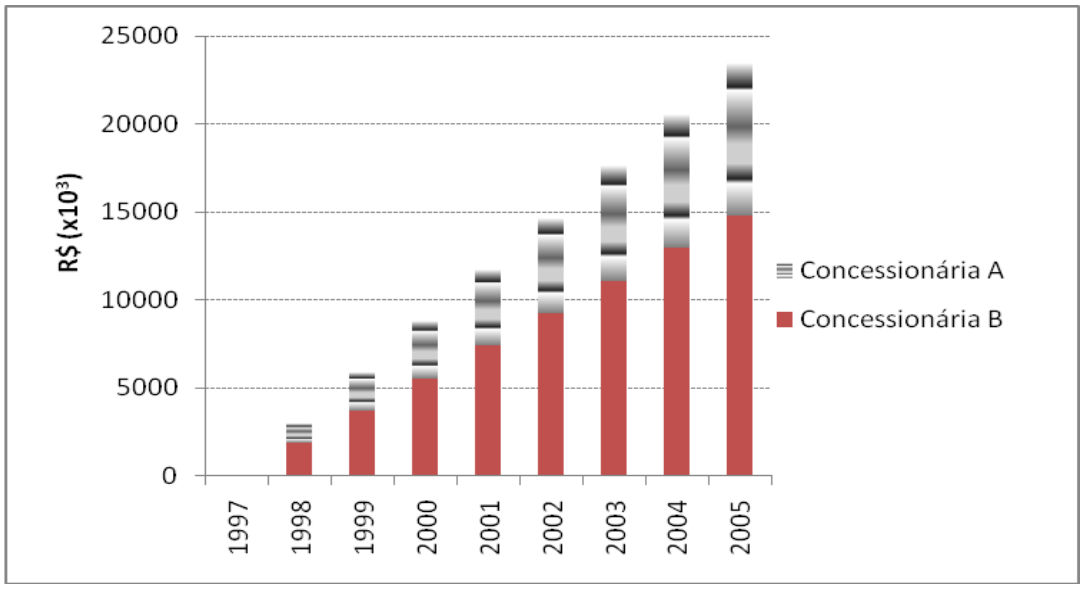


Figura 16. Impactos Econômicos do Consumo de Eletricidade de TVs Desligadas em *Standby* (4 W).

Para se avaliar os impactos da sensibilidade devido ao uso da função *standby*, também foi estimada a diminuição do consumo de eletricidade pela redução de cada 1 W da potência média por TVs neste modo de operação em 2005, considerando desprezível o uso da função *stand-by* em 1997 e fazendo um incremento linear ao longo do período, sendo os valores apresentados na Tabela 23 .

Tabela 24. Diminuição do Consumo de Eletricidade (MWh/ano) em Função da Redução de 1 W na Potência da Função *Stand-by* de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	0	0	0
1998	745	1.483	2.228
1999	1.490	2.966	4.456
2000	2.235	4.449	6.684
2001	2.981	5.932	8.912
2002	3.726	7.415	11.140
2003	4.471	8.897	13.368
2004	5.216	10.380	15.596
2005	5.961	11.863	17.824
1997-2005	**26.825**	**53.385**	**80.209**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

A Figura 17 mostra graficamente os impactos da sensibilidade do consumo anual de eletricidade pela redução de cada 1 W na potência de TVs desligadas em *stand-by*, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

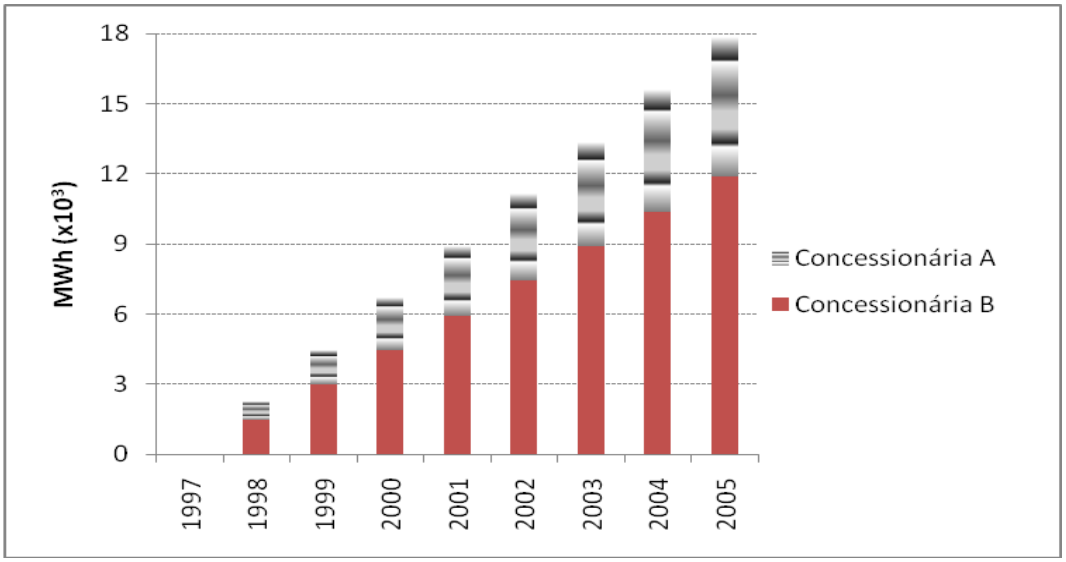


Figura 17. Diminuição do Consumo de Eletricidade Pela Redução de 1 W na Potência de TVs.

Para a estimativa dos impactos econômicos da redução do consumo de eletricidade, devido à redução de cada 1 W na potência em *standby* de TVs, foi considerada a tarifa residencial de 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de R$ 0,37394/kWh e R$ 0, 31143/kWh, isenta de taxas e impostos, sendo os valores mostrados na Tabela 25.

Tabela 25. Impactos Econômicos (R$) da Redução do Consumo de Eletricidade de TVs Devido à Redução de 1 W na Potência em *Standby* de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	0,00	0	0
1998	278.633	461.823	740.456
1999	557.267	923.646	1.480.913
2000	835.900	1.385.469	2.221.370
2001	1.114.534	1.847.292	2.961.826
2002	1.393.167	2.309.116	3.702.283
2003	1.671.801	2.770.939	4.442.740
2004	1.950.434	3.232.762	5.183.197
2005	2.229.068	3.694.585	5.923.653
1997-2005	**10.030.806**	**16.625.635**	**26.656.442**

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPH-1997/2005.

A Figura 18 mostra graficamente para o estado analisado os impactos econômicos da redução do consumo anual de eletricidade, devido a diminuição de cada 1 W da função *stand-by* de TVs desligadas neste modo de operação, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

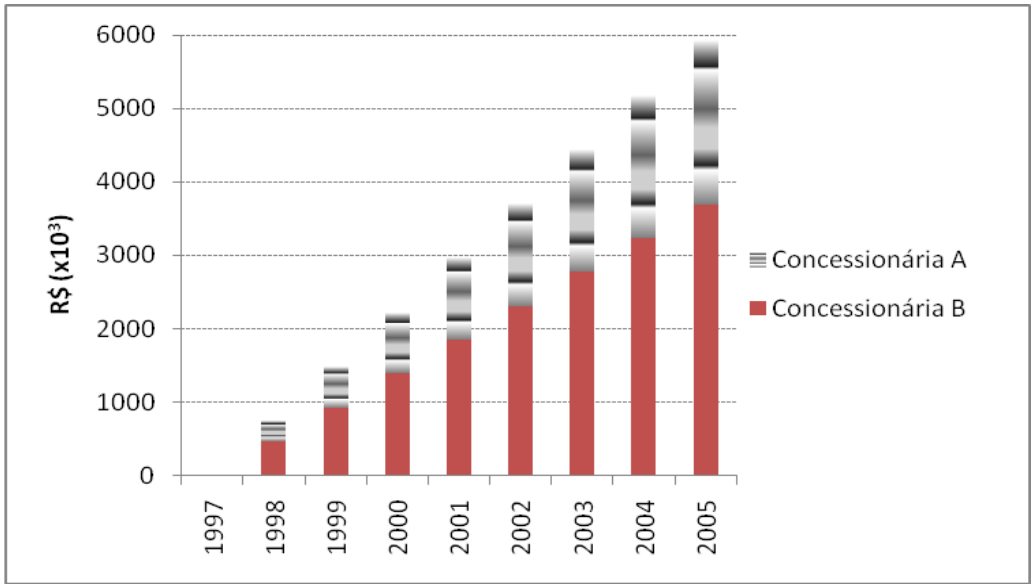


Figura 18. Impactos Econômicos da Redução o Consumo de Eletricidade de TVs em *Stand-by* Pela Variação de 1 W na Potência.

Foram estimadas as perdas nos condutores das redes elétricas do ramal de ligação e da rede interna de cada residência, utilizando-se valores médios segundo premissas das concessionárias, que são para o ramal de ligação um cabo concêntrico de cobre de 1 x (4,00 + 4,00) mm^2, e para a rede interna um fio de cobre de 1 x (2,5 + 2,5) mm^2, além de um trecho médio de 20 m tanto para a rede interna quanto para o ramal de ligação. Como num circuito monofásico existem 2 (dois) condutores, para o cálculo das estimativas o comprimento médio do circuito foi considerado como 2 (duas) vezes o comprimento médio de 20m para cada trecho (rede interna e ramal de ligação). Levando-s em conta ainda, a resistividade do cobre, ρ, igual a $2{,}03x10^{-8}$ (Ω.m) a 70º C, e as respectivas áreas circulares para os condutores de 2,5mm^2 e 4mm^2, para se estimar as perdas joulicas (I^2R) nos condutores, a resistência total (R) de cada trecho é obtida pela Equação 13:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (13)$$

onde:

ρ - resistividade do condutor (Ω.m);

l – comprimento do trecho (m);

A – área circular do condutor (m^2).

As perdas adicionais nestes condutores foram estimadas com base em (KEY e LAI, 1996), e levando-se em conta a redução da distorção harmônica da corrente elétrica devido à interação com outras cargas no circuito (MANSOOR *et al.*, 1995). Considerando a abordagem dada por (LAI e KEY, 1997), as perdas em condutores (I^2R) foram estimadas pela diferença entre uma corrente eficaz para 50% da THD_i das TVs, em torno de 120% (LOSADA y GONZALEZ, 2006; GALHARDO e PINHO, 2003), e a corrente eficaz com THD_i nula. Neste caso, de acordo com a Equação 11, para uma THD_i de 60% no condutor (50% da THD_i das TVs), a corrente eficaz total (I) em relação à corrente fundamental (I_1) é aproximadamente 16% superior à I_1. A partir dos cálculos efetuados nas Tabelas G3 a G11 do Anexo G, a Tabela 26 mostra as perdas adicionais devido às distorções harmônicas de corrente nos condutores da rede interna e do ramal de ligação para as concessionárias A e B, assim como o total para o estado analisado

Tabela 26. Perdas em Condutores (MWh/ano) Devido às Distorções Harmônicas de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	167	831	998
1998	180	838	1.018
1999	220	859	1.080
2000	249	837	1.087
2001	264	925	1.189
2002	293	889	1.183
2003	321	914	1.236
2004	365	929	1.294
2005	404	943	1.347
1997-2005	**2.465**	**7.968**	**10.433**

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 19 mostra graficamente os impactos das perdas adicionais em condutores devido às distorções harmônicas de corrente para o estado analisado, comparando o percentual de participação das TVs de cada concessionária.

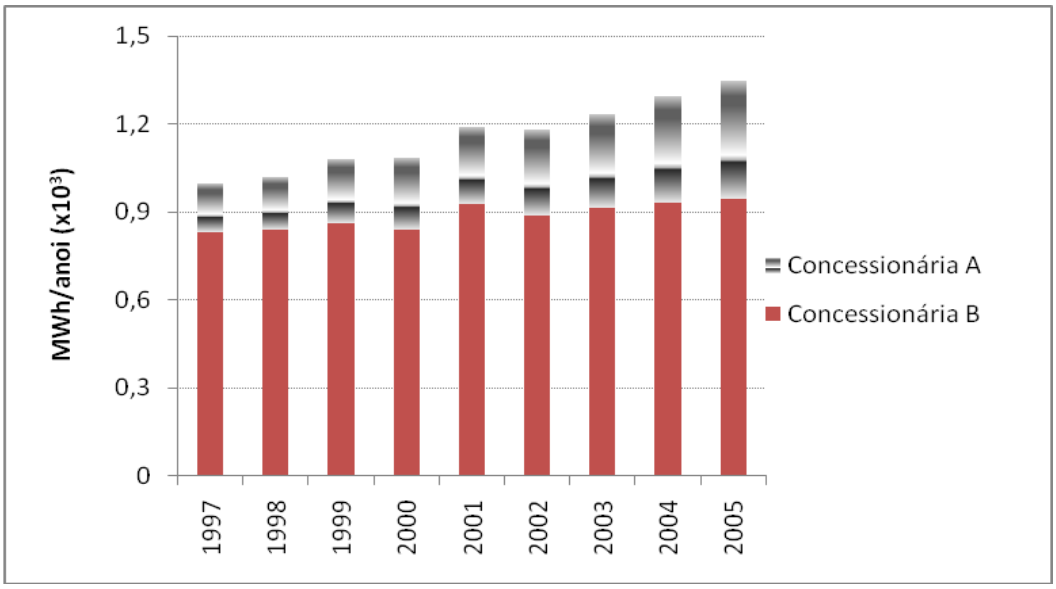


Figura 19. Perdas Adicionais em Condutores Devido às Distorções Harmônicas de Corrente.

Os impactos econômicos das perdas em condutores são mostrados na Tabela 27, em que foi considerada a tarifa residencial de 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de R$ 0,37394/kWh e R$ 0, 31143/kWh, isenta de taxas e impostos.

Tabela 27. Impactos Econômicos (R$) Devido as Perdas nos Condutores

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	62.510	258.807	321.317
1998	67.185	261.053	328.238
1999	82.596	267.545	350.141
2000	93.056	260.936	353.992
2001	98.581	288.251	386.832
2002	109.683	277.096	386.779
2003	120.147	284.919	405.066
2004	136.634	289.311	425.945
2005	151.240	293.632	444.873
1997-2005	**921.633**	**2.481.549**	**3.403.183**

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 20 mostra graficamente os impactos econômicos das perdas adicionais em condutores devido às distorções harmônicas de corrente para o estado analisado, comparando o percentual de participação de concessionária.

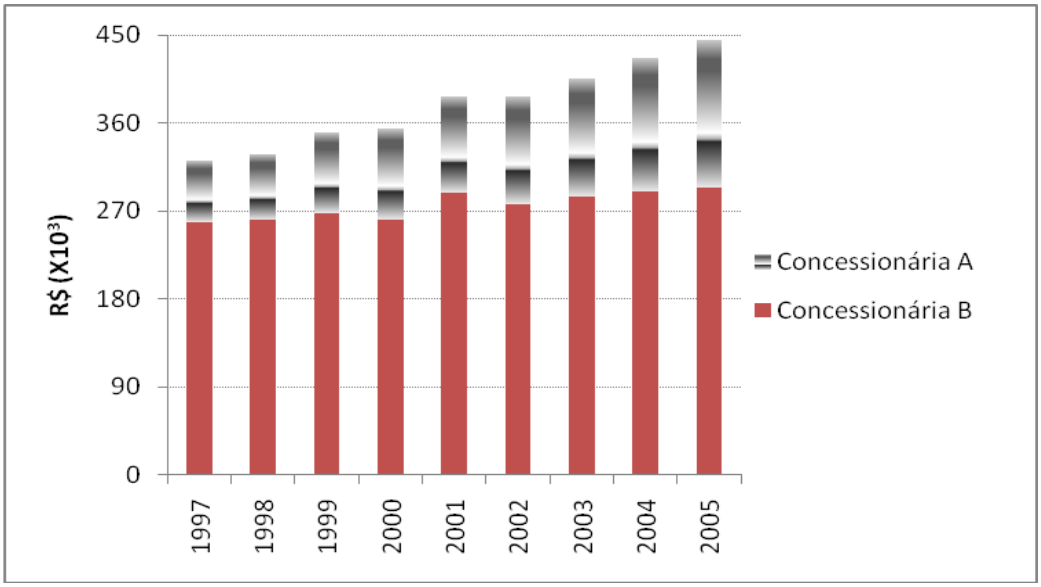


Figura 20. Impactos Econômicos das Perdas Adicionais em Condutores Devido às Distorções Harmônicas de Corrente.

6. 4. Estimativas para o Cenário Referência

Para o Cenário referência foi considerada uma THD_i de 5% em 1997 e 12% em 2005 no secundário do transformador de distribuição de redes tipicamente residenciais.

6.4.1 Aumento da Capacidade Instalada

Como pode se verificar na Tabela 11, quando a THD_i aumenta, a corrente total, aumenta e o fator de potência diminui, requerendo uma maior capacidade instalada a ser disponibilizado pelo sistema elétrico de potência. A estimação da capacidade instalada é determinada pelo máximo valor da potência aparente, considerado em torno das 20 horas dos dias de semana. As estimativas foram feitas para os anos de 1997 e 2005, sendo feita uma interpolação linear para os demais anos ao longo do período. A Tabela 28 mostra o incremento da capacidade instalada de transformadores para TVs com 120% de THD_i comparada à situação com THD_i nula nas TVs.

Tabela 28. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA)

	Concessionária A	Concessionária B	Estado
THD_i	120% - 0%	120% - 0%	120% - 0%
1997	91	324	416
2005	1126	2.406	3.532
1997-2005	**1.035**	**2.081**	**3.116**

Fonte: Elaboração Própria.

Os impactos econômicos (R$) do aumento da capacidade instalada foram estimados fazendo-se a subtração da diferença entre o aumento da capacidade instalada com 120% de THD_i para as TVs e o aumento da capacidade instalada com THD_i nula, de acordo com premissas das concessionárias, de um custo total de 130/kVA para instalação de transformador de potência. A Figura 21 mostra graficamente as estimativas do aumento da capacidade instalada para o estado analisado, comparando o

percentual de participação de cada concessionária, para as PPHs-1997/2005 e a diferença entre estas pesquisas, devido às distorções harmônicas de corrente.

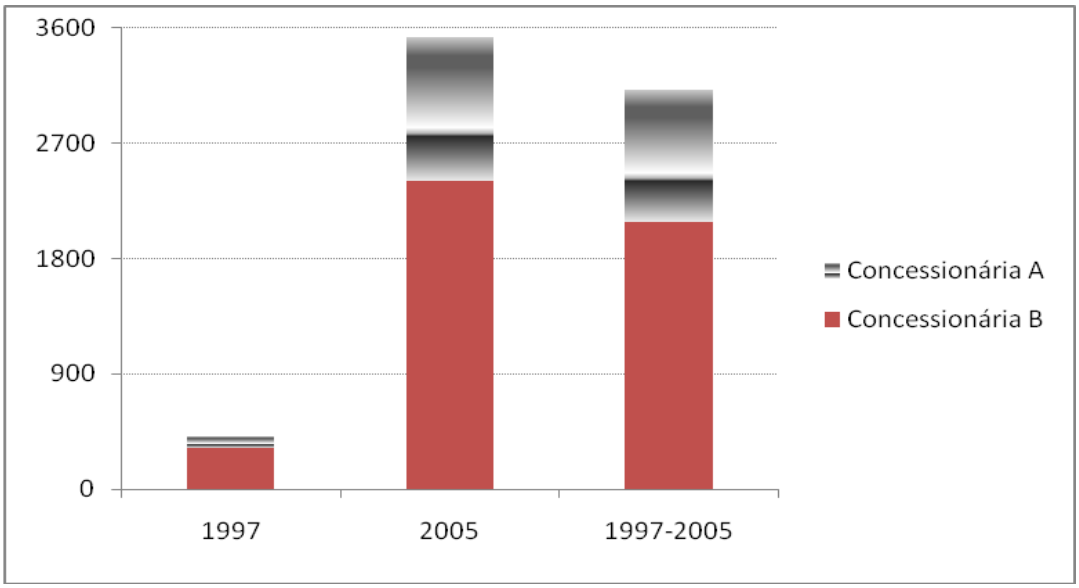


Figura 21. Aumento da Capacidade Instalada (kVA) Devido às Distorções Harmônicas.

Na Tabela 29 são apresentados os impactos econômicos do aumento da capacidade instalada para ambas as concessionárias e para o estado avaliado.

Tabela 29. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	11.877	42.169	54.045
2005	146.380	312.743	459.122
1997-2005	**134.503**	**270.574**	**405.077**

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 22 mostra graficamente as estimativas para o aumento da capacidade instalada devido às distorções harmônicas de corrente para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

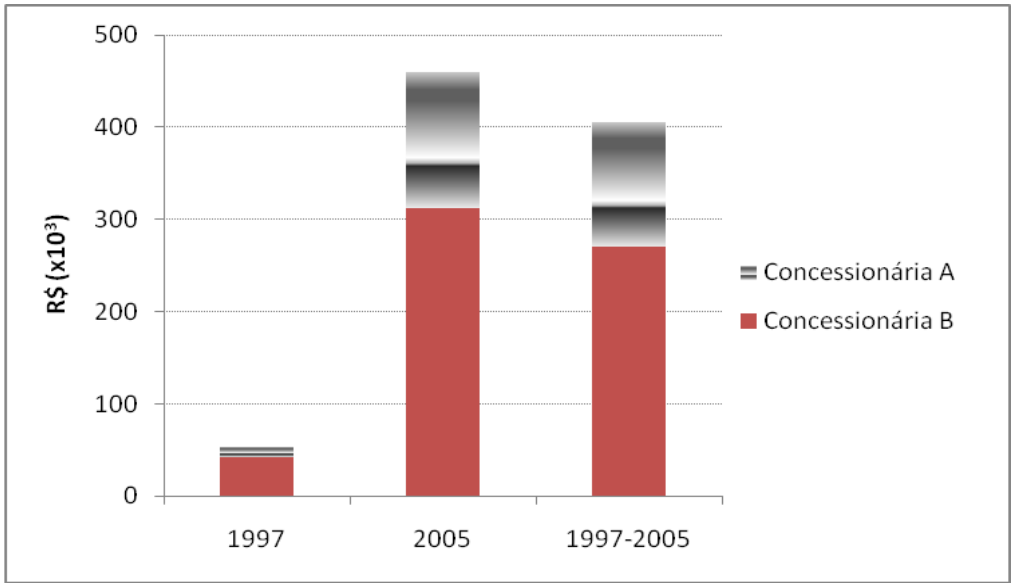


Figura 22. Impactos Econômicos do Aumento da Capacidade Instalada.

O aumento da capacidade instalada total é obtido pela diferença entre os aumentos das capacidades instaladas na PPH-2005 e PPH-1997.

6.4.2 Aumento das Perdas Fixas de Transformadores Adicionais

O aumento da capacidade instalada acarreta a adição de outros transformadores ao sistema de potência, que têm um consumo próprio devido às correntes de magnetização, resultando em maiores perdas fixas que representam cerca de 0,3% da potência nominal do transformador (WEG, 2009). Assim, para as unidades adicionais equivalentes em kVA, foram estimadas as perdas fixas por consumo próprio dos transformadores, durante 24 horas por dia ao longo dos 365 dias do ano, para o período de realização das PPHs, sendo feita uma interpolação linear para os demais anos, em que os valores são mostrados na Tabela 30.

Tabela 30. – Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	2.699	9.584	12.284
1998	6.890	18.061	24.951
1999	11.081	26.538	37.619
2000	15.272	35.014	50.286
2001	19.463	43.491	62.954
2002	23.654	51.967	75.621
2003	27.844	60.444	88.288
2004	32.035	68.921	100.956
2005	36.226	77.397	113.623
1997-2005	**175.164**	**391.417**	**566.582**

*kWh

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 23 mostra graficamente o aumento das perdas fixas em transformadores adicionais para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido ao aumento da capacidade instalada.

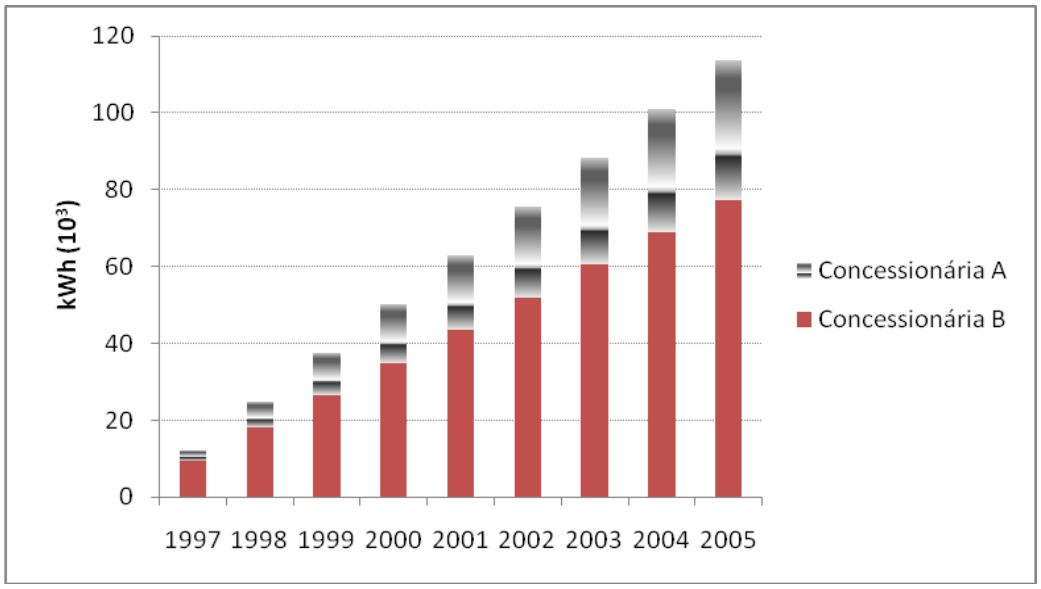


Figura 23. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição.

Para se estimar os impactos econômicos das perdas fixas devido aos transformadores adicionais em virtude do aumento da capacidade instalada, foi considerada a tarifa residencial de 2010 para as respectivas concessionárias A e B, de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos. Os valores dos impactos econômicos são mostrados na Tabela 31.

Tabela 31. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	1.009	2.985	3.994
1998	2.577	5.625	8.201
1999	4.144	8.265	12.408
2000	5.711	10.904	16.615
2001	7.278	13.544	20.822
2002	8.845	16.184	25.029
2003	10.412	18.824	29.236
2004	11.979	21.464	33.443
2005	13.546	24.104	37.650
1997-2005*	**65.501**	**121.899**	**187.400**

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 24 mostra graficamente os impactos econômicos das perdas fixas adicionais em transformadores de distribuição para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

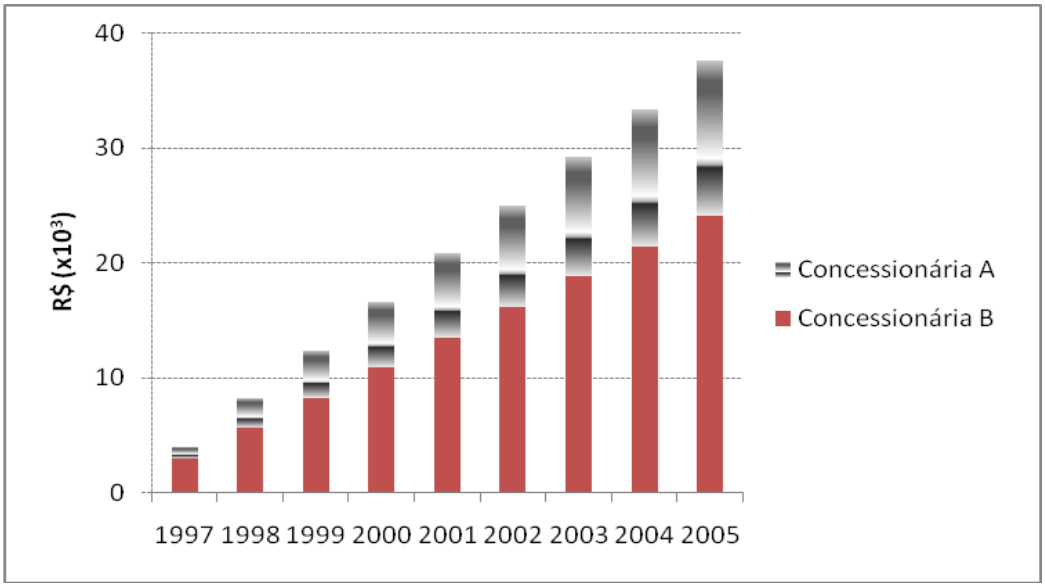


Figura 24. Impactos Econômicos do Aumento das Perdas Fixas em Transformadores Adicionais.

O impacto econômico total do aumento das perdas fixas em transformadores, de aproximadamente R$ 187.400 (cento e oitenta e sete mil e quatrocentos reais), é obtido pela soma dos valores ao longo dos anos.

6.4.3. Aumento do Fluxo da Energia Não Ativa e Correção do Fator de Potência

Pode se verificar na Tabela 5 que as cargas com dispositivos de eletrônica de potência têm fator de potência de deslocamento praticamente unitário, mas um baixo fator de potência de distorção, resultando num baixo fator de potência total. Este baixo valor de potência total, causado pelas distorções harmônicas, provoca um aumento do fluxo de energia não ativa circulando no sistema elétrico de potência. Dessa forma, foi estimado o incremento do fluxo da energia não ativa no secundário do transformador devido às distorções harmônicas de corrente. De forma similar a estimativa da energia ativa anual, a energia não ativa equivalente das TVs é estimada a partir das potências não ativas dadas nas Tabelas F3 e F4 do Anexo F. A Tabela 32 mostra as estimativas para energia não ativa na rede de distribuição até o secundário do transformador.

Tabela. 32. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs.

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	10.706	39.710	50.415
1998	16.545	50.047	66.592
1999	22.384	60.384	82.768
2000	28.223	70.722	98.945
2001	34.062	81.060	115.121
2002	39.901	91.397	131.298
2003	45.740	101.734	147.474
2004	51.579	112.072	163.651
2005	57.418	122.409	179.827
1997-2005*	306.556	729.535	1.036.092

*Mvar

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 25 mostra graficamente os impactos do maior fluxo de energia não ativa nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

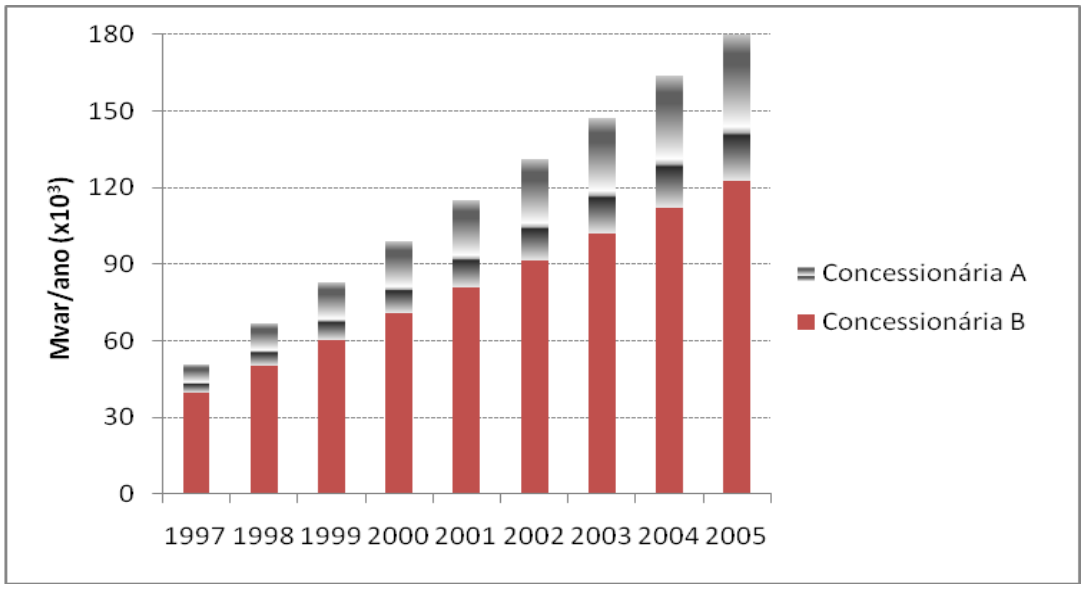


Figura 25. Impactos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa.

Os impactos econômicos são estimados como perdas de faturamento pela ocupação do sistema devido à circulação de energia não ativa que poderia ser comercializada como energia ativa, considerando-se, neste caso, 1/3 do valor médio da tarifa residencial para cada concessionária, respectivamente de 0,37/kWh e 0,31/kWh, para as concessionárias A e B, sem tributos ou impostos, que é o percentual que cabe à distribuição, quando se consideram as parcelas de geração de energia, transmissão, distribuição e encargos setoriais, conforme se depreende das faturas de eletricidade para as concessionárias da UF sob análise. Os valores são apresentados na Tabela 33.

Tabela. 33. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	1.409.108	4.084.601	5.493.969
1998	2.118.644	5.146.780	7.265.424
1999	2.828.179	6.208.701	9.036.880
2000	3.537.714	7.270.622	10.808.336
2001	4.247.249	8.332.542	12.579.791
2002	4.956.784	9.394.463	14.351.247
2003	5.666.319	10.456.384	16.122.703
2004	6.375.854	11.518.304	17.894.158
2005	7.085.389	12.580.224	19.665.614
1997-2005	38.225.241	74.992.880	113.218.121

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 26 mostra graficamente os impactos econômicos do aumento do fluxo de energia não ativa para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

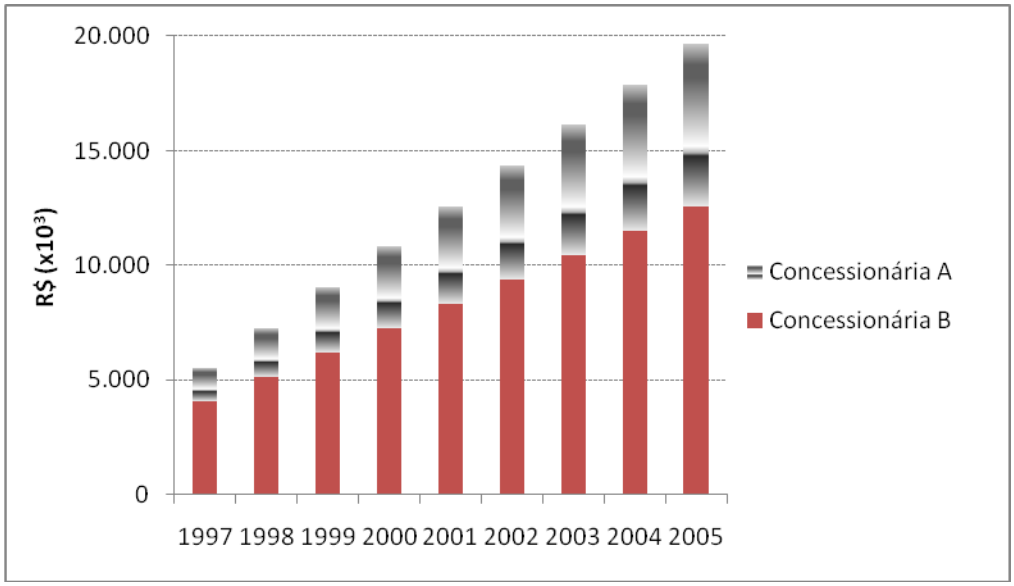


Figura 26. Impactos Econômicos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa.

Dada a existência de um maior fluxo de energia não ativa, há a necessidade do aumento de unidades para correção do fator de potência. A estimação desta correção do fator de potência considera o horário da máxima potência não ativa, o que ocorre por volta das 20 horas, e uma DHT_i de TVs de 120%. Como o fluxo de energia não ativa equivalente no sistema de distribuição é provocada pelas distorções harmônicas de TVs, esta compensação deve ser adequadamente implementada pela aplicação de filtros ativos (POMÍLIO e DECKMANN, 2007).

Tabela 34. Correção do Fator de Potência (kvar)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	3.680	13.067	16.747
2005	19.064	40.731	59.796

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 27 mostra graficamente os impactos da correção do fator de potência pela implementação de filtros ativos nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

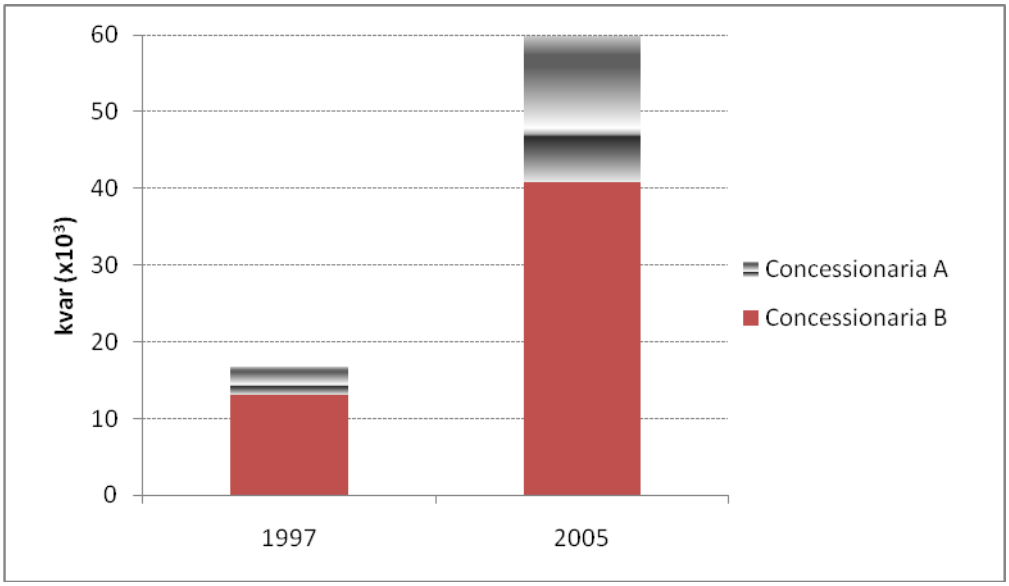


Figura 27. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos.

Para se estimar os impactos econômicos da correção do fator de potência em virtude das distorções harmônicas foi considerado o custo de R$ 220[37]/kvar para a instalação de filtros ativos (ANEEL, 2007). Os valores são mostrados na Tabela 35.

Tabela 35. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	809.621	2.874.646	3.684.267
2005	4.194.176	8.960.907	13.155.083

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 28 mostra graficamente os impactos econômicos da correção do fator de potência pela implementação de filtros ativos para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

[37] O valor informado pela referência foi de US$ 110/kVA, que foi convertido para a moeda nacional a um câmbio de US$ 1 equivalente a R$ 2.

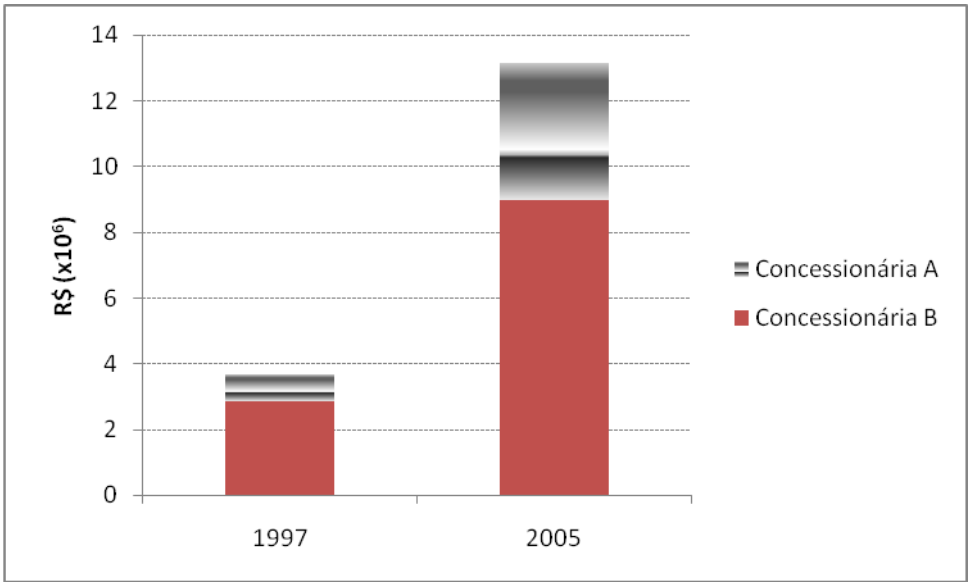


Figura 28. Impactos Econômicos da Correção do Fator de Potência.

As estimativas das potências dos filtros ativos, bem como de seus impactos econômicos, consideram apenas a correção do fator de potência de distorção por ter sido desconsiderado o fator de potência de deslocamento das TVs.

6. 5. Estimativas para o Cenário Alternativo Baixa DHTi

Para o Cenário Alternativo Baixa THD_i serão adotadas as mesmas premissas do Cenário Referência, considerando, neste caso, apenas a alteração da THD_i no secundário do transformador de distribuição para 1% em 1997 e 8% em 2005.

6.5.1 Aumento da Capacidade Instalada

A Tabela 36 mostra o incremento da capacidade instalada de transformadores comparada à situação com THD_i nula nas TVs.

Tabela 36. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA)

	Concessionária A	Concessionária B	Estado
THD_i	120% - 0%	120% - 0%	120% - 0%
1997	4	13	17
2005	466	995	1.461
1997-2005	462	982	1.444

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 29 mostra graficamente as estimativas para o aumento da capacidade instalada, devido às distorções harmônicas de corrente, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

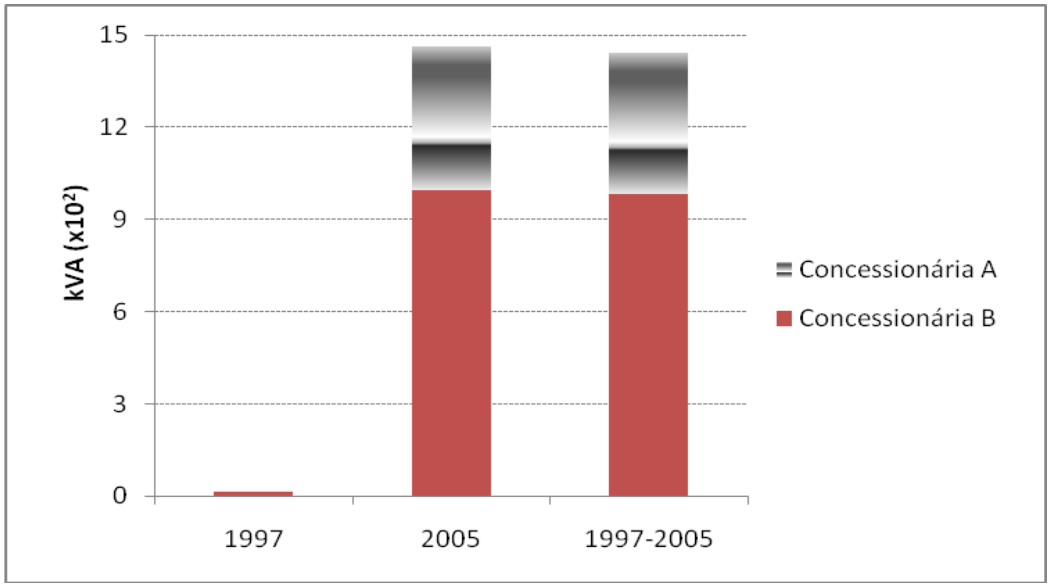


Figura 29. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada.

Na Tabela 37 são apresentados os impactos econômicos do aumento da capacidade instalada, para uma THD_i de 1% em 1997 e 8% em 2005, no secundário do transformador, considerando as informações das concessionárias A e B, de um custo total da instalação de um transformador em torno de R$ 130/kVA, valores totais para ambas as concessionárias e para o estado avaliado.

Tabela 37. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	475	1.688	2.163
2005	60.520	129.301	189.822
1997-2005	60.045	127.614	187.658

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 30 mostra graficamente as estimativas dos impactos econômicos devido ao aumento da capacidade instalada devido às distorções harmônicas de corrente para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

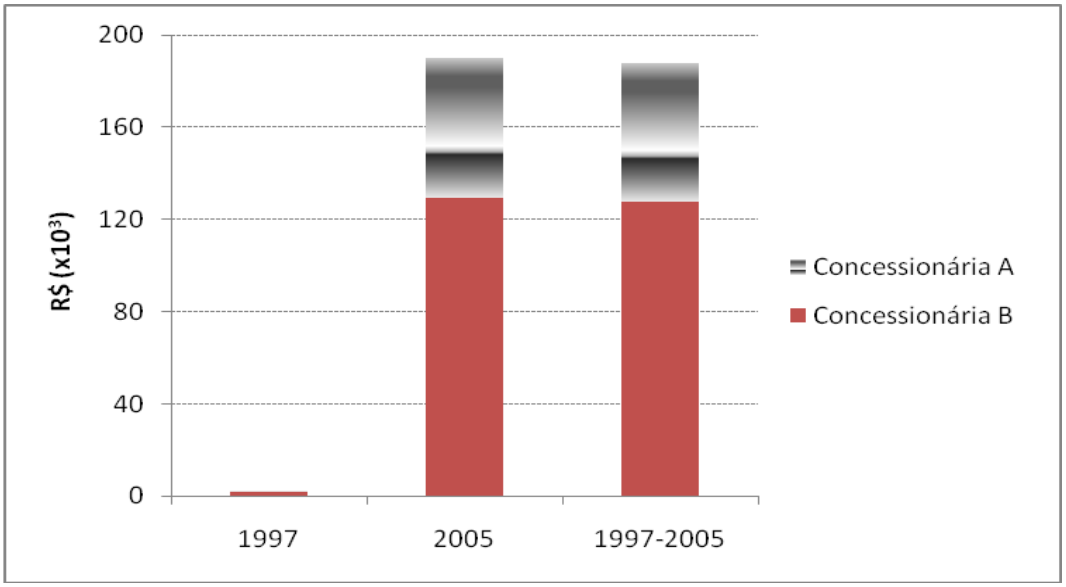


Figura 30. Impactos Econômicos do Aumento da Capacidade Instalada.

O aumento da capacidade instalada total é obtido pela diferença entre os aumentos das capacidades instaladas na PPH-2005 e PPH-1997.

6.5.2. Aumento das Perdas Fixas de Transformadores Adicionais

A Tabela 38 mostra as perdas fixas adicionais em transformadores, em torno de 3% de sua potência nominal (WEG, 2009), submetidos a uma DHT_i de 1% em 1997 e 8% em 2005.

Tabela 38. – Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	107	379	486
1998	1.791	3.958	5.749
1999	3.475	7.538	11.013
2000	5.159	11.117	16.276
2001	6.843	14.696	21.539
2002	8.528	18.276	26.803
2003	10.212	21.855	32.067
2004	11.896	25.435	37.331
2005	13.580	29.014	42.594
1997-2005*	61.590	132.268	193.858

*kWh

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 31 mostra graficamente o aumento das perdas fixas em transformadores adicionais, devido ao aumento da capacidade instalada, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

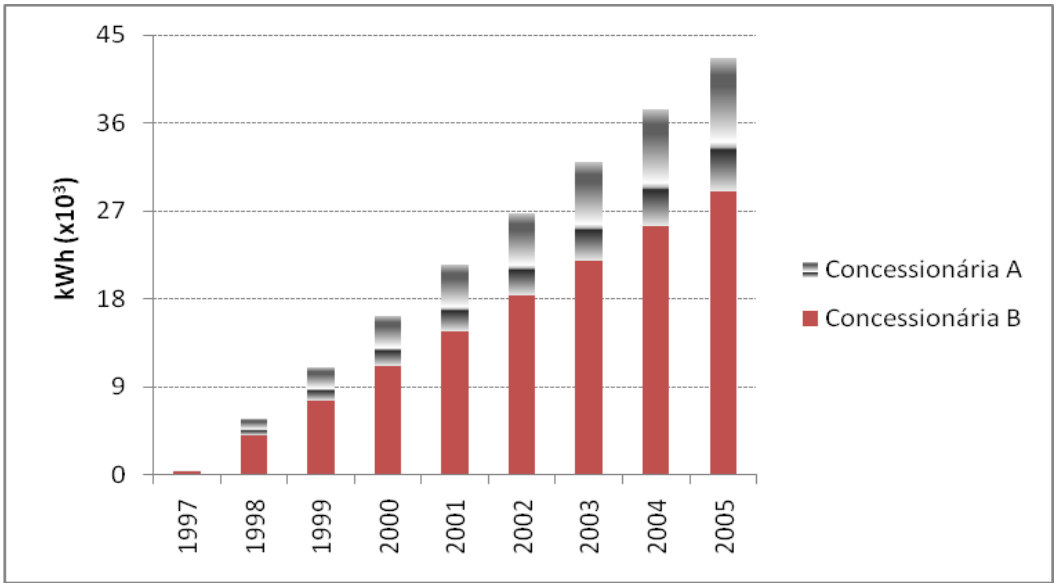


Figura 31. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição.

Os valores dos impactos econômicos, considerando uma tarifa residencial de eletricidade para as concessionárias A e B, respectivamente, de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos, são mostrados na Tabela 39.

Tabela 39. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	40	118	158
1998	670	1.233	1.902
1999	1.299	2.347	3.647
2000	1.929	3.462	5.391
2001	2.559	4.577	7.136
2002	3.189	5.692	8.880
2003	3.819	6.806	10.625
2004	4.448	7.921	12.369
2005	5.078	9.036	14.114
1997-2005	23.031	41.192	64.223

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 32 mostra graficamente os impactos econômicos do aumento das perdas fixas em transformadores adicionais de distribuição, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

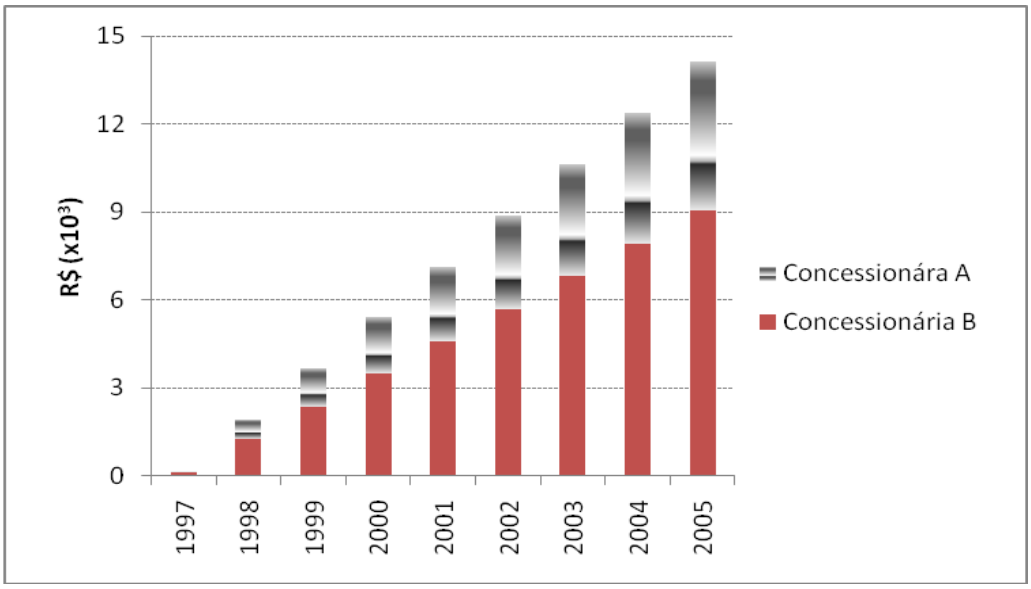


Figura 32. Impactos Econômicos Devido ao Aumento das Perdas Fixas em Transformadores Adicionais.

O impacto econômico total do aumento das perdas fixas em transformadores, de aproximadamente R$ 64.223 (sessenta e quatro mil e duzentos e vinte e três reais), é obtido pela soma dos valores ao longo dos anos.

6.5.3. Aumento do Fluxo da Energia Não Ativa e Correção do Fator de Potência

A Tabela 40 mostra as estimativas do fluxo de energia reativa nas redes de distribuição para uma THD_i de 1% em 1997 e 8% em 2005.

Tabela. 40. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs.

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	2.127	7.891	10.019
1998	6.250	16.261	22.511
1999	10.372	24.630	35.003
2000	14.495	33.000	47.495
2001	18.618	41.370	59.987
2002	22.741	49.739	72.480
2003	26.863	58.109	84.972
2004	30.986	66.478	97.464
2005	35.109	74.848	109.956
1997-2005	167.562	372.325	539.887

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 33 mostra graficamente os impactos do maior fluxo de energia não ativa nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

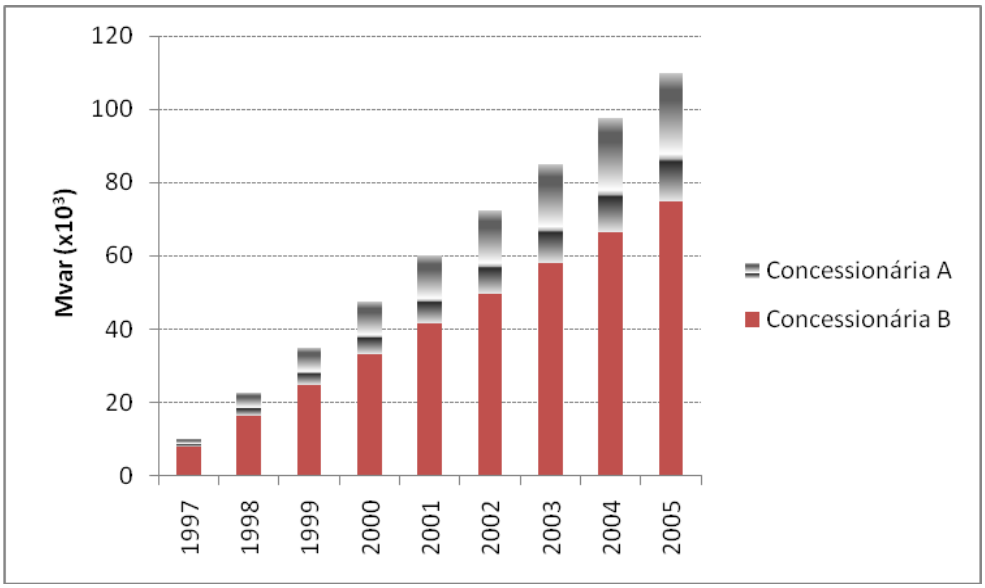


Figura 33. Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa nas Redes Elétricas.

A Tabela 41 mostra as estimativas dos impactos da comercialização de energia não ativa como ativa, considerando os valores de 1/3 do valor médio da tarifa residencial para cada concessionária, respectivamente de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, para as concessionárias A e B, sem tributos ou impostos.

41. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	280.022	811.755	1.091.777
1998	786.569	1.671.816	2.458.385
1999	1.293.116	2.531.877	3.824.993
2000	1.799.663	3.391.938	5.191.600
2001	2.306.210	4.251.998	6.558.208
2002	2.812.756	5.112.059	7.924.816
2003	3.319.303	5.972.120	9.291.423
2004	3.825.850	6.832.181	10.658.031
2005	4.332.397	7.692.242	12.024.639
1997-2005	20.755.886	38.267.986	59.023.873

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 34 mostra graficamente os impactos do maior fluxo de energia não ativa nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

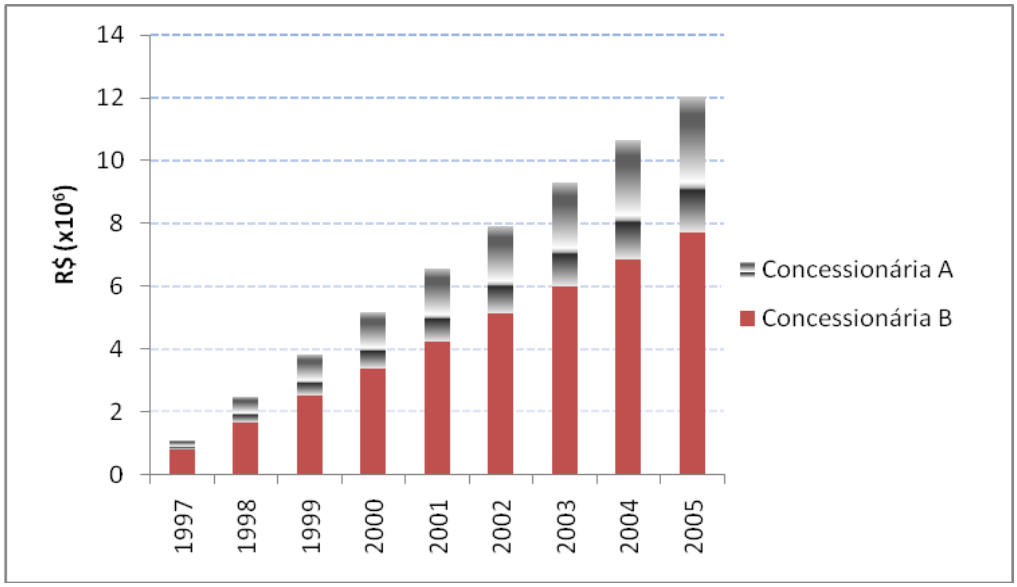


Figura 34. Impactos Econômicos do Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa.

A Tabela 42 mostra os impactos para correção do fator de potência (kvar), para uma DHT_i de 1% em 1997 e 8% em 2005.

Tabela 42. Correção do Fator de Potência (kvar)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	731	2.597	3.328
2005	11.657	24.905	36.562

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 35 mostra graficamente os impactos da correção do fator de potência pela implementação de filtros ativos nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

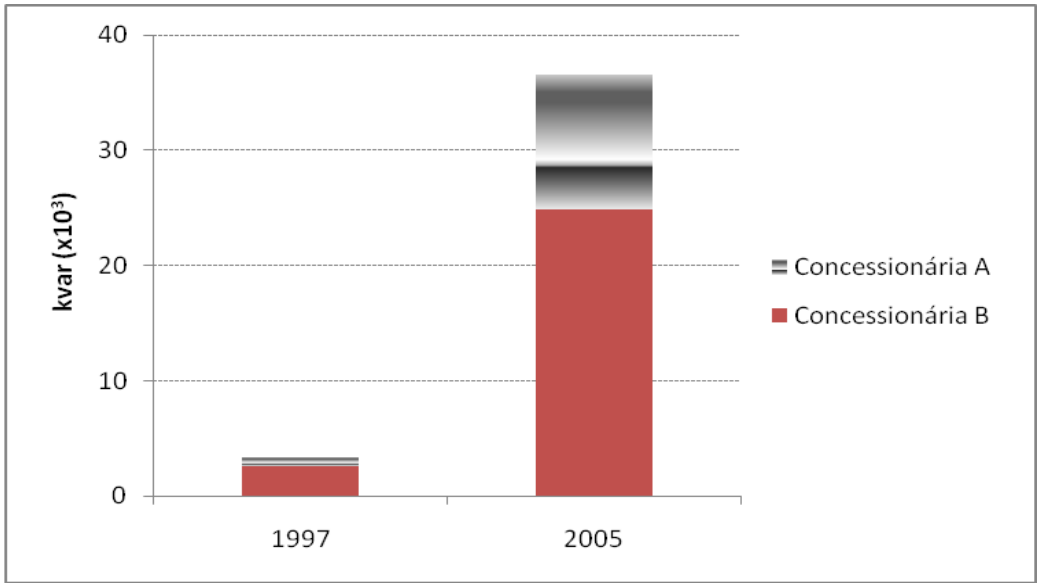


Figura 35. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos.

Na Tabela 43 são apresentados os impactos econômicos da correção do fator de potência em virtude das distorções harmônicas, considerando um custo de R$ 220[38]/kvar para a instalação de filtros ativos (ANEEL, 2007).

Tabela 43. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	160.890	571.258	732.148
2005	2.564.550	5.479.199	8.043.742

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 28 mostra graficamente os impactos econômicos da correção do fator de potência pela implementação de filtros ativos para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

[38] O valor informado pela referência foi de US$ 110/kVA, que foi convertido para a moeda nacional a um câmbio de US$ 1equivalente a R$ 2.

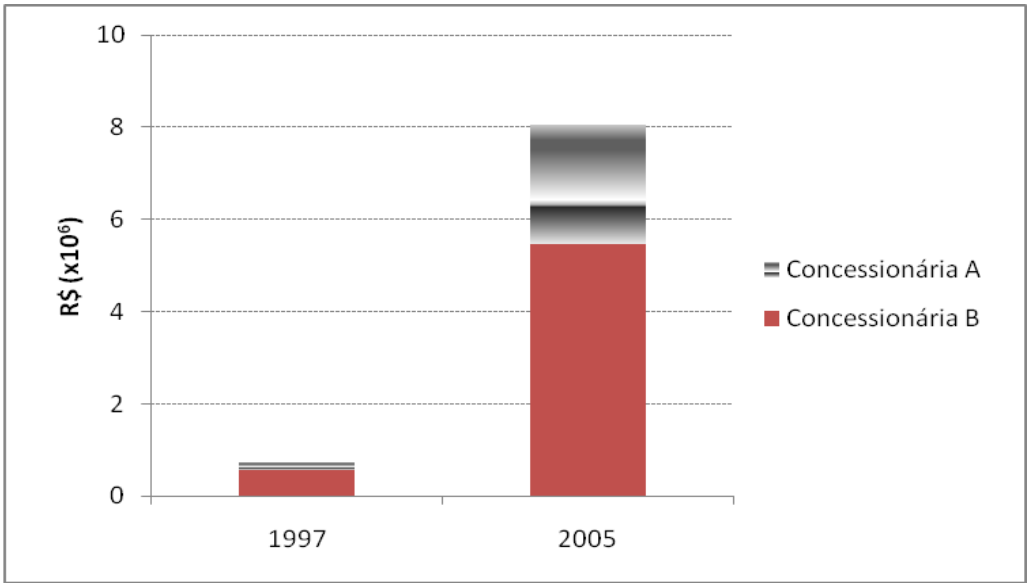


Figura 36. Impactos Econômicos da Correção do Fator de Potência.

As estimativas das potências dos filtros ativos, bem como de seus impactos econômicos, consideram apenas a correção do fator de potência de distorção por ter sido desconsiderado o fator de potência de deslocamento das TVs.

6. 6. Estimativas para o Cenário Alternativo Alta DHT_i

Para o Cenário Alternativo Alta THD_i serão adotadas as mesmas premissas do Cenário Referência, considerando, neste caso, apenas a alteração da THD_i no secundário do transformador de distribuição de 13% em 1997 e 20% em 2005.

6.6.1 Aumento da Capacidade Instalada

A Tabela 44 mostra o incremento da capacidade instalada de transformadores comparada à situação com THD_i nula nas TVs.

Tabela 44. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada (kVA)

	Concessionária A	Concessionária B	Estado
THD_i	120% - 0%	120% - 0%	120% - 0%
1997	565	2.007	2.572
2005	2.886	6.165	9.051
1997-2005	2.321	4.159	6.479

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 37 mostra graficamente as estimativas para o aumento da capacidade instalada, devido às distorções harmônicas de corrente, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

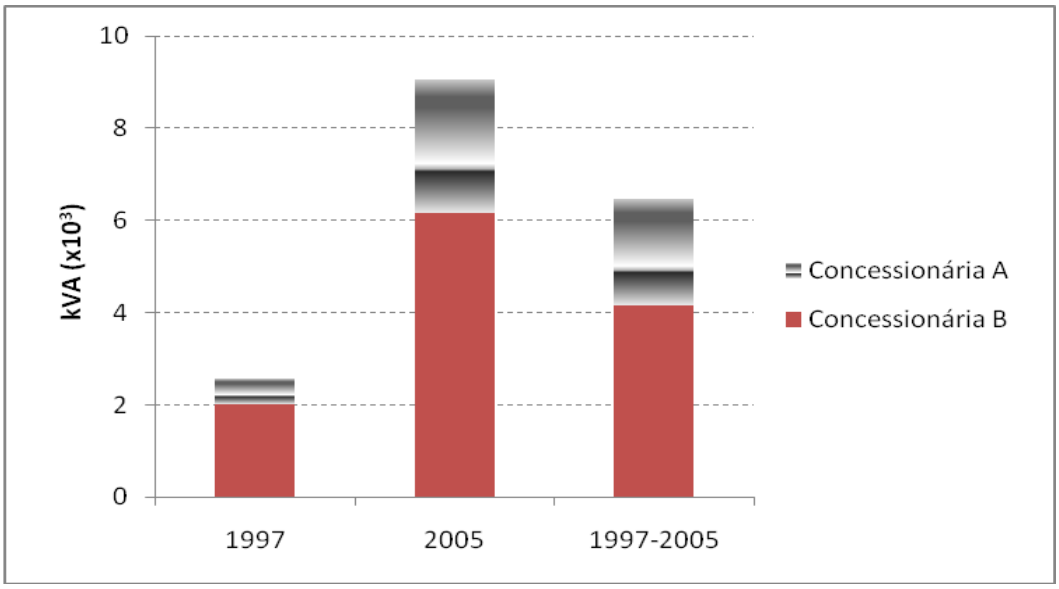


Figura 37. Estimativa do Aumento da Capacidade Instalada.

Na Tabela 45 são apresentados os impactos econômicos do aumento da capacidade instalada, para uma THD_i de 13% em 1997 e 20% em 2005, no secundário do transformador, considerando as informações das concessionárias A e B, de um custo total da instalação de um transformador em torno de R$ 130/kVA, valores totais para ambas as concessionárias e para o estado avaliado.

Tabela 45. Impactos Econômicos (R$) do Aumento da Capacidade Instalada

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	73.467	260.851	334.318
2005	375.139	801.490	1.176.629
1997-2005	301.673	540.639	842.311

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 38 mostra graficamente as estimativas dos impactos econômicos devido ao aumento da capacidade instalada devido às distorções harmônicas de corrente para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

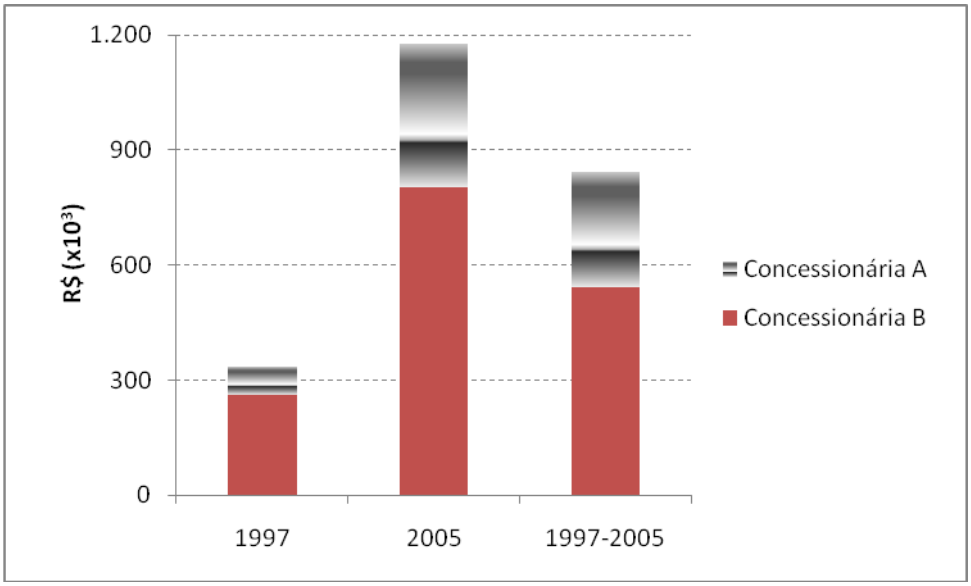


Figura 38. Impactos Econômicos Devido ao Aumento da Capacidade Instalada.

O aumento da capacidade instalada total é obtido pela diferença entre os aumentos das capacidades instaladas na PPH-2005 e PPH-1997.

6.6.2. Aumento das Perdas Fixas de Transformadores Adicionais

A Tabela 46 mostra as perdas fixas adicionais em transformadores, em torno de 3% de sua potência nominal (WEG, 2009), submetidos a uma DHT_i de 13% em 1997 e 20% em 2005.

Tabela 46. Aumento das Perdas Fixas (kWh/ano) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	16.485	58.533	75.018
1998	24.947	73.697	98.644
1999	33.409	88.862	122.270
2000	41.890	104.025	145.895
2001	50.332	119.190	169.521
2002	58.793	134.354	193.147
2003	67.255	149.518	216.773
2004	75.716	164.683	240.399
2005	84.177	179.847	264.025
1997-2005*	452.983	1.072.707	1.525.691

*kWh

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 31 mostra graficamente o aumento das perdas fixas em transformadores adicionais, devido ao aumento da capacidade instalada, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

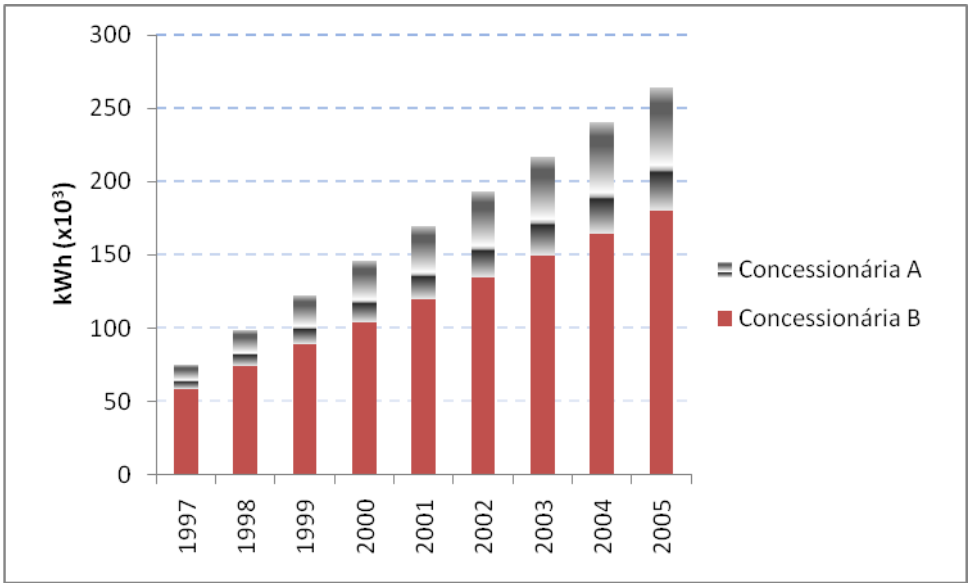


Figura 39. Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição.

Os valores dos impactos econômicos, considerando uma tarifa residencial de eletricidade para as concessionárias A e B, respectivamente, de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, isenta de taxas e impostos, são mostrados na Tabela 47.

Tabela 47. Impactos Econômicos (R$) do Aumento das Perdas Fixas (kWh) de Transformadores Adicionais

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	6.164	18.229	24.393
1998	9.329	22.951	32.280
1999	12.492	27.674	40.167
2000	15.657	32.397	48.053
2001	18.821	37.119	55.940
2002	21.985	41.842	63.827
2003	25.149	46.564	71.714
2004	28.313	51.287	79.600
2005	31.477	56.010	87.487
1997-2005	169.389	334.073	503.462

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 40 mostra graficamente os impactos econômicos do aumento das perdas fixas em transformadores adicionais de distribuição, para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

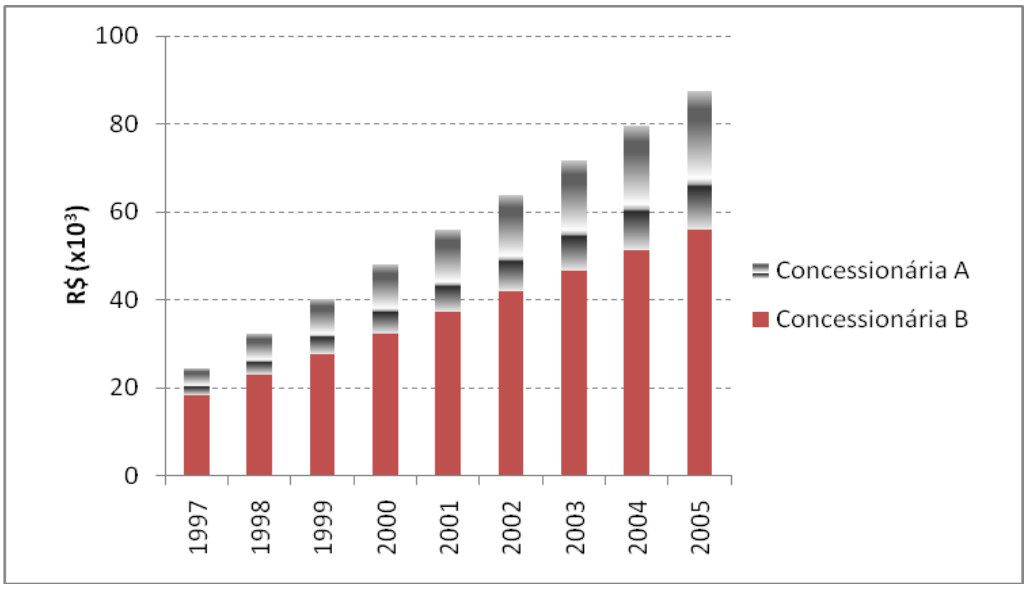


Figura 40. Impactos Econômicos Devido ao Aumento das Perdas Fixas em Transformadores de Distribuição.

O impacto econômico total do aumento das perdas fixas em transformadores, de aproximadamente R$ 503.462 (quinhentos e três mil quatrocentos e sessenta e dois reais), é obtido pela soma dos valores ao longo dos anos.

6.6.3. Aumento do Fluxo da Energia Reativa e Correção do Fator de Potência

A Tabela 48 mostra as estimativas do fluxo de energia reativa nas redes de distribuição para uma THD_i de 13% em 1997 e 20% em 2005.

Tabela. 48. Energia Não Ativa (Mvar/ano) Equivalente de TVs.

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	26.499	98.292	124.791
1998	34.158	109.396	143.554
1999	41.817	120.499	162.316
2000	49.476	131.602	181.078
2001	57.135	142.706	199.841
2002	64.794	153.809	218.603
2003	72.453	164.912	237.366
2004	80.112	176.016	256.128
2005	87.771	187.119	274.891
1997-2005	514.216	1.284.351	1.798.568

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 41 mostra graficamente os impactos do maior fluxo de energia não ativa nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária, devido às distorções harmônicas.

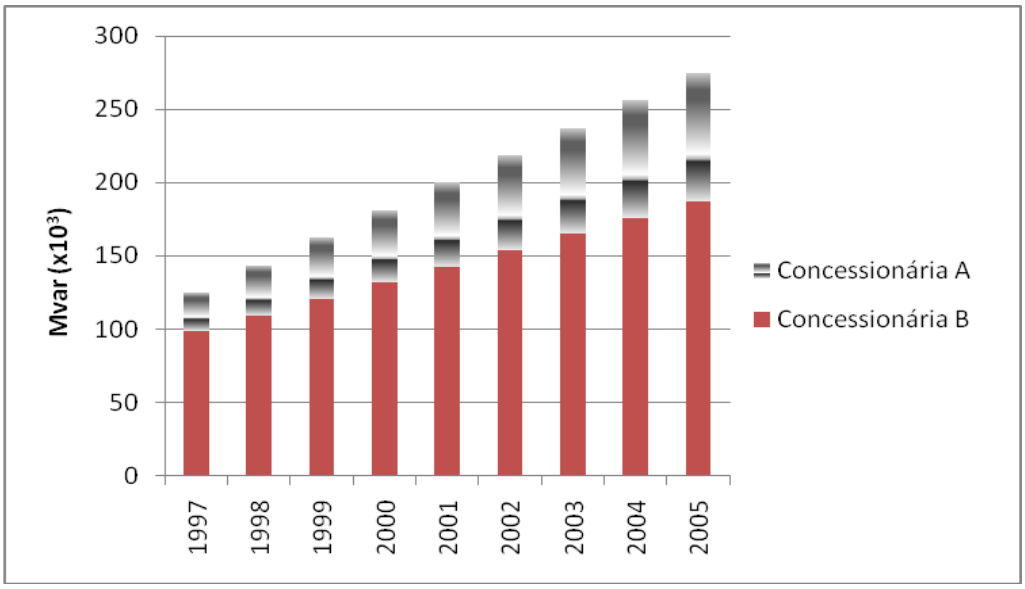


Figura 41. Aumento do Fluxo de Energia Não Ativa nas Redes Elétricas.

A Tabela 49 mostra as estimativas dos impactos da comercialização de energia não ativa como ativa, considerando os valores de 1/3 do valor médio da tarifa residencial para cada concessionária, respectivamente de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, para as concessionárias A e B, sem tributos ou impostos, as concessionárias da UF sob análise de oportunidade da comercialização de energia não ativa como ativa.

49. Impactos Econômicos (R$) da Energia Não Ativa Equivalente de TVs

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	3.487.905	10.111.074	13.598.979
1998	4.405.791	11.251.016	15.656.806
1999	5.323.677	12.390.957	17.714.634
2000	6.241.563	13.530.898	19.772.461
2001	7.159.449	14.670.839	21.830.288
2002	8.077.335	15.810.781	23.888.115
2003	8.995.221	16.950.722	25.945.943
2004	9.913.107	18.090.663	28.003.770
2005	10.830.993	19.230.605	30.061.597
1997-2005	64.435.039	132.037.554	196.472.594

Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 50 mostra os impactos da correção do fator de potência para uma THD_i de 13% em 1997 e 20% em 2005.

Tabela 50. Correção do Fator de Potência (kvar)

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	9.109	32.343	41.452
2005	29.143	62.264	91.406

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 42 mostra graficamente os impactos da correção do fator de potência pela implementação de filtros ativos nas redes elétricas para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

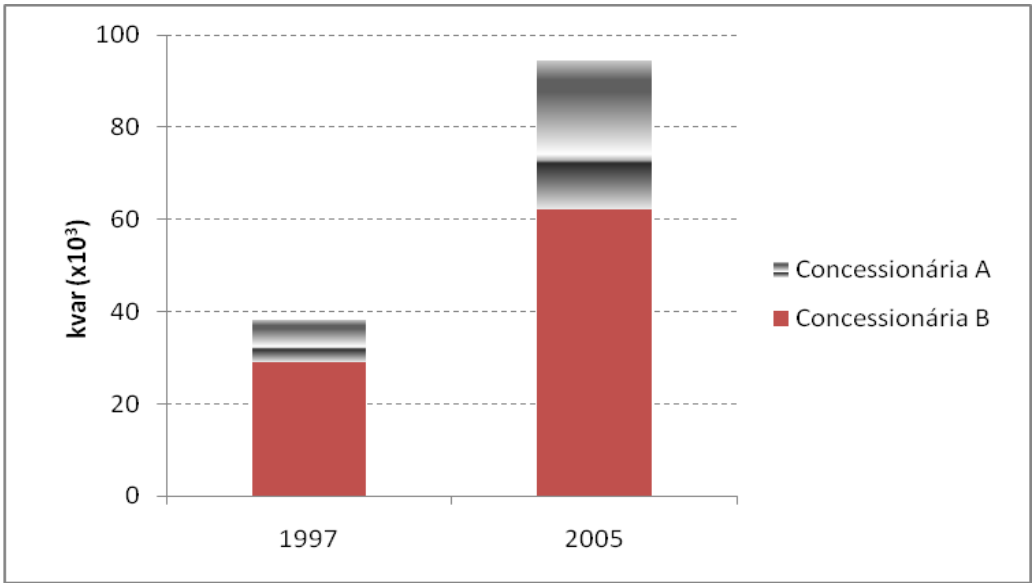


Figura 42. Correção do Fator de Potência com Filtros Ativos.

Na Tabela 51 são apresentados os impactos econômicos da correção do fator de potência em virtude das distorções harmônicas, considerando um custo de R$ 220[39]/kvar para a instalação de filtros ativos (ANEEL, 2007).

Tabela 51. Impactos Econômicos (R$) da Correção do Fator de Potência

Ano	Concessionária A	Concessionária B	Total Estado
1997	2.004.019	7.115.485	9.119.504
2005	6.411.375	13.697.980	20.109.355

Fonte: Elaboração Própria.

[39] O valor informado pela referência foi de US$ 110/kVA, que foi convertido para a moeda nacional a um câmbio de US$ 1equivalente a R$ 2.

A Figura 43 mostra graficamente os impactos econômicos da correção do fator de potência pela aplicação de filtros ativos em redes elétricas de distribuição para o estado analisado, comparando o percentual de participação de cada concessionária.

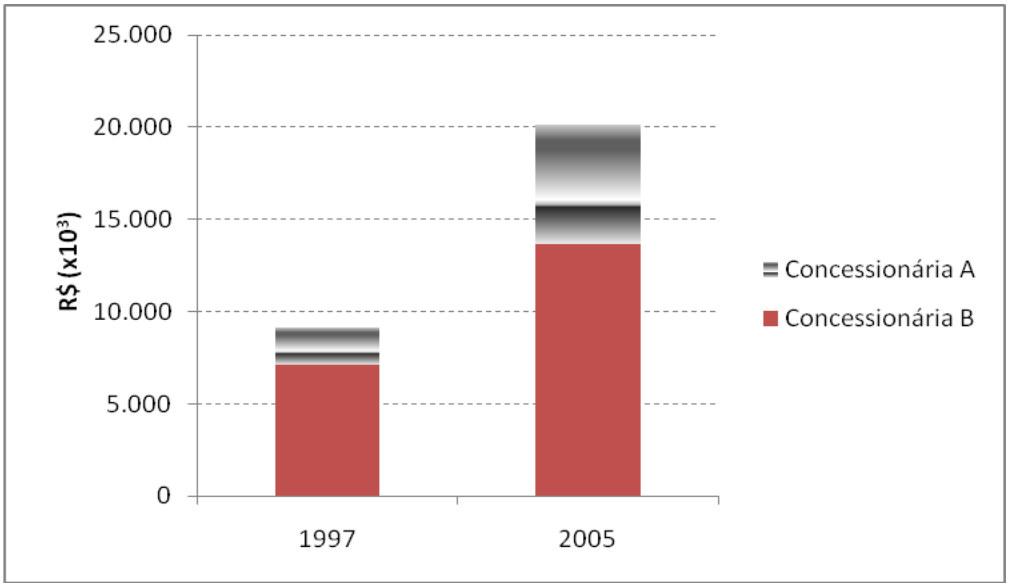


Figura 43. Impactos Econômicos Para Correção do Fator de Potência.

A Tabela 52 apresenta, para o estado analisado, um sumário com os impactos de potência das correntes harmônicas de TVs nas redes elétricas de distribuição, para os 3 (três) cenários, Cenário Referência (5% de TDH_i em 1997 e 12% em 2005) e Alternativos, Alta (13% de TDH_i em 1997 e 20% em 2005) e Baixa (1% TDH_i em 1997 e 8% em 2005) TDH_i, considerando a alteração de 1% no consumo próprio de eletricidade ($P_{Harmonico}$), as perdas em condutores do ramal de ligação e da rede interna ($P_{Condutor}$),as perdas fixas em transformadores de distribuição (P_{Trafo}), o custo de oportunidade da possível comercialização de energia não ativa como ativa (CER), o aumento da capacidade instalada (CI) e a correção do fator de potência (C_{fp}).

Tabela 52. Sumário dos Impactos de Potência dos Harmônicos de Corrente Para o Estado Analisado

Impacto	Referência	Baixa	Alta
$P_{Harmonico}$ (MWh)	110.410	110.410	110.410
$P_{Condutor}$ (MWh)	10.433	10.433	10.433
CI (kVA)	3.116	1.444	6.479
P_{Trafo} (kWh)	566.582	193.858	1.525.691
CER (kvar)	1.036.092	539.887	1.798.568
Cpf (kvar)	59.796	36.562	91.406
Total (R$)	166.930.327	107.284.142	257.892.368

Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 53 apresenta, para o estado analisado, um sumário com os respectivos impactos econômicos referentes à Tabela 52.

Tabela 53. Sumário dos Impactos Econômicos (R$) dos Harmônicos de Corrente Para o Estado Analisado

$P_{Harmonico}$	36.561.463	36.561.463	36.561.463
$P_{Condutor}$	3.403.183	3.403.183	3.403.183
CI	405.077	187.658	842.311
P_{Traf}	187.400	64.223	503.462
CER	61.171.658	147.981.258	235.819.700
Cpf	13.155.083	8.043.742	20.109.355
Total	166.930.327	107.284.142	257.892.368

Fonte: Elaboração Própria.

Constatando-se que a UF sob análise representa cerca de 12% do consumo de eletricidade do Brasil (EPE, 2008), e considerando-se ao longo da realização das PPHs

um comportamento análogo para o país, foi feita uma extrapolação destas cifras para o Brasil conforme apresentada na Tabela 54.

Tabela 54. Estimativa dos Impactos Econômicos (R$) dos Harmônicos no Brasil

Impacto	Referência	Baixa	Alta
Total	1.391.086.058	894.034.514	2.149.103.067

Fonte: Elaboração Própria.

Cabe considerar que foi estimada, mas não incluído, os quantitativos referentes ao uso da função *standby*, com média de consumo de 4 W por TV e cuja implementação se baseia no uso de dispositivo de eletrônica de potência, que resultou num impacto do consumo de eletricidade de 318.275 MWh e um custo de R$ 105.667.436, para o estado analisado, e de 2.652.292 MWh e um custo de R$ 880.561.967, extrapolando-se para o Brasil.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Como visto, diante do esgotamento dos recursos energéticos, das maiores restrições ambientais e da necessidade tanto do desenvolvimento econômico dos países quanto da inserção de grandes massas a um patamar mínimo dignas de vida, a eficiência energética, que, em geral, requer investimentos de uma parcela daquela necessária para produzir mais energia, pode ser um instrumento alternativo à geração adicional de energia.

Os programas de eficiência energética, que tem como objetivo a oferta de produtos ou serviços com menores necessidades energética, para um mesmo nível de

conforto ou resultado, contribuem para aumentar a competitividade na produção, diminuir os custos de energia para o consumidor final, minimizar a probabilidade de falta de energia, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico e contribuir para a redução dos impactos do efeito estufa.

Adicionalmente a visão do planejamento energético tradicional, que tem como premissa preferencial expandir a oferta futura de energia com segurança sob um a ótica quantitativa (entalpia) a custo mínimo, há que se considerar também a integração de variadas opções tecnológicas, incluindo a eficiência energética, observando ainda os aspectos relacionados a qualidade (exergia) dos fluxos energéticos.

A Qualidade da Energia Elétrica tornou se assunto de grande importância para economias dependentes das Tecnologias de Informação (TI), assim como para os processos controlados por computadores e baseados em circuitos digitais, que se utilizam necessariamente dos sistemas de telecomunicações. Entre os distúrbios relacionados à QEE cabe citar as distorções harmônicas de corrente ou de tensão, a flutuação de tensão, a cintilação luminosa, o desequilíbrio de tensão, as variações momentâneas de freqüência, além das variações transitórias, momentâneas e sustentadas de tensão

A implementação da eficiência energética por meio do uso de equipamentos com eletrônica de potência, que drenam correntes distorcidas do sistema de potência, em interação com a impedância do sistema elétrico de potência, causa distorções harmônicas da tensão nas redes elétricas. Pesquisas indicam um maior percentual de participação no consumo de eletricidade das residências dos modernos equipamentos com eletrônica de potência, que ofertam novos serviços e utilizam a função *stand-by*, sem que alguns possuam o botão de desligar, o que resulta num maior consumo de energia do que os modelos antigos. Entre os equipamentos com dispositivos de eletrônica de potência cabe citar os televisores e computadores, além das impressoras e lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico integrado.

Entre os impactos das distorções harmônicas nas redes eléticas pode se citar erros em medidores, atuação indevida de sistemas de proteção e de controladores lógico

programáveis, elevação do potencial de neutro em relação do de terra, aumento do fluxo de energia não ativa circulando no sistema de potência, sobreaquecimento e redução da vida útil tanto de transformadores quanto de máquinas elétricas, bem como dos condutores elétricos, aumento das perdas em transformadores, redução da vida útil e danificação de bancos de capacitores, entre outros.

Baseando-se em um Cenário de Referência (5% de TDH_i em 1997 e 12% em 2005) e dois alternativos, Cenário Baixa TDH_i (1% de TDH_i em 1997 e 8% em 2005) e Cenário Alta TDH_i (12% de TDH_i em 1997 e 20% em 2005), nesta tese foram apresentadas as estimativas para os impactos econômicos em redes de distribuição devido aos efeitos das distorções harmônicas ocasionadas pela proliferação do uso de PES aplicados em cargas eletrônicas monofásicas, tomando-se como estudo de caso a posse e os hábitos de uso de TVs para uma UF com um consumo em torno de 12% do consumo do Brasil. Levando-se em conta o período entre a realização das PPHs de 1997 e 2005 na UF analisada, estes impactos se situaram entre R$ 166.930.327 257.892.368. Considerando um comportamento análogo para o restante do país, foi feita uma extrapolação para o Brasil, situação em que os impactos variaram entre 894.034.514 e 2.149.103.067.

Como visto, a padronização IEC 61000-3-2 (IEC, 2001) limita os harmônicos no próprio equipamento, enquanto a IEEE Standard 519-1992 (IEEE, 1992) limita os harmônicos no PAC. Levando-se em conta que no Brasil as distribuidoras fazem a compensação de reativos nas redes de média tensão (13.8 kV), a adoção do padrão IEEE resultaria nos impactos anteriormente mencionados, enquanto que a aplicação da norma IEC mitigaria os efeitos dos harmônicos nos próprios equipamentos de TVs.

Considerando um consumo total de eletricidade de 10.246 GWh para o setor residencial brasileiro do estado avaliado em 2005 (EPE, 2008), ano base da última PPH, e uma tarifa média de R$ 0,33/kWh, as receitas de eletricidade para este ano foram de RS$ 3.426.674.22. Dessa forma, as estimativas apresentadas dos impactos econômicos das distorções harmônicas de corrente nas redes residenciais de distribuição de eletricidade representam cerca 3%, 5% e 8%, respectivamente, para o Cenário Baixa distorção harmônica, Cenário de Referência e Cenário de Alta distorção harmônica em

comparação com as receitas obtidas devido ao consumo de eletricidade. Se assumirmos a mesma tarifa media para o Brasil como um todo, ou seja, 0,33/kwh, os impactos econômicos apresentados por extrapolação na Tabela 53, também representam os mesmos percentuais, considerando um consumo total de 83.193 GWh para o setor residencial brasileiro em 2005.

Como visto, a padronização IEC 61.000-3-2 impõe limites de distorções harmônicas de corrente para os equipamentos elétricos de baixa tensão até 16 A por fase, enquanto a padronização IEEE-1992 somente contem recomendações quanto aos limites no PAC. Como usualmente as distribuidoras de eletricidade instalam compensadores para correção do fator de potência em media tensão (11.4/13.8 kV), a adoção do padrão IEEE resultaria nos impactos antes mencionados, enquanto a adoção do padrão IEC mitigaria os impactos dos harmônicos nas redes elétricas de distribuição.

Considerando a existência de 5.342.475 TVs em 1997, e os mencionados impactos ao longo dos oito anos entre a realização das duas pesquisas, seria vantajoso mitigar as correntes harmônicas individualmente por TV, conforme recomenda a IEC 61.000-3-2, para um filtro harmônico com custo de até R$ 31 por TV, caso do Cenário Referência (5% de THD_i em 1997 e 12% em 2005), de até 20 por TV, caso do Cenário Baixa distorção harmônica (1% de THD_i em 1997 e 8% em 2005) e de até 48 por TV, caso do Cenário Alta distorção harmônica (12% de THD_i em 1997 e 20% em 2005).

Cabe frisar que estas estimativas apresentadas não contabilizaram as perdas em carga dos transformadores de distribuição, nos condutores das redes elétricas da concessionária de distribuição, as perdas de eletricidade do consumo devido ao uso da função *standby*, implementada por dispositivo de eletrônica de potência, tendo resultado num impacto de 318.275 MWh a um custo de R$ 105.667.436, se considerada a tarifa média de eletricidade residencial de R$ 0,33/kWh. Os harmônicos também causam redução da vida útil de transformadores e de outros equipamentos elétricos (FUCHS *et al.*, 1986). Além disso, causam mau funcionamento de cargas eletrônicas, tais como computadores (LUNDQUIST, 2001), sem contar que os impactos dos harmônicos alcançam as redes de transmissão até a rede básica (> 220 kV) do Sistema Interligado Nacional (DUARTE, 2007).

Finalmente, torna-se importante comentar que adicionamente aos impactos das distorções harmônicas de corrente, ainda há que se considerar os impactos das distorções harmônicas de tensão no sistema elétrico de distribuição (MERTENS JR. *et al*, 2006) que também causam distorções harmônicas de correntes em cargas alimentadas por estas redes elétricas (RYLKANDER e NARENDORF JR, 2009). Cabe ressaltar que é preocupante o considerável aumento das distorções harmônicas de tensão ao longo dos anos (MERTENS *et al.* 2006),em virtude da massificação do uso de PES, que drenam correntes elétricas distorcidas, podendo acarretar mau funcionamento de equipamentos elétricos, bem como perda da vida útil destes equipamentos, sendo que em alguns casos resulta efeitos destrutivos (WATSON e HIRSCH, 2009).

7.2 Trabalhos Futuros

Os principais avanços propiciados por esta tese foram:

- o desenvolvimento de uma metodologia que possibilita avaliar os impactos de potência das distorções harmônicas de corrente das milhares de pequenas cargas eletrônicas dispersas em redes de distribuição tipicamente residenciais;
- a estimação dos respectivos impactos econômicos das distorções harmônicas nestas redes elétricas de distribuição;
- a análise dos impactos do consumo de eletricidade devido ao uso da função *stand-by* de TVs no Brasil;
- a estimação dos respectivos impactos econômicos do consumo de eletricidade pelo uso da função *stand-by* no Brasil;

Considerando os pontos acima mencionados, como sugestão de trabalhos futuros, inicialmente deve ser importante a realização de uma campanha de medição de harmônicos de tensão e de corrente em redes elétricas de distribuição, concomitantemente com a realização de uma pesquisa de posse e de hábitos de uso de equipamentos com dispositivos de eletrônica de potência, bem como uma avaliação mais precisa dos impactos do uso de equipamentos com função *standby*.

Assim, poderá se avaliar de forma mais rigorosa os impactos econômicos nas redes elétricas de distribuição e incluir fatores ainda não estimados, a exemplo das maiores perdas nos condutores da rede da distribuidora de eletricidade, bem como os impactos dos erros das medições da potência reativa efetivada por instrumentos comerciais (SUHET, 2008).

Adicionalmente, sugere-se uma análise dos impactos econômicos das distorções harmônica tanto nos sistemas de redes de distribuição quanto de transmissão e ainda na geração de energia elétrica. Além disso, torna-se muito importante uma investigação a respeito dos impactos econômicos devido à redução da vida útil das máquinas e equipamentos elétricos submetidos a maiores distorções harmônicas. Finalmente, como as distorções harmônicas podem causar operação inadequada dos sistemas de proteção, cabe um estudo a respeito das interrupções de energia elétrica causadas por distorções harmônicas.

Referências Bibliográficas

Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia - ABRACE. **Ocorrência de Tensões e Correntes Harmônicas nos Sistemas Elétricos**. Relatório ABRACE, São Paulo – SP: nov.1985.

ABREU, J. P.; FILHO, J. M. C.; CARVALHO, P. L.; FREIRAS, O. P. O. Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica. **II CBQEE.** Itajubá - MG: EFEI, 1997.

AFONSO, J. L. e MARTINS, J. S. Qualidade da Energia Eléctrica. Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho, Portugal. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1920/1/Electricista_04.pdf. Acesso em: 15.jun.2006.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa nº 024/2000**. Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica nos seus aspectos de duração e freqüência, a serem observadas pelas concessionárias e permissionárias de serviço público de energia elétrica às unidades consumidoras. Brasília-DF: ANEEL, 27.jan.2000.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica. Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas**. Relatório Parcial 2 - Estado da Arte. jun.2000a.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Sítio contendo informações a respeito da proposta de limites de distorções harmônicas em redes elétricas de distribuição. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_24032006_srd.pdf. Acesso em: 12.mai.2006.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento. Análise e Implementação de Filtros Harmônicos Passivos em Alimentadores de Distribuição**. Contrato DITPE/UPFSE nº. 4500014641/2007, ESCELSA/UFU-ANEEL, 2007.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa nº 376/2009**. Estabelece as condições para contratação de energia elétrica, por Consumidor Livre, no âmbito do Sistema Interligado Nacional. Brasília-DF: ANEEL, 25.ago.2009.

AGUIAR, A. C. J.; COHEN, C.; FURTADO, L. M. S. Implicações Econômicas do Potencial de Conservação de Energia: Cenários de Incidência dos Efeitos Bumerangue e *Backfire* no Setor de Serviços. **XI CBE**, v. IV, p. 1781-1793, Rio de Janeiro - RJ: PPE/COPPE/UFRJ, 2006.

ALMEIDA, A. M.F.; BRAZ, H. D.M.; PAPLONA, F. M.P.; SOUZA, B. A. Controle Integrado do Perfil de Tensão e de Distorções Harmônicas em Alimentadores Radiais de Distribuição com Aplicação Simultânea de Reguladores de Tensão e Filtros Harmônicos Passivos. **VI SBQEE.** Belém – PA: UFPA, 2005.

AMADO, N. B. e FAGÁ, M. T. W. A Controvérsia em Torno do Efeito Bumerangue: um Teste Estatístico. **XI CBE**, v. IV, p. 1795-1806, Rio de Janeiro – RJ: PPE/COPPE/UFRJ, 2006.

APOLÔNIO, R. ; OLIVEIRA, J. C. DE; VASCONCELLOS, A. B. DE; OLIVEIRA, A.; SOUTO, O. C. N. Filtro Eletromagnético Para Harmônicos de Seqüência Zero. **V SBQEE.** Anais. Aracaju – SE: Faculdade Pio X, 2003

AREDES, M. **Active Power Line Conditioners**. 1996. 155 f. Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation. Vom Fachbereich 12 Elektrotechnik der Technischen Univerfsität Berlin, Berlin.

AREDES, M.; AQUINO, A. F. DE; JOÃO CARLOS A. **Substituição de Lâmpadas Incandescentes por Lâmpadas Fluorescentes de Baixo Consumo: Avaliação do Impacto no Sistema de Distribuição**. Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro - RJ, 1999.

BALTHAZAR, M. F. Q. **Medidores de Watt-Hora Eletrônicos na Presença de Harmônicos: Análise e Testes Preliminares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), PEE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 140p.

BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. L.; ARAÚJO, A. C. S.; GARCEZ, J. N.; MESQUITA, J.E. e TUPIASSÚ, A. A. **Harmônicos Gerados por Consumidores em Baixa Tensão da Rede Metropolitana de Distribuição de Energia de Belém (PA)**. Disponível em: http://www.ufpa.br/nesc/publicacoes.htm. Acesso em: 03.out.2006.

BIANCHIN, C. G.; OLIVEIRA, A. H.; DEMONTI, R.; PASQUALIN, J. R.; MOELLER, B. e WOLANIUK, G. Aplicação de Tecnologia de Filtragem Ativa Para Melhoria da Qualidade de Energia Elétrica. **VI SBQEE.** Anais. Belém – PA: ago.2005.

BUDEANU, C. I. Reactive Power and Unbalanced Circuits, **Electrical World**, v. 75, nº 25, p. 1417-1420, 1920.

BRASIL. Lei 12.212, de 20 de Janeiro de 2010, artigo 11, incisos I e V. Dispõe sobre a Tarifa Social de Energia Elétrica; altera as Leis nos 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.925, de 23 de julho de 2004, e 10.438, de 26 de abril de 2002; e dá outras providências. Disponível em: http://www.senado.gov.br. Acesso em: Fev.2010.

BRASIL. Lei 8.078, de 11 de Setembro de 1990. Dispõe Sobre a Proteção do Consumidor e dá Outras Providências. Disponível em: www.mj.gov.br. Acesso em: 23.mai.2007 .

BRASIL, D. O. C. *et al*. Qualidade de Potência: Aspectos Metodológicos e de Custos. **II SBQEE**. Anais. São Lourenço - MG: EFEI, 1997.

BRONZEADO, H. S.; RAMOS, Á. J. P.; OLIVEIRA, J. C. DE; ABREU, J. P. G;. ARRUDA, A. e BRANDÃO, C.A.L. Uma Proposta de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica. **II SBQEE**. Anais. São Lourenço - MG: EFEI, 1997.

BUDEANU, C.I. Puissances reactives et fictives. **Instytut Romain de l' Energie**. Pub. nº 4, Bucharest, 1927.

CAMARGO, J. ; ZANETTI, E. R.; MARTINZ, F. O.e SILVEIRA, M. M. Adequação da Qualidade das Instalações Elétricas Industriais à Qualidade da Energia Elétrica da Concessionária. **V SBQEE**. Anais. Código AJU 04 119. Aracaju – SE: Faculdade Pio X, 2003.

CARVALHO, R. J. O.; PEREIRA, M.; JÚNIOR, C. A. e DURANTE, L. D. Filtragem de Componentes de Seqüência Zero: Projeto de Filtro e Resultados. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, ago.2005.

CEER. **Quality of Electricity Supply: Initial benchmarking on actual levels, standards and regulatory strategies**. Council of European Energy Regulators – CEER. WG on Quality of Electricity Supply, apr.2001.

Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS/PROCEL. **Resultados do PROCEL: Resultados das Avaliações de Eficiência Energética 2007**. Disponível em: http://www.eletrobras.com. Acesso em: 19.dez.2009.

Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS. **Boom de Eletrônicos Elevará Demanda por Energia**. Disponível em: http://www.eletrobras.com. Acesso em: 05.jul.2007.

Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS. **Eficiência Energética e Arquitetura**. Disponível em: http://www.eletrobras.com. Acesso em: 20.mar.2007a.

Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS. **Eletrônicos Não Rotulam Consumo de Energia**. Disponível em: http://www.eletrobras.com. Acesso em: 19.mar.2007b.

Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS. **Eficiência energética diminui inadimplência em até 50%**. Disponível em: http://www.eletrobras.com. Acesso em: 19.jan.2007b.

Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL. **Atendimento a Cargas Geradoras de Harmônicos em Sistemas Primários de Distribuição. Orientação Técnica da Área de Distribuição da CPFL**. Disponível em: http://agencia.cpfl.com.br. Acesso: jul.2006.

DECKMANN, S.M.; POMÍLIO, J.A.; MERTENS, E.A.; DIAS, L.F.S.; AOKI, A.R.; TEIXEIRA, M.D. e GARCIA, F.R. Compensação Capacitiva em Redes de Baixa Tensão com Consumidores Domésticos: Impactos no Nível de Tensão e na Distorção Harmônica. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

DECKMANN, S. M. e POMÍLIO, J. A. **Estudo de Alternativas Para Compensação Reativa em Redes Secundárias RIC 03350**. Projeto P&D Aneel: Metodologia de Otimização da Rede Secundária. Relatório Técnico 01. Rev. jan/05. 84p. 2005.

DESOER, C. A. e KUH, E. S. **Teoria Básica de Circuitos**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1988, 823p.

DE VRÉ, R. Limitation of Harmonics due to Household and Similar Low-Voltage Equipment. **International Conference on Harmonics in Power System**. Anais. 1994.

DIAS, G. A. D.; SONALIO, F. V.; TELLÓ, M.; BEHLE, F. K.; SANTANA, B. e CASA, D. Interação Entre Forno de Indução e Banco de Capacitores – Estudo de Caso. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

DUARTE, C. H.; ARRUDA, A.; AGUIAR, J.C. Posse e Uso de Televisores e Harmônicos nas Redes Elétricas de Distribuição e Transmissão. **VII CBQEE**. Anais. Código 32084. Santos - SP: ENERQ/USP, 2007.

DUARTE, C. H.; AGUIAR, J. C. e GOÉS, R. R. A. Eficiência Energética e Consumo de Energia: Posse e Uso da Televisão no Brasil. **II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética**. Anais, Vitória - ES: UFES, 2007a.

DUARTE, C. H. Análise Comparativa da Posse e Uso de Equipamentos de Vídeo: Televisores ,Vídeocassetes, DVDs e *Set-Top-Boxes*. **XII CBE.** Anais. Rio de Janeiro – RJ: PPE/COPPE/UFRJ, 2008.

DUARTE, C. H; AGUIAR, J. C. e BALTHAZAR, M. F. Q. Impactos Econômicos dos Dispositivos de Eletrônica de Potência nas Redes Elétricas de Distribuição. **VIII CBQEE**. Anais. Blumenau – SC: FURB, 2009.

DUGAN, R. C.; SANTOSO, S.; MCGRANAGHAN, M. F. e BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality.** 2ª. Edition. New York: McGraw-Hill, 2003, 528p.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Balanço Energético Nacional 2009: Ano Base 2008. Rio de Janeiro - RJ: EPE, 2009.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Balanço Energético Nacional 2007. Ano Base 2006. Rio de Janeiro - RJ: EPE, 2007.

ENJETI, P. N.; SHIREEN, W.; PACKEBUSH, P. e PITEL, I. J. Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electrical Distribution Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, nº. 6, p. 1565-1572, nov./dec.1994.

EPRI/CEIDS. Electrotechnical Power Research Institute/Consortium for Electric Infrastructure to Support a Digital Society. **The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies**. Jun.2003. Disponível em: www.epri.com/ceids. Acesso em: 10.dez.2009.

ESCELSA/UFU, ANEEL. **Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento. Análise e Implementação de Filtros Harmônicos Passivos em Alimentadores de Distribuição**. Contrato DITPE/UPFSE nº. 4500014641/2007, 2007.

FARIAS, A. L.; ARENTZ, D. S. e CASTELLANO, U. F. Sobrecarga Harmônica e Implantação de Sistema de Monitoramento e Alarme nas Subestações de Ibiúna e Foz de Iguaçu de Furnas. **V SBQEE**. Anais. Aracaju - SE: Faculdade Pio X, 2003.

FILHO, J. M. **Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis**. São Paulo - SP: Editora Érica Ltda. 1997. 315 p.

FONTESCUE, C.L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. **Trans. American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, p. 1027-1140, 1918.

FRYZE, S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stroomkreisen mit nicht-sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung. **ETZ-Arch. Elektrotech**, v. 53, p. 596-599, 625-627, 700-702, 1932.

FUCHS, E. F.; ROESLER, D. J. e KOVACS, K. P. Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power System's Voltage, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. PWRD-1, nº. 1, p. 301-307, Jul. 1986

GALHARDO, M. A. B. e PINHO, J. T. Conceitos de Distorção e Não Linearidades. **V SBQEE. Anais**. Aracaju: Faculdade Pio X, 2003.

GALLO, W. L. R e MYLANES, L. F. Eficiência Exergética: Conceitos e Aplicações. **III Encontro Nacional de Ciências Térmicas**. Anais. Itapema - SC: ABCM, 1990.

GAMA, P. H. R. P. Qualidade da Energia Elétrica. In: MARQUES, M.; HADDAD, J. e MARTINS, A. R. S. (eds), **Conservação de Energia Elétrica – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, 3ª ed., Capítulo 11, p. 378-447. Itajubá - MG: ELETROBRÁS-PROCEL/ Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2001.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência Energética Para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003, 127p.

GARCIA, F. R. Comentários Sobre os Impactos das Distorções Harmônicas em Bancos de Capacitores. 2ª Reunião da Força Tarefa em Qualidade de Energia do Comitê C-4 do CIGRÉ Brasil. Rio de Janeiro - RJ: ONS, out.2006.

GARMENDIA, J. A. e MORÁN, L. I. **Armónicos em Sistemas de Potência**. Cantabria: Servício de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 1994. 373p.

GÉLLER, H. S. **Revolução Energética: Políticas Para um Futuro Sustentável.** Rio de Janeiro - RJ: Relume Dumará, 2003, 299p.

Grupo Coordenador de Operação Interligada - GCOI. **Pesquisa sobre o Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica.** Relatório GCO/SCEL/GTAD-01/91. Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás. 1991.

GOMES, P.; SCHILLING; M.T.H; ZANI, C. R.; CALDAS, G. P. e CAFÉ, F. F. Aspectos Relacionados à Conceituação, Interpretação e Determinação do Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica. **VI ERLAC**. Foz do Iguaçu - PR: Itaipu Binacional, 1995.

GONÇALVES, J. A. **Eficiência é o Nome do Jogo**. Guia Exame de Sustentabilidade, p. 116-118, Nov. 2009,

GRUZS, T. M. A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems. **IEEE Transactions on Industrial Application**, v. 26, p. 719-725, 1990.

GUIMARÃES, C. A. M. **Apostila Sobre Harmônicos**. Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, EFEI, 1997.

HEI – Hawaian Electrical Institute. Disponível em: www.hei.com. Acesso em: 20.nov.2006

HIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio**. São Paulo – SP: Makron Books, 2003. 301p.

HILL, R.; O'KEEFE, P. e SNAPE, C. **The Future of Energy Use**. St. Martin' s Press. New York, 1995. 216 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm. Acesso em: 11.dez.2009.

IEC, **Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2, Section 2: Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Low-Voltage Power Supply Systems**. IEC 61000-2-2. First Edition, 1990-05.

IEC, **Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3, Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A)**. IEC 61000-3-2, Geneva, 2001.

IEC, **Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3, Section 4:Limitation of Emission of Harmonics Current in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater than 16 A**. IEC 61000-3-4 First Edition, Geneva, 2001a.

IEC, **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4, Section 7: General Guide on Harmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto**. 2002 (First Edition, 1991-07).

IEEE, **Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalaced Conditions**, IEEE Standard 1459, 2000.

IEEE, **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, IEEE Standard 1159, 1995.

IEEE, **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System**. IEEE Standard 519, 1992.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br. Acesso em: 19.dez.2009.

JAMES, J. G. **An Investigation of Harmonic Content on an Electrical Network**. Undergraduated Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland. 2001. 92 p.

JANUZZI, G. M. **Aumentando a Eficiência nos Usos Finais de Energia no Brasil**. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/unicamp-20anos.pdf. Acesso em: 20.ago.2006.

JANUZZI, G. M. e SWISHER, J. N. P. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. Campinas – SP: Editora Autores Associados, 1997, 246p.

JOU, H.; WU, J.; WU, K.; CHIANG, W. e CHEN, Y. Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System. **IEEE Transactions on Power Deliver**y, v. 20, nº. 2, p 1168-1173, apr.2005.

JÚNIOR, J. R. M. e SIMONETI, D. S. L. As Inter-Harmônicas e o Fenômeno da Cintilação Luminosa. **VIII CBQEE**. Anais. Blumenau – SC: FURB, 2009.

KEY, T. S. e LAI, J. Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 32, nº. 5, p.1017-1025, set./oct.1996.

KEY, T. S e LAI, J. Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.29, nº. 4, p. 688-695, jul./aug.1993.

LAI, J. e KEY, T. S. Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n.º 4, jul./aug.1997.

LANGELLA, R.; TESTA, A. e EMANUEL, A. E. On the Effets os Subsynchronous Interharmonic Voltages on Power Transformers: Single Phase Units. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, nº. 4, Oct.2008.

LATHI, B. P. **Sistemas de Comunicação**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Guanabara Dois S.A. 1979, 401 p.

LEÃO, R.. Sítio sobre definição de grandezas fasoriais Disponível em: http://www.dee.ufc.br/~rleao/Disciplinas. Acesso em: 08 nov. 2006.

LEITE, A. D. **A Energia d Brasil**. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora Ltda, 2007, 658p.

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil**. 2ª Edição. Rio de Janeiro – RJ: Elsevier Editora Ltda, 2007, 658p.

LEITE, J. R. L.; FERREIRA, A.; OLIVEIRA, M. A. Uma Metodologia Para a Avaliação dos Custos de Interrupção e de Eventos de Qualidade da Energia. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

LIMA, A. G. e ROSS, R. P. D. Qualidade de Energia Elétrica. **Revista Eletroevolução**, Out. de 1996, p. 71-74.

LOSADA y GONZALEZ, M.; PIRES, I. A. e SILVA, S. R. Medições de Correntes Harmônicas em Aparelhos Eletrodomésticos. **Revista Eletricidade Moderna**, nº. 382, p.110-123, jan.2006.

LUNDQUIST, J. **On Harmonic Distortion on Power Systems**. Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001, 147 p.

MACHADO, G. V. Aula de Economia da Energia. Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 02.abril.2004.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M.; STAATS, P. T.; THALAM, R. S.; DOYLE, M. T. e SAMOTYJ, M. J. Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Numbers of Distributed Single-Phase Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n^0. 4, oct.1995.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M.; THALLAM, R. S.; DOYLE, M. T.; KREIN, S. D. e SAMOTYJ, M. J. Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-

Phase Diode Bridge Rectifier Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, nº. 3, jul.1995a.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M; CHOWDHURY, A. H e SAMOTYJ, M. J. An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 10, nº. 1, jan.1995b.

MARTINEZ, M. F.; ALVES, M. B; PEREIRA, L. A e BEYER, P. O. Redução de Consumo de Energia Elétrica Através de Conceitos *Green Building*. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 14, nº. 2 , mai.2009.

MEDEIROS, M. O. B.; FILHO, J. M. C.; ABREU, J. P. G; MONTEZUMA, F. P. Monitoração da Qualidade de Energia de um Sistema de Distribuição. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

MEIER, A. e HUBER, W. **Results from de investigation on leaking electricity in the USA. (Set Top Boxes LBNL-40909_Resulting_from_the_investigatigation).** Disponível em: http://eetd.lbl.gov/EA/reports/40909. Acesso em: 15.fev.2009.

MELO, M. O. B. C. e CAVALCANTI, G. A. Avaliação do Impacto da Qualidade de Energia Elétrica no Mercado e na Produção Industrial: Análise e Metodologia. **V SBQEE**. Anais. Aracaju - SE: Faculdade PIO X, 2003.

MERTENS JR., E. A.; BONATTO, B. D.; DIAS, L. F. S. Avaliação e Tendência dos Níveis de Distorção Harmônica de Tensão no Sistema Elétrico de Distribuição. **XVII SENDI,** Belo Horizonte - MG: 2006.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Eletronics – Converters, Applications, and Design**. 3ª Edição, John Wiley & Sons, Inc, 2003, 802 p.

NAVES, A. C. e GARCIA, F. R. Efeitos Harmônicos da Aplicação de Bancos de Capacitores em Indústrias Eletrointensivas Sobre a Rede Elétrica de Alta Tensão – Casos Reais. **VI SBQEE** Código: BEL 01 7567. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

NDIAYE, M. S. **Modelagem de Cargas Não Lineares por Fontes de Corrente Sincronizadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). 2006. 118p. Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

NOGUEIRA, L. A. H. Energia: Conceitos e Fundamentos. In: MARQUES, M.; HADDAD, J. e MARTINS, A. R S. (eds), **Conservação de Energia Elétrica – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, 3ª ed., Capítulo 11, Itajubá: ELETROBRÁS/PROCEL, Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2001.

OMRAN, W. A.; EL-GOHAREY, H. S. K.; KAZERANI, M. e SALAMA, M. M. A. Identification and Measurement of Harmonic Pollution for Radial and Nonradial Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, nº. 3, 2009.

PADACA, V.F. e HESS, H.L. **Ressonant Interaction and Additive Harmonic Effects of Multiple Paralleled AC Drives in Forest Products Processing**. University of Idaho, [powerquality.com, 1998].

PAVLOVA A. **As Sete Vidas da Televisão**. Disponível em: http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/0887/marketing/m0123042.html. Acesso em: 20.dez.2007.

PENNA, C.; AJEJE, P. C.; SCUCUGLIA, J. W.; DANTAS, F. D.; OLIVEIRA, L. C. O.; ROSSI, J. C. e MELO, A. **O Impacto dos Programas de Eficiência Energética na Qualidade Energia Elétrica**. Disponível em: http://citenel.aneel.gov.br/historico. Acesso em: 15.jun.2005.

PILEGGI, D. J.; GENTILE, T. J.; EMANUEL, A. E. Distribution Feeders with Nonlinear Loads in the Northeast U.S.A..: Part I – Voltage Distortion Forecas. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 1, p. 340-347, jan.1995.

PILEGGI, D, J.; GENTILE T. J.; EMANUEL, A. E. Distribution Feeders with Nonlinear Loads in the Northeast U.S.A.: Part II – Economic Evaluation of Harmonic Effects. "**IEEE Transactions on Power Delivery**", v. 10 , nº.1, p.348-356, 1995.

POLITO, R. **Distribuidoras Descobrem Chance de Aumentar Receita com Ações em Comunidade Carentes**. Disponível em: http://www.brasilenergia.com.br. Acesso em 03.abr.2007.

POMÍLIO, J. A. e DECKMANN, S. M. Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, nº. 2, 2007.

POMÍLIO, J. A. e DECKMANN, S. M. **Estudo de Alternativas Para Compensação Reativa em Redes Secundárias RIC00428**. Projeto P&D Aneel: Metodologia de Otimização da Rede Secundária. Relatório Técnico 02. Rev. Set/04. 45p. 2004.

PUC-Rio/ECOLUZ. **Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e de Hábitos de Uso (PPH-1997/2005): Segmento Residencial BT.** Rio de Janeiro - RJ: ELETROBRÁS/PROCEL, 2006.

QUEVEDO, C. P. **Circuitos Elétricos e Eletrônicos**. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2000. 476p.

QUINN, C.A. and MOHAN, N. Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase Four-Wire System with Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads. **IEEE-APEC92,** Appl. Power Electronics Conf. 1992. p. 829-836.

RADAKOVIC, Z.; TOPALIS, F. V.; KOSTIC, M.. The voltage distortion in low-voltage networks caused by compact fluorescent lamps with electronic gear. **Electric Power Systems Research**, n^0.73, p.129-136, 1995. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em 15 Nov.2005.

RESENDE, J. W.; SAMESINA, M. I. e PEREIRA, GABRIEL M. V. Substituição de Lâmpada Incandescente por Fluorescente Compacta. **Revista Eletricidade Moderna**, nº 381, p. 91-97, dez.2005.

RESENDE, J. W; SAMESIMA, M. I.; GOMES, D. B.; COUTO, L. M.; JÚNIOR, J. R. M. Avaliação das Perdas Técnicas em Sistemas Elétricos de Distribuição Suprindo Cargas Não Lineares. **V SBQEE**. Anais. Aracaju – Sergipe: Faculdade Pio X, 2003.

RICE, D. E. Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics – Their Effect on Power Systems Components. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-22, n^0. 1, jan./feb.1986.

RYLANDER, M.; GRADY, W. M.; NARENDORF, M. Experimental Apparatus, Testing Results, and Interpretation of the Impact of Voltage Distortion on the Current Distortion of Typical Single-Phase Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, nº. 2, p. 844-851, 2009.

ROBBA, E. J. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência**: Componentes Simétricas. São Paulo – SP: Editora USP. 1972. 342 p.

ROCHA, C. O. A; MELLO, C. A. F.; GOMES, H. N. Harmônicos Causados Pela Operação Simultânea de Televisores. **Revista Eletricidade Moderna**, p. 234-242, abr.1997.

RODRIGUES, M. A. M.; MIRANDA, A. L. L.; SILVA, E. A. B.; ROSS, R. P. D. Filtros com Resposta Maximamente Plana Para Cálculo de Harmônicos. **VI SBQEE. Anais.** Belém - PA: UFPA, 2005.

ROSS, R. P. D.; G. LIMA, A. G.; LOURENÇO, P. M.; GUARINI, A. P.; MELLO, A. J. C. M.; FERRO, F.; RONCOLATO, R. Qualidade de Energia/Potência Elétrica: Novo Enfoque Para Antigos Problemas. **XIII SNPTEE**. Anais. Florianópolis – SC: UFSC, 1995.

RYLANDER, M.; GRADY, W. M.; NARENDORF, M. Experimental Apparatus, Testing Results, and Interpretation of the Impact of Voltage Distortion on the Current Distortion of Typical Single-Phase Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 24, nº. 2, p. 844-851, apr.2009.

SAUNDERS, H. D. (2000). A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brokes. **Energy Policy**, nº. 28, p, 439-449, 2000.

SANTOS, C. K. S.; OLIVEIRA, J. T.; JÚNIOR, M. F. M.. Cálculo de Propagação de Harmônicos em Alimentadores de Distribuição Através de Equivalentes Norton Recursivos. **VI SBQEE**. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

SCHAEFFER, R. **Generalization of the Concept of Exergy at a National Level**. Dissertation in Energy Management & Policy. Faculties of the University of Pennsylvania. 370p. 1990.

SEETO, D.; HE, S. e WOO, C. Pricing Electric Harmonics. **Energy**, v. 20, n^0. 7, p. 617-621, 1995.

SOUZA, L. F. W. e ROSS, R. P. D. Algumas Experiências Relevantes em Monitoração e Análise de Qualidade de Energia Elétrica – Harmônicos. **V SBQEE**. Anais. Aracaju – SE: Faculdade Pio X, 2003.

SOUZA, S. A.; OLESKOVICZ, M. e DENIS, C. V. A Transformada de Fourier Janelada Aplicada a Qualidade da Energia Elétrica. **VI SBQEE.** Anais. Belém – PA: UFPA, 2005.

STRANGAS, E. G. **Adjustable Speed Drive Power Quality Evaluation Program – Second Phase – 1995-1996** – Final Report. Michigan State University, East Lansing MI48824, jun.1996.

STEVENSON, W. N. D. J. **Elements of Power System Analysis**. 4ª ed. 1982. 436 p.

SUHET, M. R. **Análise de Técnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008, 104p.

SWISHER, J. N.; JANUZZI, G. M. e REDLINGER, R. Y. **Tools and Methods for Integrated Resource Planning: Improving Energy Efficiency and Protecting the Environment**. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Rise National Laboratory, Denmark, 1997.

SZKLO, A. **Aula de Tecnologia da Energia**. Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ. Jul.2003.

TARTAR, R. E. **Solid-State Power Conversion Handbook**. New York - NY: John Wiley&Sons, Inc. 1993, 719p.

TEIXEIRA, M. D.; PAULILLO, G.; AOKI, A. R.; PENICHE, R. A. e ARCHANJO, D. L. Análise do Impacto de Lâmpadas Fluorescentes Compactas na Rede de Distribuição da COPEL. VI SBQEE. Anais. Belém - PA: UFPA, 2005.

TOFOLI, F. L.; SANHUEZA, S. M. R. e OLIVEIRA, A. On the Study of Losses in Cables and Transformers in Nonsinusoidal Conditions**. IEEE Transactions Power Delivery,** v. 21, n°. 2, apr.2006.

TOM, S. **Power Factor, Harmonics and Harmonic Filter**. Power CET, Santa Clara, CA, 1998.

TOSTES, M. E. L.; MOURA, C. C. M.; YOKOYAMA, A. T.; LUZ, A. L.; BEZERRA, U. H. e GAMA, P. S. J. Impactos Harmônicos em Redes de Distribuição de Energia Oriundos da Iluminação Pública. **XV SENDI**, 2002.

VASCONCELOS, G. 1ª Reunião da Força Tarefa em Qualidade de Energia do Comitê C-4 do CIGRÉE Brasil, São Paulo - SP: USP, mar.2006.

VILLALVA, M. G. **Estudo e Aplicação de Filtros Ativos Paralelos para Sistemas Trifásicos com Quatro Fios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2005. 182p.

SUEMITSU, W. Aulas de Eletrônica de Potência. Pós Graduação em Engenharia Elétrica. COPPE/UFRJ. 25 abr.2006.

TARTER, R. E. **Solid-State Power Conversion Handbook**. New York - NY: John Wiley & Sons. 1993. 719p.

TOLMASQUIM, M. T.; OLIVEIRA, R. G.; CAMPOS, A. F. **As Empresas do Setor Elétrico Brasileiro: Estratégias e Performance**. Rio de Janeiro - RJ: Edições Cenergia. 2002. 212p.

WATSON, N. R.; SCOTT, T. L. e HIRSCH, J. J. Implications for Distribution Networks of High Penetration of Compact Fluorescent Lamps. **IEEE Transactions of Power Delivery**, v. 24, n°. 3, jul.2009.

Weg Indústrias S/A – Transformadores. Disponível em: www.weg.com.br. Acesso em: 20.ago.2009.

Apêndice A

Sistemas Não Lineares

Este apêndice tem como objetivo conceituar o comportamento do sistema elétrico diante das variáveis de interesse, tensão, corrente, potência e fator de potência, de forma a propiciar uma familiarização com os termos, conceitos e expressões a serem utilizados nos capítulos seguintes.

No item A.1.1 são definidos os conceitos de distorções e não-linearidades, como também é feita uma explanação acerca da necessidade da aplicação da eletrônica de potência nos modernos equipamentos elétricos, o que fez aumentar os efeitos indesejáveis das não linearidades nas redes elétricas.

O item A.1.2 trata da caracterização dos circuitos elétricos com formas de ondas de tensão e corrente senoidais.

No item A.1.3 serão deduzidas as expressões matemáticas para uma dada função periódica e distorcida como a soma de infinitas ondas senoidais puras mais uma componente de freqüência zero.

No item A.1.4 serão apresentadas as definições de potência sob condições não senoidais tanto no domínio do tempo quanto no da freqüência, além de se determinar a potência de distorção, a taxa de distorção (em relação a uma onda senoidal) e o fator de potência sob condições não lineares.

A.1 Conceitos de Distorções e Não Linearidades

As cargas com características não lineares levam à distorção da forma de onda de saída (corrente drenada pelo equipamento) em relação à entrada (tensão de alimentação), gerando harmônicos na rede elétrica (GALHARDO e PINHO, 2003). Dessa forma, se uma tensão senoidal é aplicada a uma carga não linear obtém-se como resposta uma corrente distorcida. Isto não significa que uma onda não senoidal seja necessariamente distorcida, pois um resistor, componente linear, alimentado por uma onda quadrada produzirá uma forma de onda quadrada. Assim, um dispositivo não linear é aquele que apresenta uma resposta de corrente que não é válido o principio da superposição da proporcionalidade a tensão aplicada.

Em um sistema linear é válido o princípio da superposição. Neste caso aplicando-se somente uma entrada $v_1(t)$ obtém-se como resposta uma saída $i_1(t)$, e depois para outra entrada $v_2(t)$ obtém-se como resposta uma saída $i_2(t)$. Ao se aplicar simultaneamente uma entrada v_3, igual a soma de $v_1(t)$ mais $v_2(t)$, obtém-se como resposta uma saída i_3, igual a soma de $i_1(t) + i_2(t)$. Um exemplo clássico da aplicação das cargas lineares se refere à Lei de Ohm, em que a corrente elétrica da carga, $i(t)$, é proporcional à razão entre tensão aplicada, $v(t)$, e sua impedância, $z(t)$.

Em um sistema não linear não se aplica o princípio da superposição e, neste caso, a soma das correntes de duas cargas não lineares em paralelo alimentadas por uma forma de onda de tensão será diferente da soma das correntes destas cargas alimentadas individualmente pela mesma forma de onda de tensão. Isso decorre devido ao fato de que há uma distorção na forma de onda da resposta, pois seu formato é modificado em relação à excitação.

A Figura A1 a seguir ilustra estes conceitos, mostrando as variações de tensão e corrente, para o caso em que uma tensão senoidal é aplicada a um resistor não linear. Pela observação do gráfico *V* x *I* nota-se que um incremento na tensão não resulta num aumento proporcional da corrente.

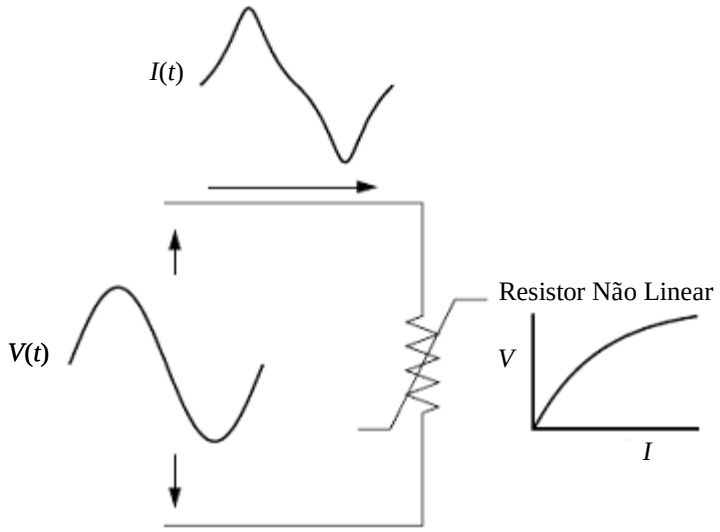


Figura A1. Distorção de corrente causada por um resistor não linear.

Contudo, num processo de conversão de potência se deseja obter menores perdas e altas eficiências visando reduzir o custo da energia despendida e facilitar a remoção do calor gerado pela energia dissipada. Há que se considerar também a redução do peso e tamanho com a conseqüentemente diminuição do custo. Com este objetivo, a eletrônica de potência, por meio do uso de semicondutores, a exemplo dos diodos e transistores, disponibilizou diversos equipamentos que permitem controlar, por exemplo, o fluxo luminoso e a velocidade de motores, fazendo com que a maior parte da energia elétrica passe por um dispositivo de eletrônica de potência antes de ser utilizada. Estes

dispositivos funcionam basicamente em dois estados: de condução e bloqueio. No estado de condução o dispositivo permite a passagem da corrente, enquanto no segundo, bloqueia a sua passagem. Assim, a tensão na carga é interrompida pelos semicondutores e a corrente se anula em determinados intervalos de tempo, deixando de ser senoidal. A circulação de correntes não senoidais através do circuito resulta na distorção harmônica devida à carga não linear.

A.2. Circuitos Elétricos com Formas de Ondas de Tensão e Corrente Senoidais

Nas definições a seguir as letras minúsculas serão usadas para representar valores de quantidades instantâneas, que podem variam como função do tempo, enquanto as letras maiúsculas, para representar o valor eficaz ou o médio. Considerando um circuito na condição do estado permanente, ou seja, um circuito em que as formas de onda se repetem num dado período *T*, que depende da natureza específica deste circuito, teremos a potência instantânea fluindo da fonte para a carga dada por (MOHAN *et al.*, 2003):

$$p\,(t) = vi \qquad \text{A1}$$

em que *v* e *i* variam como função do tempo. Se as formas de onda de *v* e *i*, no estado permanente, se repetirem num período de tempo *T*, o fluxo da potência média pode ser calculado como:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T vi\,dt \qquad \text{A2}$$

O valor eficaz, ou valor médio quadrático, da corrente fundamental é dado por:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_1^2\,dt} \qquad \text{A3}$$

O valor eficaz da tensão também é obtido de modo análogo. Para á uma carga indutiva sob a condição de regime permanente, com corrente atrasada de um ângulo ϕ da tensão, temos:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \cos \omega t \qquad \text{A4}$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - \phi) \qquad \text{A5}$$

onde V_1 e I_1 são valores eficazes, respectivamente, da tensão e corrente da fundamental .

Como v_1 e i_1 variam senoidalmente no tempo na mesma freqüência, eles podem ser representados por fasores num plano complexo conforme mostrado na Figura A2.

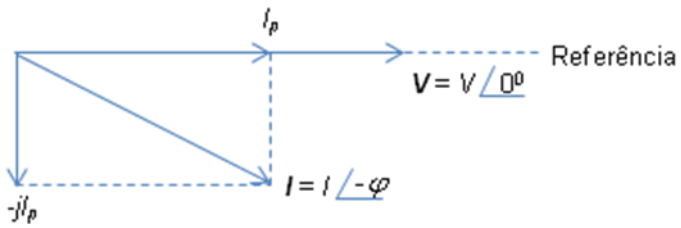


Figura A2. Estado estacionário senoidal.

Sabe-se que por convenção, os fasores[40] rotacionam no sentido contrário aos dos ponteiros do relógio, com velocidade angular ω. Sendo a carga representada por:

$$\boldsymbol{Z} = R + jwL = Ze^{j\phi} \qquad \text{A6}$$

e tomando-se como referência (ângulo de 0º) o fasor tensão $\boldsymbol{V}$ dado por Ve^{j0}, temos que:

$$\boldsymbol{I}_1 = \frac{\boldsymbol{V_1}}{\boldsymbol{Z}} = \frac{Ve^{j0}}{Ze^{j\phi}} = Ie^{-j\phi} \qquad \text{A7}$$

[40] Segundo Leão (2006), um fasor é uma representação gráfica semelhante a um vetor, diferenciando-se por representar grandezas que variam no tempo e no espaço, como por exemplo, as ondas senoidais. Um fasor possui magnitude, dada pelo seu comprimento, e um ângulo, referente à sua posição angular em relação ao eixo horizontal de referência (0º). A partir da referência os ângulos são positivos se medidos no sentido anti-horário e negativos se medidos no sentido anti-horário.

A potência aparente é definida na forma complexa como (MOHAN *et al.*, 2003):

$$\boldsymbol{S_1} = (\boldsymbol{V})(\boldsymbol{I_1})^* = Ve^{j0}.Ie^{j\phi} = Se^{j\phi} \qquad \text{A8}$$

Em conseqüência, a magnitude da potência aparente, cuja unidade é o volt-ampère (VA), é dada por:

$$S_1 = V_1 I_1 \qquad \text{A9}$$

E a potência ativa, P_1, em Watts (W) é obtida da parte real da potência complexa S_1:

$$P_1 = R_e[\boldsymbol{S}_1] = VI \cos \phi \qquad \text{A10}$$

expressa como o produto de $\boldsymbol{V}_1$ pela componente de corrente em fase I_P ($I \cos \phi$), que é a responsável pela transferência de potência por estar em fase com a voltagem no diagrama fasorial da Figura A2*c*. A componente fora de fase é I_q ($I \; sen \; \phi$). As componentes instantâneas de corrente em fase e fora de fase, mostradas na Figura A2*b*, são expressas, respectivamente, por:

$$i_{1p}(t) = \sqrt{2}\, I_{1P} \cos \omega t = \left(\sqrt{2} I_1 \cos \phi\right) \cos \omega t \qquad \text{A11}$$

$$i_{1q}(t) = \sqrt{2} I_{1q} sen\, \omega t = \left(\sqrt{2} I \; sen \phi\right) sen\, \omega t \qquad \text{A12}$$

A potência reativa, que tem por unidade o volt-ampère reativo (var), é dada por:

$$Q_1 = V_1 I_1 \text{ sen } \phi = (V_1)(I_1)_q = ((S_1)^2 - (P_1)^2)^{1/2} \qquad \text{A13}$$

O custo da maioria dos equipamentos elétricos tais como geradores, transformadores e linhas de transmissão, aumenta com a potência aparente, tendo em vista que tanto seus níveis de isolamento elétrico quanto os tamanhos dos núcleos magnéticos dependerem da tensão, assim como o diâmetro do condutor depender da

corrente. No caso de sistemas lineares a medida de como efetivamente a carga demanda potência real é a quantidade definida como fator de potência de deslocamento (fp_{desl}), que é numericamente igual ao coseno do ângulo entre a tensão e a corrente da fundamental:

$$fp_{desl} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{V_1 I_1} = \cos\phi \qquad \text{A14}$$

A.3. Circuitos com Distorção e sua Representação por Série de Fourier

Em geral, a corrente da rede solicitada por um equipamento de eletrônica de potência é altamente distorcida,. No estado permanente, tais formas de onda de repetem num período T e numa freqüência f ($1/T = \omega/2\pi$). Esta freqüência de repetição é chamada de freqüência fundamental, geralmente designada pelo subscrito 1. Em adição a componente dominante na freqüência fundamental, as formas de ondas distorcidas contêm componentes em freqüências indesejáveis que são múltiplas (harmônicas) da freqüência fundamental. Estas componentes podem ser determinadas pela análise da Série de Fourier

Uma função *f(t)* periódica e distorcida pode ser expressa por meio do uso da série de Fourier como uma soma de ondas senoidais puras, em que a freqüência de cada senoide é um múltiplo inteiro da freqüência fundamental da onda distorcida, além de uma componente de freqüência zero, tendo cada qual uma dada amplitude e fase. Matematicamente, teremos (LATHI, 1979):

$$\begin{aligned} f(t) = a_0 + a_1 \cos\omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \ldots + a_n \cos h\omega_0 t \\ + b_1 \cos\omega_0 t + b_2 \cos 2\omega_0 t + b_n \cos h\omega_0 t + \ldots \end{aligned} \qquad \text{A.15}$$

em que:

$$\left(t_0 < t < t_0 + \frac{2\pi}{\omega_0} \right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

fazendo $\frac{2\pi}{\omega_0} = T$,

obtemos:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos h\omega_0 t + b_n senh\omega_0 t) \qquad (t_0 < t < t_0 + T) \qquad \text{A.16}$$

mas, temos que:

$$a_n = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} f(t)\cosh \omega_0 t dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} \cos^2 h\omega_0 t dt} \qquad \text{A.17}$$

$$b_n = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} f(t) senh\omega_0 t dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} sen^2 h\omega_0 t dt} \qquad \text{A.18}$$

fazendo $h = 0$ em A.16, obteremos:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{(t_0+T)} f(t)\,dt \text{, valor médio da função} \qquad \text{A.19}$$

como

$$\int_{t_0}^{(t_0+T)} \cos^2 h\omega_0 t\ dt = \int_{t_0}^{(t_0+T)} sen^2 h\omega_0 t\ dt = \frac{T}{2} \qquad \text{A.20}$$

chegamos a:

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} f(t)\cos h\omega_0 t dt \qquad \text{A.21}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} f(t) senh\omega_0 t dt \qquad \text{A.22}$$

a_0 é o termo de amplitude contínua (CC) de *f(t)* no intervalo considerado. A série trigonométrica também pode ser representada na forma compacta por:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_h \cos(h\omega_0 t + \phi_h) = c_0 \cos\phi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(h\omega_0 t + \phi_n),\ \phi_n = -\tan^{-1}(b_h / a_h) \qquad \text{A.23}$$

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \qquad \text{A.24}$$

De forma análoga, esta mesma função *f(t)* pode ser representada por uma série exponencial de Fourier na forma:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jh\omega_o t} \qquad (t_0 < t < t_0 + T) \qquad \text{A.25}$$

onde:

$$F_h = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt \qquad \text{A.26}$$

E o valor eficaz ou valor médio quadrático (*root mean square - rms*) de uma forma de onda periódica é definido como:

$$F_{rms} = \left(\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt\right)^{1/2} = \left(a_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{a_h^2}{2}\right)^{1/2} = \left(\sum_{h=0}^{\infty} \frac{a_h^2}{2} rms\right)^{1/2} \qquad \text{A.27}$$

A.4. Potência sob Condições Não-Senoidais

Duas importantes aproximações para as definições de potências em ambientes não senoidais foram introduzidas: uma no domínio do tempo, proposta por *FRYZE* (1932), e outra no domínio da freqüência, introduzida por *BUDEANU* (1927). Em 2000 novas definições de potências em ambientes não senoidais foram definidas pela norma IEEE 1459:2000 (IEEE 1459, 2000).

A.4.1. Potência no Domínio da Freqüência.

Para um circuito monofásico em corrente alternada com uma carga e fonte genéricas, na condição de regime permanente, suas formas de onda de tensão e corrente podem ser decompostas numa Série de Fourier (AREDES, 1996).

A potência aparente, S, é definida como

$$S = VI \qquad \text{A.28}$$

Nota-se que a potência aparente conforme definida por Budeanu é idêntica à potência aparente em condições puramente senoidais, mas será maior quando da presença de distorções harmônicas. A potência aparente se aplica às condições senoidais e não senodais, em que V e I representam, respectivamente, o valor eficaz da tensão e corrente, determinado por:

$$V = \sqrt{\tfrac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} = \sqrt{\sum_h v_h^2} \qquad \text{A.29}$$

$$I = \sqrt{\tfrac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\sum_h i_h^2} \qquad \text{A.30}$$

v_h e i_h correspondem ao valor eficaz do n_{th} harmônico e T ao período da componente fundamental.

A potência ativa, P, é dada pelo somatório de todos componentes em freqüência que produzem trabalho útil:

$$P = \sum_h P_h = \sum V_h I_h \cos\phi_h \qquad \text{A.31}$$

ϕ_h - ângulo entre a componente de tensão e a componente de corrente de ordem h.

De forma semelhante, a potência reativa, Q_B, definida por Budeanu é dada pelo somatório de todos componentes em freqüência que não produzem trabalho útil:

$$Q_B = \sum_h Q_h = \sum V_h I_h \sin\phi_h \qquad \text{A.32}$$

A potência de distorção foi definida Budeanu como:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \qquad \text{A.33}$$

Finalmente, a partir de A.31, A.32 e A.33, pode-se se calcular a potência aparente por meio de:

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \qquad \text{A.34}$$

A potência de distorção representa o produto cruzado entre tensões e correntes harmônicas de diferentes ordens. A potência ativa P, é medida em Watts e determinada pelo valor médio do produto entre a tensão e a corrente instantâneas, ou seja, é o valor médio das energias ativas instantâneas. Comumente se refere à potência média ou potência real e representa a potência útil despendida pela carga para realizar um trabalho real, ou seja, converter energia elétrica em outras formas de energia. Em termos de energia elétrica um trabalho real é efetuado pela porção de corrente que está em fase com a tensão. Nenhum trabalho será resultado da porção de corrente que não está em fase com a tensão. Assim, enquanto a potência ativa, a única que possui um significado claro, representa a taxa média de energia transferida entre dois subsistemas elétricos, as potências reativa e harmônica são formulações matemáticas.

A.4.2. Potência no Domínio do Tempo

Uma característica interessante desta proposta de *Fryze* é a ausência da análise de Fourier, dispensando, pois, equipamentos como o espectro analisador para realizar medições. Dessa forma teremos (AREDES, 2006):

A potência ativa, *P*, é determinada como:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^t p(t)dt = \qquad \text{A.35}$$

A potência aparente é dada por:

$$P = VI \qquad \text{A.36}$$

E a potência reativa é obtida por meio de:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \qquad \text{A.37}$$

A definição de potência reativa de *Fryze* compreende todas as porções de voltagem e corrente que não contribuem para a potência ativa *P*. Fryze ainda definiu o fator de potência, *fp*, como:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} \qquad \text{A.38}$$

De acordo com *Fryze*, o fator de potência, *fp*, atinge seu máximo (*fp* = 1) se, e somente se, tanto a corrente quanto a tensão instantâneas forem proporcionais. Caso contrário, o *fp* é inferior a unidade. Contudo, sob condições não-senoidais, o fato de se ter correntes proporcionais às tensões não assegura um fluxo ótimo de potência sob o ponto de vista da conversão eletromecânica de energia, tendo em que componentes

harmônicos de tensão podem resultar em perdas elétricas nos motores CA. Se os conceitos definidos anteriormente forem aplicados na análise de sistemas trifásicos, eles conduzem a casos onde a potência ativa instantânea trifásica contém uma componente oscilante, mesmo quando tensões e corrente são proporcionais (*fp* = 1). Esta potência elétrica oscilante causa vibração mecânica nas máquinas elétricas.

A.4.3. Definições da Norma IEEE 1459

Em 2000, a padronização IEEE Std-1459:2000 pelo "IEEE Working Group on Sinusoidal Situations: Effects on Metre Performance and Definition Power" propos novas definições de potência em condições senoidais, não-senoidais, equilibradas ou desequilibradas, tendo como ponto inicial a distinção dos valores das componentes harmônicas de tensão (V_1) e corrente (I_1) dos termos residuais de todos os componentes harmônicos::

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 = V_1^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \qquad \text{A.39}$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \qquad \text{A.40}$$

Dessa forma, a potência ativa é definida como:

$$P = P_1 + P_H = V_1 \, I_1 \cos\phi_1 + \sum_{k \neq 1} V_h I_h \cos\phi_h \qquad \text{A.41}$$

P – potência ativa da componente fundamental;

P_H – potência ativa das componentes harmônicas;

$cos\phi_1$ - ângulo entre as componentes de tensão e de corrente fundamental;

$cos\phi_h$ - ângulo entre as componentes de tensão e de corrente de ordem *h*.

A potência aparente é definida por:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \qquad \text{A.42}$$

A potência aparente é subdividida em potência aparente fundamental (S_1) e potência aparente não-fundamental (S_N), respectivamente, de acordo com as seguintes equações:

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 \qquad \text{A.43}$$

$$S_N^2 = S^2 - S^1 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \qquad \text{A.44}$$

O primeiro, o segundo e o terceiro termo da Equação A.44 são definidos, respectivamente, como potência de distorção da corrente (D_I), potência de distorção da tensão (D_V) e potência aparente harmônica (S_H)

Também foi definida a potência de distorção harmônica como:

$$D_H = \sqrt{S_H^2 + P_H^2} \qquad \text{A.45}$$

Definiu-se ainda o conceito de potência não ativa por meio de A.46:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Nota-se que a potência não ativa definida aqui coincide com a definição de Fryze para a potência reativa, Q_F, dada pela Equação A.37. O fator de potência, *pf*, e o fator de potência da fundamental, fp_1,são definidos, respectivamente, por:

$$fp = \frac{P}{S} \qquad \text{A.38}$$

$$fp_1 = \frac{P_1}{S_1} \qquad \text{A.38}$$

A diferença marcante das definições da IEEE Std.1459-2000, daquelas apresentadas por Budeanu e Fryze, se refere ao fato de que a primeira distingue as componentes fundamentais P_1 e Q_1 das demais componentes da potência aparente, sendo a medição de energia para tarifação o foco destas novas definições (SUHET, 2008). De acordo com esta referência, estas novas definições apresentadas pelo IEEE têm o intuito de separar os fenômenos presentes em sistemas com distorções harmônicas, como meio de disponibilizar os meios necessários para a análise tanto da QEE fornecida ao consumidor quanto a forma com que o consumidor utiliza esta energia.

Apêndice B

Componentes de Sequência

B.1 Componentes Ímpares, Pares e Contínua

Quando a área sob a curva de uma função senoidal no semiciclo positivo é igual a área sob a curva de seu semiciclo negativo, obtém-se como resultando uma componente de valor médio ou CC[41] nulo. Neste caso, há uma simetria da função senoidal em relação ao eixo das abscissas. Uma forma de onda que não tem simetria em relação ao eixo das abscissas, como a mostrada na Figura B.1, tem a área do semiciclo

[41] Valor médio ou DC de uma função é dada por $a_0 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} f(t)dt$.

positivo diferente da área do semiciclo negativo, originando componentes harmônicos pares em sua decomposição.

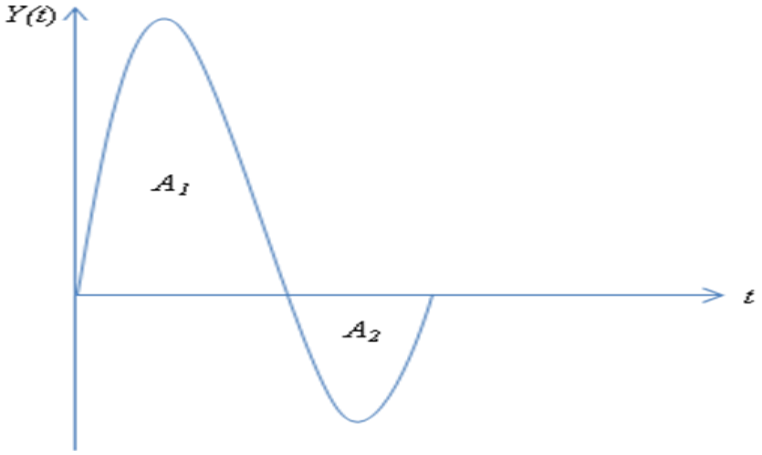


Figura. B1. Forma de Onda com Diferentes Áreas nos Semiciclos Positivo e Negativo.

Conforme pode se observar na Figura B.1, como resultado de formas de onda com a presença de conteúdo de harmônicas pares está a existência da componente contínua da onda, ou seja, haverá um valor médio diferente de zero para a função no intervalo considerado. A decomposição desta onda em seus harmônicos será matematicamente (CPFL, 2006) dada por:

$$y(t) = a_0 + y_1 \, sen\,(\omega t + \varphi_1) + y_2 \, sen\,(\omega t + \varphi_2) + \ldots\, y_n \, sen\,(\omega t + \varphi_n) \qquad \text{B.1}$$

onde

a_0 – componente contínua (CC) da onda $y(t)$

sendo que as amplitudes de cada componente teoricamente são dadas por:

$$y_2 = y_1/2; \qquad y_3 = y_1/3; \qquad y_4 = y_1/4; \qquad y_n = y_1/n \qquad \text{B.2}$$

Nota-se pela Eq. B.2 que a amplitude das diversas componentes harmônicas (1, 2, 3,...) decresce com o aumento da freqüência.

Quando ambos os semiciclos positivo e negativo de uma onda têm formas idênticas, a série de Fourier contem somente harmônicos ímpares. Como a grande maioria dos dispositivos produzem os mesmos harmônicos em ambas as polaridades, as componentes ímpares estarão presentes nas ondas de tensão e corrente destas cargas não lineares, mas não as pares (DUGAN *et al*., 2006).

B.2 Componentes de Sequência

Uma bobina girando com velocidade angular constante, no interior de um campo magnético uniforme, tem em seus terminais uma tensão senoidal expressa por (ROBBA, 1972):

$$v(t) = V_M \, sen(\omega t + \varphi) \qquad \text{B.3}$$

onde

$v(t)$ – tensão instantânea;
V_M – tensão máxima;
ω - velocidade angular constante = $2\pi f$;
f – freqüência;
φ - ângulo formado pela direção da bobina com a origem dos tempos em $t = 0$.

Quando são colocadas sobre o mesmo eixo três bobinas deslocadas entre si de 120º, em que o conjunto gira com velocidade angular constante, no interior de um campo magnético uniforme, surgirão em seus terminais um sistema de tensões de mesmo valor máximo, mas defasadas entre si de 120º. Vê-se que para as grandezas elétricas que caracterizam um sistema trifásico há uma rotação de ±120º. Neste caso definimos um operador que aplicado a um fasor[42] resulte em tal rotação de fase:

[42] Segundo Leão (2006), um fasor é uma representação gráfica semelhante a um vetor, diferenciando-se por representar grandezas que variam no tempo e no espaço, como por exemplo, as ondas senoidais. Um fasor possui magnitude, dada pelo seu comprimento, e um ângulo, referente à sua posição angular em relação ao eixo horizontal de referência (0º). A partir da referência os ângulos são positivos se medidos no sentido anti-horário e negativos se medidos no sentido horário.

$$\alpha = 1\angle 120^{o} \qquad \text{B.4}$$

ou seja, α, é um fasor de módulo unitário e argumento igual a 120º, tal que aplicado a um fasor qualquer, resulta em outro fasor de mesmo módulo, porém adiantado de 120º. Se o operador α for aplicado a um fasor duas vezes sucessivamente, o fasor é rotacionado em 240º, e, se aplicado novamente provoca uma rotação neste fasor de 360º. Daí:

$$\alpha^{2} = 1\angle 240^{o} \qquad \text{B.5}$$

$$\alpha^{3} = 1\angle 360^{o} \qquad \text{B.6}$$

A seqüência de fases, um conjunto ordenado de três fasores, de um sistema polifásico simétrico é definida, então, como a ordem pela qual as tensões das fases passam pelo seu valor máximo. Assim, a seqüência de fases A-B-C, onde as tensões passam consecutivamente pelo máximo na ordem A-B-C, é chamada de seqüência direta ou positiva, enquanto a seqüência A-C-B, em que as tensões passam consecutivamente pelo máximo na ordem A-C-B, de seqüência inversa ou negativa.

Os sistemas elétricos de potência são alimentados por geradores trifásicos que, geralmente, suprem cargas trifásicas equilibradas, ou seja, cargas com impedâncias idênticas em todas as três fases. Nas situações em que o circuito apresenta desequilíbrios, caso dos circuitos de distribuição com cargas monofásicas desbalanceadas, assim como nas ocorrências de faltas, tais como em curto-circuitos, uma das mais poderosas ferramentas é o trabalho desenvolvido por FONTESCUE (1918). Este trabalho provou que um circuito de *n* fasores desequilibrados pode ser decomposto em *n* sistemas de fasores balanceados chamados de componentes simétricas dos fasores originais. Entretanto, no presente caso limitaremos tal questão ao sistema trifásico (n = 3), conforme a Figura B.2.

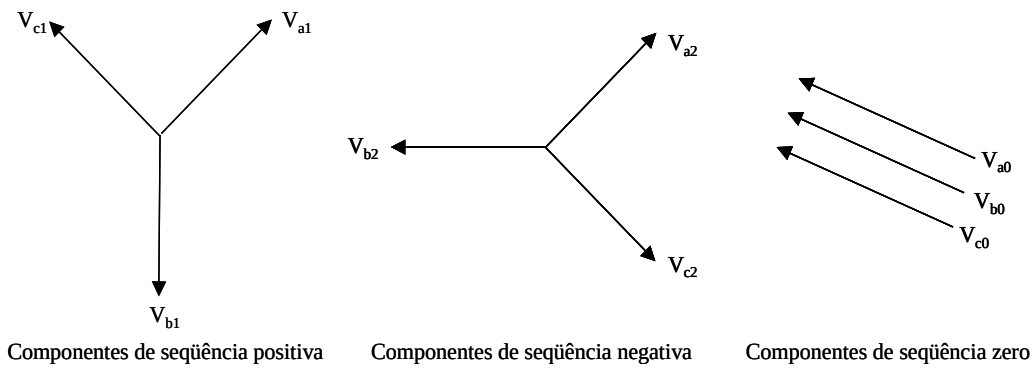


Figura B.2. Sistemas de seqüências positiva, negativa e zero.

Considerando os fasores como tensões, de acordo com o Teorema de Fontescue, os três fasores desbanceados V_a, V_b, V_c, de um sistema trifásico podem ser decompostos em três sistemas equilibrados, em que o conjunto de componentes equilibrados são (STEVENSON, 1982):

- componentes de seqüência positiva, V_1, consistindo de um conjunto de três fasores iguais em magnitude (mesmo modulo ou amplitude), defasados entre si de 120º, tendo seqüência de fase idêntica a do sistema de fasores originais;
- componentes de seqüência negativa, V_2, contendo um conjunto de três fasores iguais em magnitude, defasados entre si de 120º, com seqüência de fase contrária a do sistema original de fasores;.
- componentes de seqüência zero, V_0, possuindo um conjunto de três fasores de mesma magnitude, em fase, ou seja, deslocamento nulo entre cada eles. Assim, as componentes de seqüência positiva de V_a, V_b, V_c, são V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}. De modo análogo, as componentes de seqüência negativa são V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}, e as componentes de seqüência zero são V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}.

Como os fasores originais desequilibrados são a soma de suas componentes, os fasores originais expressos em termo de suas componentes simétricas são:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad \text{B.7}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \qquad \text{B.8}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \qquad \text{B.9}$$

observando a Figura B.2, verificamos as seguintes relações:

$$V_{b1} = \alpha^2 V_{a1} \qquad V_{c1} = \alpha V_{a1}$$
$$V_{b2} = \alpha V_{a1} \qquad V_{c1} = \alpha^2 V_{a1} \qquad \text{B.10}$$
$$V_{b0} = V_{a0} \qquad V_{c0} = V_{a0}$$

repetindo a equação B.7 e substituindo as equações B.10 nas equações B.8 e B.9, resultará em:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad \text{B.11}$$

$$V_b = \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} + V_{a0} \qquad \text{B.12}$$

$$V_c = \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} + V_{a0} \qquad \text{B.13}$$

que na forma matricial pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \qquad \text{B.14}$$

em que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \qquad \text{B.15}$$

fazendo a operação de inversão de matrizes, obtém-se:

$$A^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \qquad \text{B.16}$$

pré-multiplicando ambos os lados da equação B.14, resulta em:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \qquad \text{B.17}$$

mostrando a solução dos três fasores desequilibrados em seus componentes simétricos. Dada a importância desta relação, esta pode ser reescrita na forma:

$$V_{a0} = 1/3\ (V_a + V_b + V_c) \qquad \text{B.18}$$

$$V_b = 1/3(V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \qquad \text{B.19}$$

$$V_c = 1/3(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c) \qquad \text{B.20}$$

Desenvolvendo de forma análoga as mesmas relações para os fasores correntes, chega-se a:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \qquad \text{B.21}$$

$$I_b = \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} \qquad \text{B.22}$$

$$I_c = \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} + I_{a0} \qquad \text{B.23}$$

$$I_{a0} = 1/3\ (I_a + I_b + I_c) \qquad \text{B.24}$$

$$I_{a1} = 1/3(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \qquad \text{B.25}$$

$$I_{a2} = 1/3(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \qquad \text{B.26}$$

Como em um sistema trifásico a soma das correntes de linha é igual a soma da corrente I_n no caminho de retorno através do neutro, tem-se:

$$I_a + I_b + I_c = I_n \qquad \text{B.27}$$

Comparando-se as equações B.24 e B.27, conclui-se que:

$$I_n = 3I_{a0} \qquad \text{B.28}$$

ou seja, a corrente de neutro é três vezes a componente de seqüência zero. Por outro lado, as equações B.18 e B.28 mostram que as componentes de seqüência zero existem se a soma dos fasores desequilibrados não é nula. A Figura B.3 ilustra esta condição para um sistema com cargas monofásicas perfeitamente equilibradas, em que se assume que as componentes fundamental e de 3^0 harmônico estão presentes.

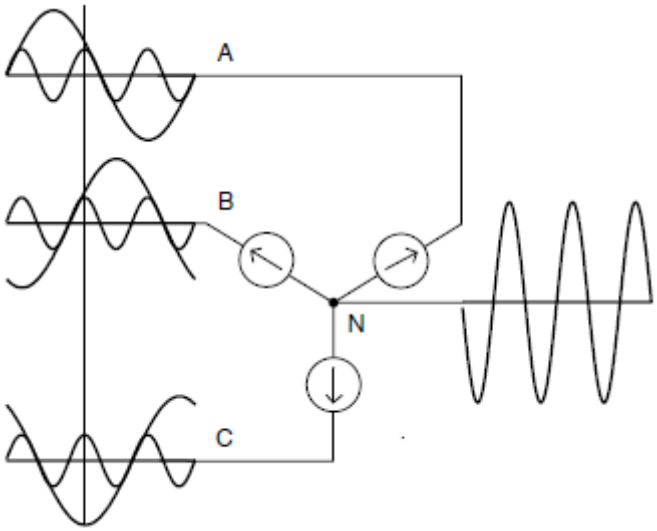


Figura B.3. Aumento da Corrente de Neutro em Circuitos com Cargas Monofásicas Não Lineares.

Na Figura B.3 é nulo o somatório das componentes da corrente fundamental no nó N, mas as components de 3ª harmônica são 3 (três) vezes o valor das correntes de fase como resultado de coincidirem na fase a angular e no tempo (DUGAN *et al*, 2006).

As distorções de corrente e/ou tensão em um sistema trifásico podem ser equilibradas ou desequilibradas. Para um sistema trifásico com uma distorção equilibrada na corrente, as formas de onda das correntes distorcidas se apresentam de maneira idêntica em todas as três fases, mas defasadas entre si de 120º. Considerando um sistema trifásico simétrico e equilibrado, em que as tensões e correntes possuem amplitudes idênticas e no sentido positivo, defasadas entre si de 120º, as expressões genéricas para as três fases, de uma forma de onda de corrente com uma determinada distorção, serão dadas por:

$$I_a(t) = I_1\, sen\,(\omega t + \varphi_1) + I_2\, sen\,(2\omega t + \varphi_2) + I_3\, sen\,(3\omega t + \varphi_3) + I_4\, sen\,(4\omega t + \varphi_4) + \\ + I_5\, sen\,(5\omega t + \varphi_5) + I_6\, sen\,(6\omega t + \varphi_6) + I_7\, sen\,(7\omega t + \varphi_7) + \ldots \qquad \text{B.29}$$

$$I_b(t) = I_1\, sen\,(\omega t - 120 + \varphi_1) + I_2\, sen\,[(2(\omega t - 120) + \varphi_2] + I_3\, sen\,[(3(\omega t - 120) + \varphi_3] + \\ I_4\, sen\,[4(\omega t - 120) + \varphi_4] + I_5\, sen\,[5(\omega t - 120) + \varphi_5)] + \\ + I_6\, sen\,[(6\omega t - 120) + \varphi_6] + I_7\, sen\,(7\omega t - 120) + \varphi_7]$$

$$I_b(t) = I_1\, sen\,(\omega t - 120 + \varphi_1) + I_2\, sen\,(2\omega t + 120 + \varphi_2) + I_3\, sen\,(3\omega t + \varphi_3) + \\ + I_4\, sen\,(4\omega t - 120 + \varphi_4) + I_5\, sen\,(5\omega t + 120 + \varphi_5) + \\ + I_6\, sen\,(6\omega t + \varphi_6) + I_7\, sen\,(7\omega t - 120 + \varphi_7) + \ldots \qquad \text{B.30}$$

$$I_c(t) = I_1\, sen\,(\omega t + 120 + \varphi_1) + I_2\, sen\,[(2(\omega t + 120) + \varphi_2] + I_3\, sen\,[(3(\omega t + 120) + \varphi_3] + \\ I_4\, sen\,[4(\omega t + 120) + \varphi_4] + I_5\, sen\,[5(\omega t + 120) + \varphi_5)] + \\ + I_6\, sen\,[(6\omega t + 120) + \varphi_6] + I_7\, sen\,(7\omega t + 120) + \varphi_7]$$

$$I_c(t) = I_1\, sen\,(\omega t + 120 + \varphi_1) + I_2\, sen\,(2\omega t - 120 + \varphi_2) + I_3\, sen\,(3\omega t + \varphi_3) + \\ + I_4\, sen\,(4\omega t + 120 + \varphi_4) + I_5\, sen\,(5\omega t - 120 + \varphi_5) + I_6\, sen\,(6\omega t + \varphi_6) + \\ + I_7\, sen\,(7\omega t + 120 + \varphi_7) + \ldots \qquad \text{B.31}$$

Estes resultados podem ser sumarizados na Tabela B.1.

Tabela B1. Componentes de Sequencias Harmônicas

Ordem Harmônica	Correntes por Fase A	B	C
1ª	$I_1\ sen(\omega t + \varphi_1)$	$I_1\ sen(\omega t - 120 + \varphi_1)$	$I_1\ sen(\omega t + 120 + \varphi_1)$
2ª	$I_2\ sen(2\omega t + \varphi_2)$	$I_2\ sen(2\omega t + 120 + \varphi_2)$	$I_2\ sen(2\omega t - 120 + \varphi_2)$
3ª	$I_3\ sen(3\omega t + \varphi_3)$	$I_3\ sen(3\omega t + \varphi_3)$	$I_3\ sen(3\omega t + \varphi_3)$
4ª	$I_4\ sen(4\omega t + \varphi_4)$	$I_4\ sen(4\omega t - 120 + \varphi_4)$	$I_4\ sen(4\omega t + 120 + \varphi_4)$
5ª	$I_5\ sen(5\omega t + \varphi_5)$	$I_5\ sen(5\omega t + 120 + \varphi_5)$	$I_5\ sen(5\omega t - 120 + \varphi_5)$
6ª	$I_6\ sen(6\omega t + \varphi_6)$	$I_6\ sen(6\omega t + \varphi_6)$	$I_6\ sen(6\omega t + \varphi_6)$
7ª	$I_7\ sen(7\omega t + \varphi_7)$	$I_7\ sen(7\omega t - 120 + \varphi_7)$	$I_7\ sen(7\omega t + 120 + \varphi_7)$
8ª	...	...	...
9ª	...	...	...
10ª	...	...	...

Tomando-se por definição as componentes fundamentais como de seqüência positiva, pode-se observar que 4ª, 7ª, 10ª,..., harmônicas subtraem 120º de seus argumentos, sendo também de seqüência positiva, enquanto a 2ª, 5ª, 8ª,...., somam 120º aos seus argumentos, configurando-se como harmônicas de seqüência negativa. Já as harmônicas múltiplas de três, 3ª, 6ª, 9ª,..., que não possuem defasamento angular nas três fases, são conhecidas como harmônicas de seqüência zero.

Apêndice C

Ressonância

Todos os circuitos contendo capacitâncias e indutâncias têm uma ou mais freqüências naturais. Quando uma destas freqüências se igualam às freqüências produzidas pelo sistema de potência, pode ser desenvolvido o efeito ressonância. Isto ocorre quando em um circuito, constituído de elementos indutivos e capacitivos, a reatância capacitiva[43], X_C, se iguala a reatância indutiva[44], X_L. Nesta condição, a impedância neste ponto do circuito pode ser, em função do seu arranjo elétrico, extremamente baixa ou muito alta, ocasionando níveis de tensão e corrente bastante elevados, impondo ao sistema condições danosas a sua operação. Analisando-se a barra

[43] $X_C = 1/\omega C$, em que $\omega = 2\pi f$ e C é a capacitância.
[44] $X_L = \omega L$, em que $\omega = 2\pi f$ e L é a indutância.

de uma carga geradora de harmônicos, podemos afirmar que se a impedância equivalente desta barra for baixa, as reatâncias estão em série, e se a impedância for elevada, as reatâncias estão em paralelo (CPFL, 2006).

C.1 Ressonância Paralela

A Figura C.1 mostra um sistema de distribuição com problemas potenciais de ressonância paralela.

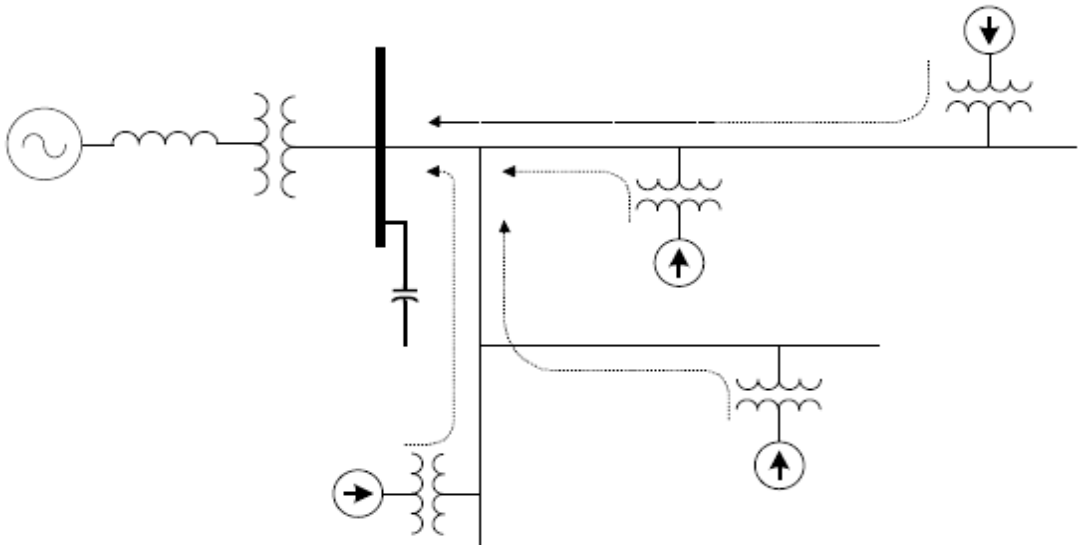


Figura C.1. Sistema com potenciais problemas de ressonância paralela.

De acordo com a representação simplificada do circuito de distribuição mostrada na Figura C.2*a*, sob a perspectiva da fonte de harmônicos o capacitor está em paralelo com a indutância do sistema. A Figura C.2*b* mostra que na freqüência de ressonância a impedância equivalente, obtida pela combinação das indutâncias e capacitâncias, vista pela fonte de harmônicos torna-se muito grande, ou seja,

$$Z_P = \frac{X_C(X_{Leq}+R)}{X_C+X_{Leq}+R} = \frac{X_C(X_{Leq}+R)}{R} = \frac{X_{Leq}^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = QX_{Leq} = Q\,X_C \qquad \text{C.1}$$

$$Q = X_{Leq}/R = X_C/R, \qquad R << X_{Leq} \qquad \text{C.2}$$

Cabe notar na Figura C.2b, que para a fonte de harmônicos, na condição de ressonância, a tensão do gerador do sistema de potência é nula, haja vista a tensão de fornecimento ter sido considerada somente na freqüência fundamental. Assim, na freqüência de ressonância uma pequena corrente harmônica pode ocasionar uma elevada queda de tensão na impedância aparente, ou seja:

$$V_P = QX_{Leq}I_h \qquad \text{C.3}$$

Assim, a tensão nos terminais do banco de capacitores será intensificada e altamente distorcida.

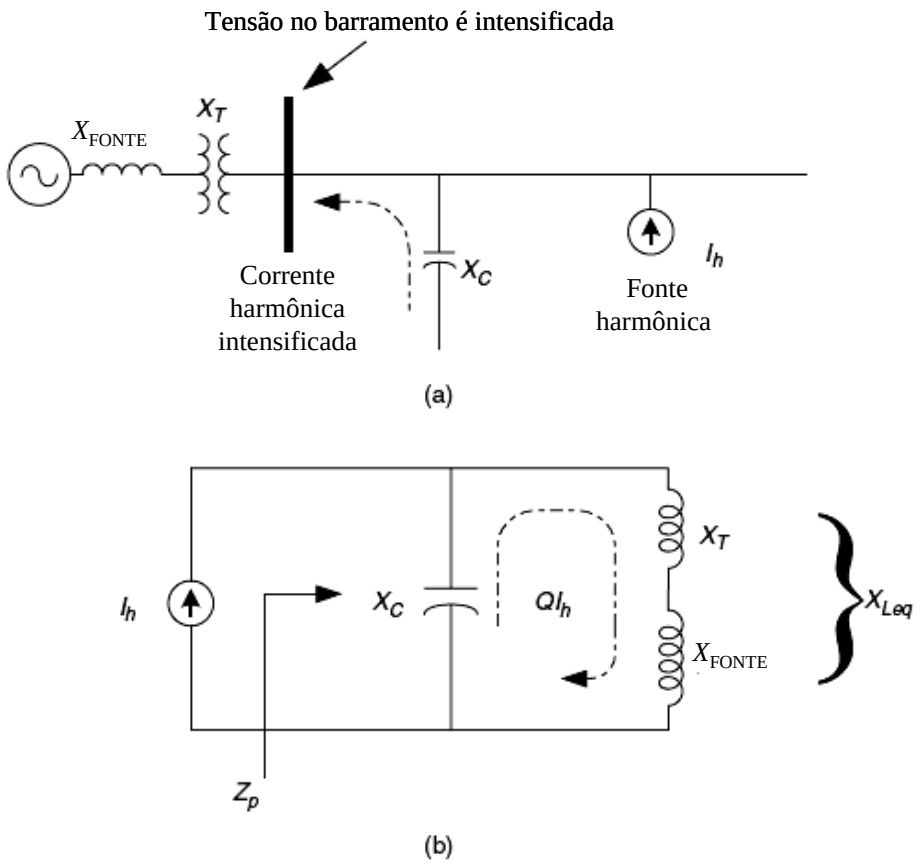


Figura C.2. Representação do banco de capacitores em paralelo com a indutância do sistema nas freqüências harmônicas. (*a*) Circuito de distribuição simplificado. (*b*) Circuito em paralelo ressonante visto pela fonte de harmônicos.

A corrente fluindo no banco de capacitores ou no transformador do sistema de potência, na condição de ressonância, será intensificada *Q* vezes, pois:

$$I_{ressonância} = \frac{V_P}{X_C} = \frac{QX_C I_h}{X_C} = QI_h \qquad \text{C.4}$$

$$I_{ressonância} = \frac{V_P}{X_L} = \frac{QX_L I_h}{X_L} = QI_h \qquad \text{C.5}$$

Este fenômeno acarretará danos ao banco de capacitor, queima dos fusíveis ou sobreaquecimento do transformador.

C.2. Ressonância Série

Existem situações em que um capacitor e a indutância de um transformador ou da linha de distribuição podem ser "vistos" pela fonte de harmônicos como um circuito *LC* série. Se a freqüência de ressonância corresponder à freqüência harmônica característica da carga não linear, este circuito *LC* atrairá uma grande parte da corrente harmônica que é gerada no circuito de distribuição. Um consumidor que não possui carga não linear, mas utiliza bancos de capacitores para correção do fator de potência, pode desta maneira ser afetado pela alta distorção de tensão harmônica devido à fonte de harmônicos da vizinhança. A Figura C.3 mostra esta situação.

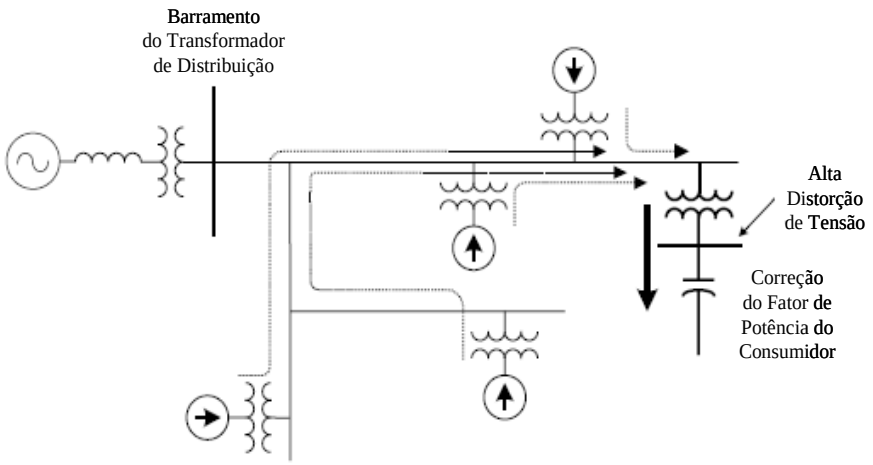


Figura C.3. Sistema com potenciais problemas de ressonância série.

Durante a ressonância, o capacitor para correção do fator de potência forma um circuito série com o transformador e as fontes harmônicas. A fonte harmônica mostrada no circuito simplificado (Figura C.4) representa os harmônicos produzidas por outras cargas. A indutância do transformador em série com o banco de capacitores é muito pequena (praticamente zero), ficando a impedância praticamente limitada pela resistência do transformador. Conseqüentemente, a corrente harmônica correspondente à freqüência de ressonância fluirá facilmente neste circuito. A tensão nos terminais do banco de capacitor para correção do fator de potência será intensificada e altamente distorcida, conforme demonstra a seguinte equação:

$$V_C = \frac{X_C}{X_C + X_T + R} V_h \approx \frac{X_C}{R} V_h \qquad \text{C.6}$$

em que V_h é a tensão harmônica que corresponde à corrente harmônica I_h e V_C é a tensão harmônica nos terminais do banco de capacitores.

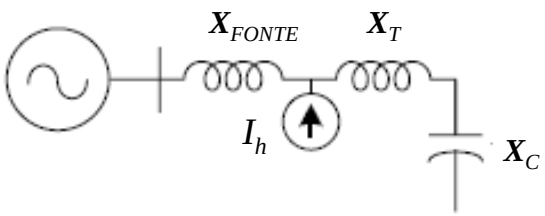


Figura C.4. Circuito equivalente para ressonância série.

Apêndice D

Potência Ativa

A Tabela D1 mostra, para o ano de 1997, a potência ativa (W) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA) para 141 consumidores com TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D1. Potência Ativa (W) Estimada no Secundário do Transformador Para TVs de 141 Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	1.838	2.256	2.278	1.601	1.789	368	3.440	4.045	2.645
1	1.110	1.491	1.535	948	1.287	204	2.058	2.779	1.740
2	243	515	918	359	366	0	602	881	918
3	15	120	46	41	0	0	56	120	46
4	15	30	46	41	0	0	56	30	46
5	34	30	46	41	0	0	76	30	46
6	110	15	81	254	196	115	364	210	197
7	480	339	353	1.649	1.307	1.567	2.129	1.646	1.921
8	1.291	1.195	1.154	1.527	1.381	4.143	2.818	2.576	5.297
9	1.681	1.594	2.243	997	857	4.709	2.677	2.451	6.951
10	1.819	1.974	2.853	1.736	1.495	4.944	3.555	3.469	7.797
11	1.829	2.118	3.079	2.040	1.994	5.016	3.869	4.112	8.095
12	2.954	3.025	3.904	6.205	6.062	6.422	9.158	9.088	10.326
13	3.170	3.280	4.070	6.780	6.629	7.055	9.950	9.909	11.125
14	3.308	3.729	4.452	6.324	6.829	6.905	9.632	10.559	11.357
15	3.050	3.632	4.633	5.504	6.470	6.723	8.554	10.103	11.355
16	2.530	3.648	5.265	4.673	6.479	7.403	7.203	10.127	12.668
17	3.382	4.082	5.555	4.654	6.747	7.924	8.036	10.829	13.478
18	7.478	7.054	7.528	9.344	9.600	9.182	16.822	16.654	16.710
19	8.234	7.713	7.737	11.944	11.473	10.050	20.177	19.186	17.786
20	9.315	8.762	8.391	12.944	12.045	10.763	22.258	20.806	19.154
21	9.309	8.847	8.754	13.543	12.522	11.395	22.851	21.370	20.149
22	8.382	8.123	7.933	13.027	12.186	11.224	21.409	20.309	19.157
23	4.389	4.766	4.842	7.850	8.389	7.671	12.238	13.156	12.514
P	25.026	23.528	23.655	34.231	33.118	29.995	59.258	56.646	53.650
FP	50.939	54.812	64.039	79.794	82.986	93.790	130.732	137.798	157.829
Total	75.965	78.340	87.694	114.025	116.104	123.785	189.990	194.444	211.479

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela D2 mostra, para o ano de 2005, a potência ativa (W) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA) para 141 consumidores com TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos

Tabela D2. Potência Ativa (W) Estimada no Secundário do Transformador Para TVs de 141 Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	1.946	2.548	2.482	1.023	2.620	451	2.970	5.167	2.932
1	902	1.510	1.505	618	1.791	221	1.521	3.301	1.726
2	326	759	656	231	411	0	558	1.169	656
3	14	191	90	25	0	0	39	191	90
4	14	52	90	25	0	0	39	52	90
5	34	52	90	25	0	0	59	52	90
6	132	14	170	203	181	101	335	195	271
7	615	385	463	1.104	1.362	2.129	1.719	1.747	2.593
8	1.743	1.520	1.499	961	1.402	5.033	2.704	2.923	6.532
9	2.181	2.018	2.389	593	857	5.602	2.774	2.875	7.991
10	2.415	2.488	3.115	989	1.348	5.937	3.404	3.836	9.052
11	2.421	2.655	3.462	1.237	1.778	6.080	3.658	4.433	9.542
12	4.015	3.861	4.540	3.493	6.542	7.389	7.508	10.403	11.929
13	4.234	4.261	4.702	3.873	7.108	7.444	8.107	11.368	12.146
14	4.356	4.858	5.281	3.629	6.714	6.745	7.985	11.572	12.026
15	4.063	4.781	5.536	3.086	6.080	6.428	7.149	10.860	11.964
16	3.284	4.714	6.137	2.509	6.007	7.273	5.793	10.721	13.410
17	4.325	5.232	6.592	2.330	6.376	8.006	6.655	11.607	14.599
18	9.479	8.968	9.014	5.178	9.895	9.357	14.658	18.863	18.371
19	10.444	9.785	9.304	6.728	11.803	10.225	17.172	21.588	19.528
20	11.156	10.398	10.103	7.467	12.562	10.982	18.623	22.960	21.085
21	11.096	10.550	10.437	7.807	12.878	11.498	18.903	23.428	21.935
22	10.010	9.750	9.529	7.441	12.440	11.180	17.451	22.190	20.709
23	5.069	5.729	5.761	4.724	8.891	7.860	9.793	14.621	13.621
P	31.080	29.151	28.421	19.373	34.260	30.564	50.453	63.411	58.985
FP	63.197	67.929	74.530	45.927	84.785	99.376	109.124	152.714	173.907
Total	94.277	97.080	102.951	65.300	119.045	129.940	159.577	216.126	232.892

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela D3 mostra, para o ano de 1997, a soma da potência ativa (kW) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), para todos os consumidores das concessionárias e o total do estado, com TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D3. Soma da Potência Ativa (kW) Estimada no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	14.433	17.709	17.883	30.700	34.303	7.050	45.133	52.012	24.934
1	8.715	11.710	12.055	18.181	24.677	3.920	26.896	36.387	15.976
2	1.911	4.046	7.209	6.882	7.015	0	8.793	11.061	7.209
3	114	943	360	791	0	0	905	943	360
4	114	237	360	791	0	0	905	237	360
5	271	237	360	791	0	0	1.061	237	360
6	862	114	640	4.874	3.755	2.206	5.736	3.869	2.845
7	3.769	2.661	2.773	31.621	25.062	30.051	35.390	27.723	32.824
8	10.136	9.380	9.057	29.284	26.478	79.443	39.420	35.858	88.499
9	13.196	12.519	17.607	19.107	16.431	90.280	32.303	28.950	107.887
10	14.281	15.498	22.398	33.284	28.671	94.793	47.565	44.169	117.190
11	14.362	16.631	24.172	39.114	38.232	96.178	53.477	54.863	120.350
12	23.189	23.754	30.651	118.965	116.232	123.140	142.154	139.986	153.791
13	24.890	25.751	31.956	129.995	127.102	135.271	154.885	152.853	167.227
14	25.974	29.279	34.952	121.247	130.940	132.391	147.220	160.220	167.343
15	23.943	28.519	36.372	105.533	124.053	128.894	129.475	152.572	165.267
16	19.866	28.642	41.340	89.590	124.219	141.940	109.456	152.861	183.281
17	26.555	32.052	43.610	89.235	129.362	151.928	115.790	161.414	195.538
18	58.711	55.380	59.101	179.156	184.065	176.056	237.867	239.446	235.157
19	64.644	60.556	60.741	229.004	219.970	192.691	293.648	280.526	253.432
20	73.132	68.789	65.877	248.171	230.941	206.362	321.303	299.730	272.239
21	73.084	69.464	68.729	259.663	240.094	218.487	332.747	309.557	287.216
22	65.809	63.772	62.282	249.766	233.653	215.208	315.575	297.425	277.490
23	34.457	37.423	38.016	150.505	160.853	147.087	184.962	198.276	185.104
P	196.487	184.725	185.720	656.331	634.976	575.109	852.818	819.701	760.829
FP	399.932	430.342	502.784	1.529.917	1.591.132	1.798.268	1.929.849	2.021.474	2.301.052
Total	596.419	615.067	688.504	2.186.248	2.226.108	2.373.377	2.782.667	2.841.175	3.061.881

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela D4 mostra, para o ano de 2005, a soma da potência ativa (kW) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), para todos os consumidores das concessionárias e o total do estado, com TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D4. Soma da Potência Ativa (kW) Estimada no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	25.422	33.279	32.412	39.982	58.732	10.106	65.403	92.011	42.518
1	11.783	19.718	19.659	22.382	40.166	4.961	34.165	59.884	24.620
2	4.259	9.908	8.567	8.384	9.207	0	12.642	19.115	8.567
3	188	2.500	1.180	561	0	0	749	2.500	1.180
4	188	684	1.180	561	0	0	749	684	1.180
5	449	684	1.180	561	0	0	1.010	684	1.180
6	1.730	188	2.218	5.606	4.058	2.271	7.336	4.246	4.489
7	8.031	5.029	6.052	42.853	30.533	47.740	50.885	35.562	53.792
8	22.768	19.859	19.584	38.585	31.441	112.842	61.353	51.301	132.426
9	28.486	26.359	31.205	25.007	19.213	125.596	53.493	45.572	156.800
10	31.543	32.494	40.686	34.940	30.231	133.116	66.483	62.725	173.801
11	31.618	34.673	45.222	41.585	39.865	136.310	73.203	74.539	181.532
12	52.442	50.435	59.301	143.257	146.669	165.657	195.699	197.104	224.958
13	55.305	55.647	61.414	151.773	159.359	166.911	207.078	215.006	228.324
14	56.891	63.454	68.981	131.411	150.525	151.222	188.302	213.979	220.204
15	53.066	62.439	72.312	112.837	136.311	144.116	165.903	198.750	216.428
16	42.887	61.570	80.161	89.259	134.690	163.065	132.146	196.260	243.226
17	56.488	68.334	86.103	90.579	142.945	179.512	147.068	211.279	265.616
18	123.812	117.127	117.738	216.184	221.856	209.786	339.996	338.984	327.524
19	136.413	127.806	121.516	280.733	264.638	229.249	417.146	392.443	350.765
20	145.713	135.806	131.955	302.627	281.653	246.234	448.340	417.459	378.189
21	144.921	137.794	136.320	311.318	288.741	257.786	456.239	426.535	394.106
22	130.742	127.351	124.459	299.908	278.917	250.671	430.650	406.268	375.130
23	66.205	74.830	75.249	184.704	199.354	176.226	250.909	274.185	251.475
P	405.937	380.739	371.209	799.544	768.146	685.269	1.205.481	1.148.886	1.056.478
FP	825.413	887.228	973.444	1.776.053	1.900.959	2.228.108	2.601.466	2.788.187	3.201.552
Total	1.231.350	1.267.967	1.344.653	2.575.597	2.669.105	2.913.377	3.806.947	3.937.073	4.258.030

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela D5 mostra, para o ano de 1997, a estimativa do impacto de 1% na variação da potência ativa (W) no secundário do transformador (112,5 kVA), causada pela distorção harmônica, para 141 consumidores com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D5. Variação (1%) da Potência Ativa (W) no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores - 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	18	23	23	16	18	4	34	40	26
1	11	15	15	9	13	2	21	28	17
2	2	5	9	4	4	0	6	9	9
3	0	1	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	1	3	2	1	4	2	2
7	5	3	4	16	13	16	21	16	19
8	13	12	12	15	14	41	28	26	53
9	17	16	22	10	9	47	27	25	70
10	18	20	29	17	15	49	36	35	78
11	18	21	31	20	20	50	39	41	81
12	30	30	39	62	61	64	92	91	103
13	32	33	41	68	66	71	100	99	111
14	33	37	45	63	68	69	96	106	114
15	30	36	46	55	65	67	86	101	114
16	25	36	53	47	65	74	72	101	127
17	34	41	56	47	67	79	80	108	135
18	75	71	75	93	96	92	168	167	167
19	82	77	77	119	115	100	202	192	178
20	93	88	84	129	120	108	223	208	192
21	93	88	88	135	125	114	229	214	201
22	84	81	79	130	122	112	214	203	192
23	44	48	48	78	84	77	122	132	125
P	250	235	237	342	331	300	593	566	537
FP	509	548	640	798	830	938	1.307	1.378	1.578
Total	760	783	877	1.140	1.161	1.238	1.900	1.944	2.115

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela D6 mostra, para o ano de 2005, a estimativa do impacto de 1% na variação da potência ativa (W) no secundário do transformador (112,5 kVA), causada pela distorção harmônica, para 141 consumidores com TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D6. Variação (1%) da Potência Ativa (W) no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores - 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	19	25	25	10	26	5	30	52	29
1	9	15	15	6	18	2	15	33	17
2	3	8	7	2	4	0	6	12	7
3	0	2	1	0	0	0	0	2	1
4	0	1	1	0	0	0	0	1	1
5	0	1	1	0	0	0	1	1	1
6	1	0	2	2	2	1	3	2	3
7	6	4	5	11	14	21	17	17	26
8	17	15	15	10	14	50	27	29	65
9	22	20	24	6	9	56	28	29	80
10	24	25	31	10	13	59	34	38	91
11	24	27	35	12	18	61	37	44	95
12	40	39	45	35	65	74	75	104	119
13	42	43	47	39	71	74	81	114	121
14	44	49	53	36	67	67	80	116	120
15	41	48	55	31	61	64	71	109	120
16	33	47	61	25	60	73	58	107	134
17	43	52	66	23	64	80	67	116	146
18	95	90	90	52	99	94	147	189	184
19	104	98	93	67	118	102	172	216	195
20	112	104	101	75	126	110	186	230	211
21	111	105	104	78	129	115	189	234	219
22	100	98	95	74	124	112	175	222	207
23	51	57	58	47	89	79	98	146	136
P	311	292	284	194	343	306	505	634	590
FP	632	679	745	459	848	994	1.091	1.527	1.739
Total	943	971	1.030	653	1.190	1.299	1.596	2.161	2.329

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela D7 mostra, para o ano de 1997, a estimativa do impacto de 1% na variação da soma da potência ativa (W) no secundário de cada transformador (112,5 kVA), causada pela distorção harmônica, para todos os consumidores das concessionárias e o total do estado, com de TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D7. Variação (1%) da Soma da Potência Ativa (W) no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores - 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	144	177	179	307	343	71	451	520	249
1	87	117	121	182	247	39	269	364	160
2	19	40	72	69	70	0	88	111	72
3	1	9	4	8	0	0	9	9	4
4	1	2	4	8	0	0	9	2	4
5	3	2	4	8	0	0	11	2	4
6	9	1	6	49	38	22	57	39	28
7	38	27	28	316	251	301	354	277	328
8	101	94	91	293	265	794	394	359	885
9	132	125	176	191	164	903	323	289	1.079
10	143	155	224	333	287	948	476	442	1.172
11	144	166	242	391	382	962	535	549	1.204
12	232	238	307	1.190	1.162	1.231	1.422	1.400	1.538
13	249	258	320	1.300	1.271	1.353	1.549	1.529	1.672
14	260	293	350	1.212	1.309	1.324	1.472	1.602	1.673
15	239	285	364	1.055	1.241	1.289	1.295	1.526	1.653
16	199	286	413	896	1.242	1.419	1.095	1.529	1.833
17	266	321	436	892	1.294	1.519	1.158	1.614	1.955
18	587	554	591	1.792	1.841	1.761	2.379	2.394	2.352
19	646	606	607	2.290	2.200	1.927	2.936	2.805	2.534
20	731	688	659	2.482	2.309	2.064	3.213	2.997	2.722
21	731	695	687	2.597	2.401	2.185	3.327	3.096	2.872
22	658	638	623	2.498	2.337	2.152	3.156	2.974	2.775
23	345	374	380	1.505	1.609	1.471	1.850	1.983	1.851
P	1.965	1.847	1.857	6.563	6.350	5.751	8.528	8.197	7.608
FP	3.999	4.303	5.028	15.299	15.911	17.983	19.298	20.215	23.011
Total	5.964	6.151	6.885	21.862	22.261	23.734	27.827	28.412	30.619

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela D8 mostra, para o ano de 2005, a estimativa do impacto de 1% na variação da soma da potência ativa (kW) no secundário de cada transformador (112,5 kVA), causada pela distorção harmônica, para todos os consumidores das concessionárias e o total do estado, com de TVs ligadas por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D8. Variação (1%) da Soma Potência Ativa (kW) no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	254	333	324	400	587	101	654	920	425
1	118	197	197	224	402	50	342	599	246
2	43	99	86	84	92	0	126	191	86
3	2	25	12	6	0	0	7	25	12
4	2	7	12	6	0	0	7	7	12
5	4	7	12	6	0	0	10	7	12
6	17	2	22	56	41	23	73	42	45
7	80	50	61	429	305	477	509	356	538
8	228	199	196	386	314	1.128	614	513	1.324
9	285	264	312	250	192	1.256	535	456	1.568
10	315	325	407	349	302	1.331	665	627	1.738
11	316	347	452	416	399	1.363	732	745	1.815
12	524	504	593	1.433	1.467	1.657	1.957	1.971	2.250
13	553	556	614	1.518	1.594	1.669	2.071	2.150	2.283
14	569	635	690	1.314	1.505	1.512	1.883	2.140	2.202
15	531	624	723	1.128	1.363	1.441	1.659	1.988	2.164
16	429	616	802	893	1.347	1.631	1.321	1.963	2.432
17	565	683	861	906	1.429	1.795	1.471	2.113	2.656
18	1.238	1.171	1.177	2.162	2.219	2.098	3.400	3.390	3.275
19	1.364	1.278	1.215	2.807	2.646	2.292	4.171	3.924	3.508
20	1.457	1.358	1.320	3.026	2.817	2.462	4.483	4.175	3.782
21	1.449	1.378	1.363	3.113	2.887	2.578	4.562	4.265	3.941
22	1.307	1.274	1.245	2.999	2.789	2.507	4.306	4.063	3.751
23	662	748	752	1.847	1.994	1.762	2.509	2.742	2.515
P	4.059	3.807	3.712	7.995	7.681	6.853	12.055	11.489	10.565
FP	8.254	8.872	9.734	17.761	19.010	22.281	26.015	27.882	32.016
Total	12.314	12.680	13.447	25.756	26.691	29.134	38.069	39.371	42.580

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela D9 mostra, para o ano de 2005, a estimativa da potência ativa (W) no secundário do transformador (112,5 kVA), para 141 consumidores com TVs desligadas utilizando a função *standby* (média de 4 W[45]), por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D9. Potência Ativa (W) no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores com TVs Desligadas em *Standby* (4 W) – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	250	239	239	289	275	315	539	514	554
1	269	258	258	306	290	319	575	548	577
2	281	273	275	319	316	324	600	589	598
3	287	284	287	328	324	324	615	608	611
4	287	287	286	329	324	324	616	611	610
5	287	287	286	330	324	324	617	611	610
6	285	287	285	327	320	321	612	608	606
7	276	280	279	298	298	281	574	578	559
8	255	258	259	303	297	226	557	555	485
9	245	248	241	315	306	214	560	555	455
10	241	239	225	306	297	208	547	536	433
11	241	236	218	301	288	205	543	523	424
12	212	213	196	218	198	181	430	411	377
13	207	205	192	211	186	178	418	391	370
14	203	192	181	226	190	194	429	382	375
15	207	192	177	245	204	201	452	396	378
16	222	194	165	268	207	186	490	401	352
17	202	184	157	269	201	172	471	385	330
18	98	110	108	166	137	148	264	247	256
19	78	93	101	112	99	130	190	192	231
20	63	79	84	93	84	115	155	163	199
21	64	76	78	86	76	106	150	153	184
22	87	93	96	97	324	111	184	417	207
23	188	176	175	195	84	173	383	260	348
P	239	282	293	371	319	394	609	602	686
FP	4.798	4.701	4.556	5.564	5.330	4.887	10.362	10.031	9.443
Total	5.037	4.983	4.848	5.935	5.649	5.281	10.971	10.632	10.129

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

[45] MEIER e HUBER, 2009.

A Tabela D10 mostra, para o ano de 2005, a estimativa da soma da potência ativa (kW) no secundário de cada transformador (112,5 kVA), para todos os consumidores das concessionárias e o total do estado, com TVs desligadas utilizando a função *standby* (média de 4 W[46]), por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D10. Soma da Potência Ativa (kW) no Secundário de Cada Transformador para Todos os Consumidores com TVs Desligadas em *Standby* (4 W) 2005.

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	3.270	3.121	3.128	6.472	6.171	7.054	9.742	9.292	10.182
1	3.514	3.364	3.366	6.855	6.513	7.162	10.370	9.877	10.528
2	3.671	3.565	3.586	7.147	7.081	7.261	10.819	10.646	10.847
3	3.752	3.706	3.752	7.345	7.261	7.261	11.097	10.967	11.014
4	3.752	3.744	3.736	7.377	7.261	7.261	11.129	11.006	10.998
5	3.747	3.744	3.736	7.408	7.261	7.261	11.155	11.006	10.998
6	3.723	3.752	3.719	7.327	7.184	7.208	11.050	10.936	10.927
7	3.603	3.657	3.639	6.691	6.691	6.290	10.295	10.349	9.929
8	3.328	3.374	3.378	6.783	6.649	5.071	10.111	10.023	8.449
9	3.203	3.245	3.142	7.057	6.869	4.808	10.260	10.114	7.950
10	3.148	3.125	2.944	6.862	6.649	4.656	10.010	9.774	7.600
11	3.150	3.081	2.853	6.759	6.446	4.604	9.909	9.528	7.457
12	2.768	2.780	2.564	4.886	4.438	4.049	7.653	7.218	6.613
13	2.708	2.677	2.510	4.721	4.168	3.994	7.428	6.845	6.505
14	2.648	2.508	2.369	5.063	4.269	4.346	7.711	6.777	6.714
15	2.704	2.509	2.308	5.489	4.577	4.505	8.193	7.087	6.813
16	2.903	2.535	2.158	6.009	4.642	4.177	8.913	7.177	6.336
17	2.636	2.408	2.052	6.036	4.503	3.866	8.672	6.911	5.917
18	1.279	1.438	1.409	3.732	3.065	3.316	5.010	4.502	4.725
19	1.022	1.217	1.316	2.501	2.222	2.924	3.523	3.439	4.240
20	817	1.032	1.096	2.076	1.877	2.583	2.893	2.909	3.679
21	839	999	1.023	1.926	1.711	2.366	2.765	2.710	3.389
22	1.142	1.211	1.258	2.171	7.261	2.492	3.313	8.472	3.749
23	2.458	2.292	2.284	4.367	1.892	3.887	6.825	4.185	6.171
P	3.118	3.687	3.820	8.308	7.163	8.823	11.426	10.850	12.644
FP	62.667	61.397	59.504	124.752	119.501	109.581	187.419	180.898	169.085
Total	65.785	65.084	63.324	133.061	126.664	118.404	198.845	191.749	181.728

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

[46] MEIER e HUBER, 2009.

A Tabela D11 mostra, para o ano de 2005, a estimativa da variação da potência ativa (W) no secundário do transformador (112,5 kVA), para 141 consumidores com TVs desligadas, em função da alteração de 1 W na potência em *standby* de TVs por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela D11. Variação da Potência Ativa (W) no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores pela Alteração de 1 W na Potência *Standby* (1 W) de TVs - 2005.

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	63	60	60	72	69	79	135	129	139
1	67	64	64	76	73	80	144	137	144
2	70	68	69	80	79	81	150	147	150
3	72	71	72	82	81	81	154	152	152
4	72	72	72	82	81	81	154	153	152
5	72	72	72	83	81	81	154	153	152
6	71	72	71	82	80	80	153	152	152
7	69	70	70	75	75	70	144	145	140
8	64	65	65	76	74	57	139	139	121
9	61	62	60	79	77	54	140	139	114
10	60	60	56	77	74	52	137	134	108
11	60	59	55	75	72	51	136	131	106
12	53	53	49	54	49	45	107	103	94
13	52	51	48	53	46	45	104	98	93
14	51	48	45	56	48	48	107	96	94
15	52	48	44	61	51	50	113	99	94
16	56	49	41	67	52	47	123	100	88
17	50	46	39	67	50	43	118	96	82
18	24	28	27	42	34	37	66	62	64
19	20	23	25	28	25	33	47	48	58
20	16	20	21	23	21	29	39	41	50
21	16	19	20	21	19	26	38	38	46
22	22	23	24	24	81	28	46	104	52
23	47	44	44	49	21	43	96	65	87
P	60	71	73	93	80	98	152	150	172
FP	1.199	1.175	1.139	1.391	1.332	1.222	2.591	2.508	2.361
Total	1.259	1.246	1.212	1.484	1.412	1.320	2.743	2.658	2.532

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela D12 mostra, para o ano de 2005, a estimativa da variação da soma da potência ativa (kW) no secundário de cada transformador, em função da alteração de 1 W na potência em *standby* de TVs, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos, para todos os consumidores de cada concessionária e o total do estado.

Tabela D12. Variação da Soma da Potência Ativa (kW) no Secundário de Cada Transformador para todos os consumidores pela Alteração de 1 W na Potência *Standby* (1 W) de TVs - 2005.

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	818	780	782	1.618	1.543	1.763	2.435	2.323	2.545
1	879	841	842	1.714	1.628	1.791	2.592	2.469	2.632
2	918	891	896	1.787	1.770	1.815	2.705	2.662	2.712
3	938	926	934	1.836	1.815	1.815	2.774	2.742	2.749
4	938	936	934	1.844	1.815	1.815	2.782	2.751	2.749
5	937	936	934	1.852	1.815	1.815	2.789	2.751	2.749
6	931	938	930	1.832	1.796	1.802	2.763	2.734	2.732
7	901	914	910	1.673	1.673	1.573	2.574	2.587	2.482
8	832	843	844	1.696	1.662	1.268	2.528	2.506	2.112
9	801	811	786	1.764	1.717	1.202	2.565	2.528	1.988
10	787	781	736	1.716	1.662	1.164	2.502	2.444	1.900
11	787	770	713	1.690	1.612	1.151	2.477	2.382	1.864
12	692	695	641	1.221	1.110	1.012	1.913	1.805	1.653
13	677	669	628	1.180	1.042	999	1.857	1.711	1.626
14	662	627	592	1.266	1.067	1.086	1.928	1.694	1.679
15	676	627	577	1.372	1.144	1.126	2.048	1.772	1.703
16	726	634	540	1.502	1.160	1.044	2.228	1.794	1.584
17	659	602	513	1.509	1.126	966	2.168	1.728	1.479
18	320	359	352	933	766	829	1.253	1.126	1.181
19	256	304	329	625	555	731	881	860	1.060
20	204	258	274	519	469	646	723	727	920
21	210	250	256	482	428	592	691	677	847
22	285	303	314	543	1.815	623	828	2.118	937
23	614	573	571	1.092	473	972	1.706	1.046	1.543
P	779	922	955	2.077	1.791	2.206	2.857	2.713	3.161
FP	15.667	15.349	14.872	31.188	29.875	27.395	46.855	45.225	42.267
Total	16.446	16.271	15.827	33.265	31.666	29.601	49.711	47.937	45.428

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

Apêndice E

Potência Aparente

Para um fp_{desl} unitário, a potência aparente é obtida a partir da potência ativa de acordo com e Equação E1.

$$S_{te} = \frac{P_t}{fp} = \frac{P_t}{fp_{desl}\, fp_{dist}} = P_t\sqrt{1+THD_i^2} \qquad \text{E1}$$

A Tabela E1 mostra, para o ano de 1997, a potência aparente (VA) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA), com 5% de THD_i, para 141 consumidores com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela E1. Potência Aparente (VA) Estimada no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	1.841	2.258	2.281	1.603	1.791	368	3.444	4.050	2.649
1	1.111	1.493	1.537	949	1.289	205	2.061	2.782	1.742
2	244	516	919	359	366	0	603	882	919
3	15	120	46	41	0	0	56	120	46
4	15	30	46	41	0	0	56	30	46
5	35	30	46	41	0	0	76	30	46
6	110	15	82	255	196	115	364	211	197
7	481	339	354	1.651	1.309	1.569	2.132	1.648	1.923
8	1.293	1.196	1.155	1.529	1.383	4.149	2.822	2.579	5.304
9	1.683	1.597	2.245	998	858	4.715	2.681	2.455	6.960
10	1.821	1.976	2.856	1.738	1.497	4.950	3.559	3.474	7.807
11	1.832	2.121	3.083	2.043	1.997	5.023	3.874	4.117	8.105
12	2.957	3.029	3.909	6.213	6.070	6.431	9.170	9.099	10.339
13	3.174	3.284	4.075	6.789	6.637	7.064	9.963	9.921	11.139
14	3.312	3.734	4.457	6.332	6.838	6.914	9.644	10.572	11.371
15	3.053	3.637	4.639	5.511	6.478	6.731	8.565	10.115	11.370
16	2.534	3.653	5.272	4.679	6.487	7.412	7.212	10.140	12.684
17	3.387	4.088	5.562	4.660	6.755	7.934	8.047	10.843	13.495
18	7.487	7.063	7.537	9.356	9.612	9.194	16.843	16.675	16.731
19	8.244	7.723	7.746	11.959	11.487	10.063	20.203	19.210	17.809
20	9.326	8.773	8.401	12.960	12.060	10.777	22.286	20.833	19.178
21	9.320	8.859	8.765	13.560	12.538	11.410	22.880	21.397	20.175
22	8.393	8.133	7.943	13.043	12.202	11.239	21.436	20.335	19.181
23	4.394	4.773	4.848	7.860	8.400	7.681	12.254	13.173	12.529
P	25.058	23.558	23.685	34.275	33.159	30.033	59.333	56.717	53.718
FP	51.003	54.881	64.120	79.895	83.091	93.908	130.898	137.973	158.028
Total	76.061	78.439	87.805	114.169	116.251	123.942	190.230	194.690	211.746

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela E2 mostra, para o ano de 2005, a potência aparente (VA) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA), com 12% de THD_i, para 141 consumidores com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela E2. Potência Aparente (VA) Estimada no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores com TVs Ligadas – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	1.961	2.568	2.501	1.031	2.640	454	2.993	5.207	2.955
1	909	1.521	1.517	623	1.805	223	1.532	3.327	1.740
2	329	764	661	233	414	0	562	1.178	661
3	14	193	91	25	0	0	40	193	91
4	14	53	91	25	0	0	40	53	91
5	35	53	91	25	0	0	60	53	91
6	133	14	171	204	182	102	338	197	273
7	620	388	467	1.113	1.372	2.146	1.732	1.760	2.613
8	1.757	1.532	1.511	969	1.413	5.072	2.725	2.945	6.583
9	2.198	2.034	2.408	598	864	5.645	2.795	2.897	8.053
10	2.434	2.507	3.139	996	1.359	5.983	3.430	3.866	9.122
11	2.440	2.675	3.489	1.247	1.792	6.127	3.687	4.467	9.616
12	4.046	3.891	4.575	3.520	6.592	7.446	7.566	10.483	12.021
13	4.267	4.293	4.738	3.903	7.163	7.502	8.170	11.456	12.240
14	4.389	4.896	5.322	3.657	6.765	6.797	8.047	11.661	12.119
15	4.094	4.817	5.579	3.110	6.127	6.477	7.204	10.944	12.057
16	3.309	4.750	6.185	2.528	6.054	7.329	5.837	10.804	13.514
17	4.358	5.272	6.643	2.348	6.425	8.068	6.707	11.697	14.712
18	9.553	9.037	9.084	5.218	9.972	9.429	14.771	19.009	18.513
19	10.525	9.861	9.376	6.780	11.894	10.304	17.305	21.755	19.679
20	11.243	10.478	10.181	7.525	12.659	11.067	18.767	23.137	21.248
21	11.181	10.632	10.518	7.867	12.978	11.586	19.049	23.609	22.104
22	10.087	9.826	9.603	7.498	12.536	11.267	17.586	22.362	20.869
23	5.108	5.774	5.806	4.761	8.960	7.921	9.869	14.734	13.727
P	31.320	29.376	28.641	19.523	34.525	30.800	50.843	63.901	59.441
FP	63.685	68.454	75.106	46.282	85.440	100.144	109.967	153.895	175.251
Total	95.005	97.830	103.747	65.805	119.965	130.944	160.810	217.796	234.691

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005.

A Tabela E3 mostra, para o ano de 1997, a soma da potência aparente (kVA) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), com 5% de THD_i, para todos os consumidores das concessionárias com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela E3. Soma da Potência Aparente (kVA) Estimada no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	14.451	17.731	17.906	30.739	34.346	7.059	45.190	52.078	24.965
1	8.726	11.725	12.071	18.204	24.708	3.925	26.930	36.433	15.996
2	1.914	4.051	7.218	6.890	7.024	0	8.804	11.075	7.218
3	115	944	361	792	0	0	906	944	361
4	115	238	361	792	0	0	906	238	361
5	271	238	361	792	0	0	1.062	238	361
6	863	115	640	4.880	3.759	2.209	5.743	3.874	2.849
7	3.774	2.664	2.777	31.661	25.094	30.089	35.435	27.758	32.866
8	10.149	9.392	9.068	29.322	26.511	79.543	39.470	35.903	88.611
9	13.212	12.535	17.630	19.132	16.452	90.394	32.344	28.986	108.024
10	14.299	15.518	22.426	33.326	28.707	94.912	47.625	44.225	117.339
11	14.381	16.652	24.203	39.164	38.280	96.300	53.544	54.932	120.502
12	23.219	23.784	30.690	119.116	116.379	123.296	142.334	140.163	153.986
13	24.921	25.783	31.996	130.160	127.263	135.443	155.081	153.046	167.439
14	26.007	29.317	34.996	121.400	131.106	132.558	147.407	160.423	167.555
15	23.973	28.555	36.418	105.666	124.210	129.057	129.639	152.765	165.476
16	19.891	28.678	41.392	89.704	124.376	142.120	109.595	153.054	183.512
17	26.589	32.093	43.665	89.348	129.526	152.120	115.937	161.619	195.785
18	58.785	55.450	59.176	179.383	184.298	176.279	238.168	239.749	235.455
19	64.726	60.632	60.818	229.294	220.249	192.935	294.020	280.881	253.753
20	73.224	68.876	65.961	248.485	231.233	206.623	321.709	300.109	272.583
21	73.176	69.551	68.816	259.991	240.397	218.763	333.168	309.949	287.580
22	65.892	63.853	62.361	250.082	233.948	215.481	315.974	297.801	277.842
23	34.501	37.470	38.064	150.696	161.057	147.274	185.196	198.527	185.338
P	196.736	184.958	185.955	657.161	635.780	575.836	853.897	820.738	761.791
FP	400.438	430.887	503.420	1.531.853	1.593.145	1.800.544	1.932.291	2.024.032	2.303.964
Total	597.174	615.845	689.375	2.189.014	2.228.925	2.376.380	2.786.188	2.844.770	3.065.755

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997.

A Tabela E4 mostra, para o ano de 2005, a soma da potência aparente (kVA) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), com 12% de THD_i, para todos os consumidores das concessionárias com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela E4. Soma da Potência Aparente (kVA) Estimada no Secundário de Cada Transformador Para Todos os Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	25.618	33.536	32.662	40.322	59.233	10.192	65.941	92.769	42.855
1	11.874	19.870	19.811	22.573	40.509	5.003	34.447	60.379	24.814
2	4.292	9.985	8.633	8.455	9.285	0	12.747	19.270	8.633
3	189	2.519	1.189	566	0	0	755	2.519	1.189
4	189	689	1.189	566	0	0	755	689	1.189
5	453	689	1.189	566	0	0	1.019	689	1.189
6	1.743	189	2.235	5.654	4.092	2.290	7.397	4.282	4.525
7	8.093	5.068	6.099	43.219	30.793	48.146	51.312	35.861	54.246
8	22.944	20.013	19.735	38.914	31.709	113.804	61.858	51.722	133.539
9	28.706	26.562	31.446	25.220	19.377	126.666	53.926	45.939	158.112
10	31.787	32.745	41.000	35.238	30.488	134.250	67.025	63.233	175.250
11	31.862	34.941	45.572	41.940	40.205	137.471	73.802	75.146	183.043
12	52.848	50.824	59.759	144.478	147.919	167.069	197.326	198.744	226.828
13	55.733	56.077	61.888	153.066	160.717	168.333	208.799	216.794	230.221
14	57.331	63.944	69.514	132.531	151.808	152.511	189.862	215.752	222.026
15	53.476	62.922	72.871	113.799	137.473	145.344	167.275	200.395	218.215
16	43.218	62.046	80.781	90.020	135.838	164.454	133.238	197.884	245.235
17	56.925	68.862	86.769	91.351	144.163	181.042	148.276	213.025	267.811
18	124.768	118.032	118.648	218.027	223.747	211.574	342.795	341.780	330.222
19	137.467	128.794	122.455	283.126	266.893	231.203	420.592	395.687	353.657
20	146.839	136.855	132.975	305.206	284.053	248.332	452.045	420.908	381.308
21	146.041	138.859	137.373	313.971	291.202	259.983	460.012	430.061	397.357
22	131.752	128.335	125.421	302.464	281.294	252.808	434.216	409.629	378.228
23	66.716	75.408	75.830	186.279	201.054	177.728	252.995	276.462	253.559
P	409.074	383.681	374.078	806.358	774.693	691.109	1.215.432	1.158.374	1.065.187
FP	831.792	894.084	980.966	1.791.189	1.917.160	2.247.097	2.622.981	2.811.244	3.228.063
Total	1.240.866	1.277.765	1.355.044	2.597.547	2.691.853	2.938.206	3.838.413	3.969.619	4.293.251

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005

Apêndice F

Potência Não Ativa

Considerando o fp_{desl} unitário, a potência não ativa é estimada por (GAMA, 2001):

$$D_{te} = \sqrt{S_{te}^2 - P_t^2} \tag{F.1}$$

A Tabela F1 mostra, para o ano de 1997, a potência não ativa (var) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA), com 5% de THD_i, para 141 consumidores com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela F1. Potência Não Ativa (var) Estimada no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A - 1997			Concessionária B - 1997			Total Estado - 1997		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	93	114	115	81	90	19	173	204	133
1	56	75	77	48	65	10	104	140	88
2	12	26	46	18	18	0	30	44	46
3	1	6	2	2	0	0	3	6	2
4	1	2	2	2	0	0	3	2	2
5	2	2	2	2	0	0	4	2	2
6	6	1	4	13	10	6	18	11	10
7	24	17	18	83	66	79	107	83	97
8	65	60	58	77	69	209	142	130	267
9	85	80	113	50	43	237	135	123	350
10	92	99	144	87	75	249	179	175	392
11	92	107	155	103	100	252	195	207	407
12	149	152	196	312	305	323	461	457	520
13	160	165	205	341	334	355	501	499	560
14	166	188	224	318	344	347	485	531	571
15	153	183	233	277	326	338	430	508	571
16	127	184	265	235	326	373	362	510	637
17	170	205	280	234	340	399	404	545	678
18	376	355	379	470	483	462	847	838	841
19	414	388	389	601	577	506	1.015	965	895
20	469	441	422	651	606	542	1.120	1.047	964
21	468	445	441	681	630	573	1.150	1.075	1.014
22	422	409	399	656	613	565	1.077	1.022	964
23	221	240	244	395	422	386	616	662	630
P	1.259	1.184	1.190	1.723	1.667	1.509	2.982	2.850	2.700
FP	2.563	2.758	3.223	4.015	4.176	4.720	6.579	6.934	7.942
Total	3.823	3.942	4.413	5.738	5.843	6.229	9.561	9.785	10.642

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997

A Tabela F2 mostra, para o ano de 2005, a potência não ativa (var) estimada no secundário do transformador (112,5 kVA), com 13% de THD_i, para 141 consumidores com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela F2. Potência Não Ativa (var) Estimada no Secundário do Transformador Para 141 Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	242	317	309	134	343	59	376	660	368
1	112	188	187	81	234	29	193	422	216
2	41	94	82	30	54	0	71	148	82
3	2	24	11	3	0	0	5	24	11
4	2	7	11	3	0	0	5	7	11
5	4	7	11	3	0	0	8	7	11
6	16	2	21	27	24	13	43	25	34
7	77	48	58	144	178	279	221	226	336
8	217	189	187	126	183	658	343	373	845
9	272	251	298	78	112	733	349	363	1.030
10	301	310	388	129	176	777	430	486	1.165
11	302	331	431	162	233	795	463	563	1.227
12	500	481	566	457	856	967	957	1.337	1.532
13	527	531	586	507	930	974	1.034	1.461	1.560
14	543	605	658	475	878	882	1.017	1.484	1.540
15	506	595	690	404	795	841	910	1.391	1.531
16	409	587	764	328	786	952	737	1.373	1.716
17	539	652	821	305	834	1.048	844	1.486	1.869
18	1.181	1.117	1.123	678	1.295	1.224	1.858	2.412	2.347
19	1.301	1.219	1.159	880	1.544	1.338	2.181	2.763	2.497
20	1.390	1.295	1.258	977	1.644	1.437	2.367	2.939	2.695
21	1.382	1.314	1.300	1.021	1.685	1.504	2.403	2.999	2.804
22	1.247	1.214	1.187	973	1.628	1.463	2.220	2.842	2.650
23	631	714	718	618	1.163	1.028	1.249	1.877	1.746
P	3.871	3.631	3.540	2.535	4.482	3.999	6.406	8.113	7.539
FP	7.872	8.461	9.283	6.009	11.093	13.002	13.881	19.554	22.285
Total	11.743	12.092	12.823	8.544	15.575	17.001	20.287	27.667	29.824

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-2005

A Tabela F3 mostra, para o ano de 1997, a soma potência não ativa (kvar) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), com 5% de THD_i, para todos os consumidores das concessionária e do estado, com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela F3. Potência Não Ativa (var) Estimada no Secundário do Transformador Para Todos os Consumidores – 1997

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	726	891	900	1.545	1.726	355	2.271	2.617	1.255
1	439	589	607	915	1.242	197	1.353	1.831	804
2	96	204	363	346	353	0	442	557	363
3	6	47	18	40	0	0	46	47	18
4	6	12	18	40	0	0	46	12	18
5	14	12	18	40	0	0	53	12	18
6	43	6	32	245	189	111	289	195	143
7	190	134	140	1.591	1.261	1.512	1.781	1.395	1.652
8	510	472	456	1.474	1.332	3.998	1.984	1.804	4.453
9	664	630	886	962	827	4.543	1.626	1.457	5.429
10	719	780	1.127	1.675	1.443	4.770	2.394	2.223	5.897
11	723	837	1.216	1.968	1.924	4.840	2.691	2.761	6.056
12	1.167	1.195	1.542	5.986	5.849	6.197	7.153	7.044	7.739
13	1.252	1.296	1.608	6.542	6.396	6.807	7.794	7.692	8.415
14	1.307	1.473	1.759	6.101	6.589	6.662	7.408	8.062	8.421
15	1.205	1.435	1.830	5.311	6.243	6.486	6.515	7.678	8.316
16	1.000	1.441	2.080	4.508	6.251	7.143	5.508	7.692	9.223
17	1.336	1.613	2.195	4.490	6.510	7.645	5.827	8.123	9.840
18	2.954	2.787	2.974	9.015	9.262	8.859	11.970	12.049	11.833
19	3.253	3.047	3.057	11.524	11.069	9.696	14.777	14.116	12.753
20	3.680	3.462	3.315	12.488	11.621	10.384	16.168	15.083	13.699
21	3.678	3.495	3.459	13.067	12.082	10.995	16.744	15.577	14.453
22	3.312	3.209	3.134	12.569	11.758	10.830	15.880	14.967	13.964
23	1.734	1.883	1.913	7.574	8.094	7.402	9.308	9.978	9.315
P	9.887	9.296	9.346	33.027	31.953	28.940	42.915	41.248	38.286
FP	20.125	21.655	25.301	76.987	80.068	90.491	97.113	101.723	115.792
Total	30.013	30.951	34.646	110.015	112.021	119.431	140.028	142.972	154.078

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997

A Tabela F4 mostra, para o ano de 2005, a soma potência não ativa (kvar) estimada no secundário de cada transformador (112,5 kVA), com 13% de THD_i, para todos os consumidores das concessionária e do estado, com TVs ligadas, por hora do dia, em dias da semana, sábados e domingos.

Tabela F4. Potência Não Ativa (var) Estimada no Secundário do Transformador Para Todos os Consumidores – 2005

Hora	Concessionária A			Concessionária B			Total Estado		
	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo	Semana	Sábado	Domingo
0	3.167	4.145	4.037	5.231	7.684	1.322	8.398	11.829	5.359
1	1.468	2.456	2.449	2.928	5.255	649	4.396	7.711	3.098
2	530	1.234	1.067	1.097	1.205	0	1.627	2.439	1.067
3	23	311	147	73	0	0	97	311	147
4	23	85	147	73	0	0	97	85	147
5	56	85	147	73	0	0	129	85	147
6	215	23	276	733	531	297	949	554	573
7	1.000	626	754	5.607	3.995	6.246	6.607	4.621	7.000
8	2.836	2.474	2.439	5.048	4.114	14.764	7.884	6.587	17.203
9	3.548	3.283	3.887	3.272	2.514	16.432	6.820	5.797	20.319
10	3.929	4.047	5.068	4.571	3.955	17.416	8.500	8.003	22.484
11	3.938	4.319	5.633	5.441	5.216	17.834	9.379	9.535	23.467
12	6.532	6.282	7.386	18.743	19.190	21.674	25.275	25.472	29.060
13	6.889	6.931	7.650	19.857	20.850	21.838	26.746	27.781	29.487
14	7.086	7.904	8.592	17.193	19.694	19.785	24.279	27.598	28.377
15	6.610	7.777	9.007	14.763	17.834	18.855	21.373	25.612	27.863
16	5.342	7.669	9.985	11.678	17.622	21.335	17.020	25.291	31.319
17	7.036	8.512	10.725	11.851	18.702	23.487	18.887	27.214	34.211
18	15.422	14.589	14.665	28.285	29.027	27.447	43.706	43.616	42.113
19	16.991	15.919	15.136	36.730	34.624	29.994	53.721	50.543	45.130
20	18.150	16.916	16.436	39.594	36.850	32.216	57.744	53.766	48.652
21	18.051	17.163	16.980	40.731	37.778	33.728	58.783	54.941	50.707
22	16.285	15.863	15.502	39.239	36.492	32.797	55.524	52.355	48.299
23	8.246	9.321	9.373	24.166	26.083	23.057	32.412	35.403	32.430
P	50.563	47.424	46.237	104.609	100.501	89.657	155.171	147.925	135.895
FP	102.812	110.512	121.250	232.371	248.713	291.515	335.183	359.224	412.766
Total	153.375	157.936	167.488	336.979	349.214	381.173	490.354	507.149	548.661

Apêndice G

Perdas em Condutores - Rede Interna e Ramal de Ligação

A Tabela G1 mostra a quantidade de consumidores e a potência média ponderada por residência ($P_{MédiaPR}$) de TVs. $P_{MédiaPR}$ é obtida pelo produto entre a potência média ponderada ($P_{MédiaP}$) de TVs e a posse média para as respectivas PPHs-1997/2005. $P_{MédiaP}$ é a média ponderada entre $P_{Média}$ de TVs e suas respectivas quantidades amostrais na população. $P_{Média}$ é calculada, para TVs de 14' a 29", de acordo com as Equações G1 e G2 (DUARTE *et al*., 2007a)[47]:

$$0{,}077x^2 + 2{,}714x - 2{,}163 \qquad \text{(G1)}$$

[47] Cabe comentar que houve erro de digitação destas equações quando da publicação do artigo mencionado. As equações corretas são expressas pelas Equações G.1 e G.2

$$0{,}25x^2 - 5{,}17x + 74{,}39 \qquad \text{(G2)}$$

onde x é a diagonal em polegadas.

A posse média de TVs de 14” a 29” para a concessionária A foi de 1,15 em 1997 e 1,37 em 2005. Para a concessionária B estes valores foram, respectivamente, de 1,51 e 1,36 (PUC-RIO/ECOLUZ, 2006).

Tabela G1. Quantidade de Consumidores e Potência Média Ponderada por Residência

Ano	Concessionária A		Concessionária B	
	Consumidores	$P_{MédiaP/R}$ (W)	Consumidores	$P_{MédiaP/R}$(W)
1997	1.079.774	84,8	2.665.515	120,3
1998	1.107.024	86,8	2.703.449	120,0
1999	1.299.626	88,9	2.785.978	119,7
2000	1.399.670	90,9	2.732.205	119,3
2001	1.418.843	92,9	3.034.965	119,0
2002	1.511.991	94,9	2.933.758	118,7
2003	1.587.778	97,0	3.033.423	118,4
2004	1.732.532	99,0	3.097.431	118,0
2005	1.841.608	101	3.161.345	117,7

Fonte: Elaboração Própria com Base nas PPHs-1997/2005.

A Tabela G2 mostra a resistência total para 20 m de um condutor em função da sua seção transversal (diâmetro), além da resistividade do cobre a 20^0C e a 70^0C.

Tabela G2. Resistência Total (ohms) e Resistividade (ohms/metro) do Condutor

Diâmetro (mm^2)	Comprimento (20 m)	(20^0C)
1,5	0,542080	$1{,}694.10^{-8}$
2,5	0,325248	(70^0C)
4,0	0,203280	$2{,}0328.10^{-8}$

Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela G3 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando $PM_{édiaPR}$ de TVs por residência de 84,8 W e 120,3 W, e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 1997.

Tabela G3. Perdas Joulicas nos Condutores - 1997

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,67	0,78	0,95	1,11
I^2R (W)[1]	97.861	133.092	486.493	661.631
I^2R (W)[2]	156.578	212.947	778.389	1.058.610
I^2R (W)[3] - Total	254.440	346.038	1.264.883	1.720.241
kWh/ano[1]	178.597	242.892	887.850	1.207.477
kWh/ano[2]	285.756	388.628	1.420.561	1.931.963
kWh/ano[3]	464.353	631.520	2.308.411	3.139.439
Custo Anual (R$)[1]	66.784,64	90.827,11	276.503,26	376.044,43
Custo Anual (R$)[2]	106.855,42	145.323,37	442.405,21	601.671,09
Custo Anual (R$)[3]	173.640,06	236.150,48	718.908,47	977.715,52
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	24.042,47	0,00	99.541,17
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	38.467,95	0,00	159.265,88
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	62.510,42	0,00	258.807,05

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

Foi considerada uma tensão de alimentação de 127 V, fator de potência de deslocamento (fp_{desl}) unitário e potência média ponderada de TVs por residência ($P_{MédiaP/R}$) a cada ano, estando seus valores na Tabela G, para se obter a corrente elétrica no condutor em Ampères, para uma unidade consumidora, conforme a Equação G3. As perdas (I^2R) são estimadas para todos os consumidores de cada concessionária.

$$I = \frac{P_{MédiaP}}{V} \cdot \sqrt{1 + (\frac{THD_i}{2})^2} \qquad \text{(G3)}$$

A Tabela G4 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 86,8 W e 120 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 1998.

Tabela G4. Perdas Joulicas nos Condutores - 1998

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,68	0,80	0,94	1,10
I^2R (W)[1]	105.180	143.045	490.715	667.372
I^2R (W)[2]	168.288	228.872	785.144	1.067.796
I^2R (W)[3] - Total	273.468	371.917	1.275.859	1.735.168
kWh/ano[1]	191.954	261.057	895.555	1.217.955
kWh/ano[2]	307.126	417.691	1.432.888	1.948.727
kWh/ano[3]	499.080	678.749	2.328.443	3.166.682
Custo Anual (R$)[1]	71.779,20	97.619,71	278.902,64	379.307,60
Custo Anual (R$)[2]	114.846,72	156.191,54	446.244,23	606.892,15
Custo Anual (R$)[3]	186.625,92	253.811,26	725.146,88	986.199,75
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	25.840,51	0,00	100.404,95
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	41.344,82	0,00	160.647,92
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	67.185,33	0,00	261.052,88

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G5 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 88,9 W e 119,7 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 1999.

Tabela G5. Perdas Joulicas nos Condutores - 1999

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,70	0,82	0,94	1,10
I^2R (W)[1]	129.307	175.857	502.918	683.969
I^2R (W)[2]	206.890	281.371	804.670	1.094.351
I^2R (W)[3] - Total	336.197	457.228	1.307.588	1.778.320
kWh/ano[1]	235.984	320.939	917.826	1.248.244
kWh/ano[2]	377.575	513.502	1.468.522	1.997.190
kWh/ano[3]	613.559	834.441	2.386.348	3.245.433
Custo Anual (R$)[1]	88.244,01	120.011,86	285.838,61	388.740,52
Custo Anual (R$)[2]	141.190,42	192.018,98	457.341,78	621.984,83
Custo Anual (R$)[3]	229.434,44	312.030,84	743.180,40	1.010.725,34
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	31.767,85	0,00	102.901,90
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	50.828,55	0,00	164.643,04
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	82.596,40	0,00	267.544,94

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G6 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 90,9 W e 119,3 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2000.

Tabela G6. Perdas Joulicas nos Condutores - 2000

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,72	0,83	0,94	1,10
I^2R (W)[1]	145.681	198.126	490.496	667.074
I^2R (W)[2]	233.089	317.001	784.793	1.067.319
I^2R (W)[3] - Total	378.770	515.127	1.275.289	1.734.393
kWh/ano[1]	265.867	361.579	895.155	1.217.411
kWh/ano[2]	425.387	578.527	1.432.248	1.947.857
kWh/ano[3]	691.254	940.106	2.327.403	3.165.268
Custo Anual (R$)[1]	99.418,34	135.208,94	278.778,10	379.138,22
Custo Anual (R$)[2]	159.069,34	216.334,31	446.044,97	606.621,16
Custo Anual (R$)[3]	258.487,68	351.543,25	724.823,07	985.759,38
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	35.790,60	0,00	100.360,12
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	57.264,96	0,00	160.576,19
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	93.055,57	0,00	260.936,31

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G7 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 92,9 W e 119 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2001.

Tabela G7. Perdas Joulicas nos Condutores - 2001

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,73	0,85	0,94	1,09
I^2R (W)[1]	154.331	209.890	541.840	736.903
I^2R (W)[2]	246.929	335.824	866.944	1.179.044
I^2R (W)[3] - Total	401.260	545.714	1.408.785	1.915.947
kWh/ano[1]	281.654	383.049	988.858	1.344.848
kWh/ano[2]	450.646	612.879	1.582.174	2.151.756
kWh/ano[3]	732.300	995.928	2.571.032	3.496.604
Custo Anual (R$)[1]	105.321,68	143.237,48	307.960,20	418.825,87
Custo Anual (R$)[2]	168.514,69	229.179,97	492.736,32	670.121,39
Custo Anual (R$)[3]	273.836,36	372.417,46	800.696,52	1.088.947,26
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	37.915,80	0,00	110.865,67
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	60.665,29	0,00	177.385,07
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	98.581,09	0,00	288.250,75

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G8 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 94,9 W e 118,7 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2002.

Tabela G8. Perdas Joulicas nos Condutores - 2002

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,75	0,87	0,93	1,09
I^2R (W)[1]	171.711	233.527	520.872	708.385
I^2R (W)[2]	274.737	373.643	833.395	1.133.417
I^2R (W)[3] - Total	446.448	607.169	1.354.266	1.841.802
kWh/ano[1]	313.372	426.186	950.591	1.292.803
kWh/ano[2]	501.396	681.898	1.520.945	2.068.486
kWh/ano[3]	814.768	1.108.084	2.471.536	3.361.289
Custo Anual ()[1]	117.182,41	159.368,08	296.042,49	402.617,78
Custo Anual ()[2]	187.491,85	254.988,92	473.667,98	644.188,45
Custo Anual ()[3]	304.674,26	414.357,00	769.710,46	1.046.806,23
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	42.185,67	0,00	106.575,29
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	67.497,07	0,00	170.520,47
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	109.682,73	0,00	277.095,77

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G9 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 97 W e 118,4 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2003.

Tabela G9. Perdas Joulicas nos Condutores - 2002

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,76	0,89	0,93	1,09
I^2R (W)[1]	188.093	255.806	535.577	728.384
I^2R (W)[2]	300.949	409.290	856.922	1.165.415
I^2R (W)[3] - Total	489.042	665.097	1.392.499	1.893.799
kWh/ano[1]	343.270	466.847	977.427	1.329.301
kWh/ano[2]	549.232	746.955	1.563.884	2.126.882
kWh/ano[3]	892.501	1.213.802	2.541.311	3.456.183
Custo Anual (R$)[1]	128.362,28	174.572,70	304.400,16	413.984,21
Custo Anual (R$)[2]	205.379,64	279.316,31	487.040,25	662.374,74
Custo Anual (R$)[3]	333.741,92	453.889,01	791.440,40	1.076.358,95
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	46.210,42	0,00	109.584,06
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	73.936,67	0,00	175.334,49
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	120.147,09	0,00	284.918,55

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G10 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 99 W e 118 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2004.

Tabela G10. Perdas Joulicas nos Condutores - 2004

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,78	0,91	0,93	1,08
I^2R (W)[1]	213.904	290.910	543.833	739.613
I^2R (W)[2]	342.247	465.456	870.133	1.183.381
I^2R (W)[3] - Total	556.151	756.366	1.413.966	1.922.994
kWh/ano[1]	390.375	530.910	992.495	1.349.794
kWh/ano[2]	624.601	849.457	1.587.993	2.159.670
kWh/ano[3]	1.014.976	1.380.367	2.580.488	3.509.464
Custo Anual (R$)[1]	145.976,95	198.528,65	309.092,83	420.366,24
Custo Anual (R$)[2]	233.563,12	317.645,85	494.548,52	672.585,99
Custo Anual (R$)[3]	379.540,07	516.174,50	803.641,35	1.092.952,23
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	52.551,70	0,00	111.273,42
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	84.082,72	0,00	178.037,47
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	136.634,43	0,00	289.310,88

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005

A Tabela G11 mostra as perdas adicionais nos condutores, de 2,5 e 4,0 mm^2 com 2 x 20 (vinte) metros de comprimento, devido a uma DHT_i de TVs de 120%, considerando uma potência média ponderada de TVs por residência de 101 W e 117,7 W e uma tarifa média de eletricidade de 0,37394/kWh e 0,31143/kWh, respectivamente, para as concessionárias A e B no ano de 2005.

Tabela G11. Perdas Joulicas nos Condutores - 2005

	Concessionária A		Concessionária B	
DHT_i (%)	0	120	0	120
I (*pu*)	1,00	1,17	1,00	1,17
I (A)	0,80	0,93	0,93	1,08
I^2R (W)[1]	236.770	322.008	551.956	750.660
I^2R (W)[2]	378.832	515.212	883.130	1.201.056
I^2R (W)[3] - Total	615.603	837.220	1.435.086	1.951.716
kWh/ano[1]	432.106	587.664	1.007.320	1.369.955
kWh/ano[2]	691.369	940.262	1.611.712	2.191.928
kWh/ano[3]	1.123.475	1.527.926	2.619.031	3.561.883
Custo Anual (R$)[1]	161.581,61	219.751,00	313.709,58	426.645,03
Custo Anual (R$)[2]	258.530,58	351.601,59	501.935,33	682.632,04
Custo Anual (R$)[3]	420.112,20	571.352,59	815.644,90	1.109.277,07
Perdas Adicionais[1](R$)	0,00	58.169,38	0,00	112.935,45
Perdas Adicionais[2](R$)	0,00	93.071,01	0,00	180.696,72
Perdas Adicionais[3](R$)	0,00	151.240,39	0,00	293.632,17

I (*pu*) – corrente elétrica por unidade em relação a THD_i nula.

Fonte: Elaboração Própria com Base na PPH-1997/2005