TESE
1011

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica

Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama

ITAJUBA, DEZEMBRO 1998

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
de Itajubá - EFEI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E SUA RELAÇÃO COM A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Autor: Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama

Orientador: Prof. Dr. Jamil Haddad

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Itajubá, Dezembro de 1998.

DEDICATÓRIA

Dedico todo o mérito deste trabalho a Deus, e a todos aqueles que se propõem a engrandecer a história da humanidade.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jamil Haddad, por ter me dado esta oportunidade e se prestado a enfrentar este desafio.

Ao professor Carlos Alberto Mohallem Guimarães, por ter me apoiado de inúmeras formas.

Ao professor Délvio Franco Bernardes por ter me ajudado com o estudo prático.

Aos meus pais Roberto Gama e Marina Ramalho Pereira Gama, à minha namorada Suzana e aos amigos do Grupo de Estudos Energéticos pela amizade sincera, pela motivação proporcionada e por acreditarem no atingir deste grande objetivo.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os atuais programas de conservação de energia adotados pelas mais diversas empresas governamentais (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica - PROCEL) e não governamentais (Energy Services Companies - ESCOS e Consultorias em geral), são elaborados e executados considerando-se que o sistema elétrico de potência esteja trabalhando sob condições praticamente senoidais, com níveis de tensão e freqüência dentro de valores estabelecidos por normas. Desta forma, os problemas associados com a qualidade da energia elétrica não são levados em consideração.

Com o aumento das cargas não lineares no sistema elétrico, o problema da distorção harmônica tem se tornado cada vez mais significativo. Algumas medidas de conservação, tais como: a aplicação de inversores de freqüência para o controle da velocidade de motores, controladores de intensidade luminosa (*dimmers*), utilização de lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos, controladores de potência para chuveiros, entre outras, podem interferir na qualidade do sistema elétrico, de forma a aumentar as perdas e até causarem danos e prejuízo aos consumidores e à concessionária.

A principal contribuição deste trabalho é levar em consideração os problemas associados com a qualidade da energia (em específico os harmônicos), na avaliação das medidas de conservação. Faz-se uma nova avaliação econômica das medidas de conservação, incluindo as perdas em cabos e transformadores, a ocupação do sistema elétrico, a nova proposta de tarifação para ambientes distorcidos e algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios da qualidade da energia. Esta avaliação faz parte de uma metodologia que oferece condições para analisar a relação de compromisso entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica. E através de um estudo prático, realiza-se a aplicação da metodologia desenvolvida.

ABSTRACT

The current programs of Energy Conservation adopted by most governmental companies (e.g. National Program to Combat the Waste of Electric Energy - PROCEL) and non governmental ones (Energy Services Companies - ESCOS), are elaborated and executed considering that the electric power system is working under ideal conditions. With sinusoidal voltage and current waveforms levels and frequency within limits. Therefore, the power quality problems are not taken into account.

With the increase of non linear loads in the electric system, the problem of harmonic distortion has become more and more significant. Some procedures of conservation, such as application of adjustable speed drive, controllers of luminous intensity (dimmers), compact fluorescent lamps with electronic ballasts, shower power controllers, etc., may compromise the power quality, increasing the losses and causing deterioration of electrical equipments to consumers and power utilities.

The main contribution of this work is to take into account the power quality issues to evaluate the conservation procedures. A new economic evaluation has been made including the losses in cables and transformers, the electric system loading, the new tariff proposal for distorted power systems and some procedures to mitigate/eliminate the power quality problems. This evaluation is part of a methodology that analyzes the trade-off between the energy conservation and power quality. The proposed methodology has been applied to a practical case.

SUMÁRIO

Dedicatória ii
Agradecimentos iii
Resumo iv
Abstract v
Sumário vi
Lista de tabelas e figuras xi
Lista de símbolos, siglas e abreviaturas xvi

CAPÍTULO 1 - A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 21

1 – Introdução 21
1.1 - O programa de conservação de energia elétrica no brasil – PROCEL 22
1.2 - Métodos de conservação de energia elétrica 26
1.2.1 - Os principais sistemas consumidores de energia 26
1.2.2 - Alternativas tecnológicas utilizadas pelo lado da demanda 27
1.2.3 - Conservação na iluminação 28
1.2.3.1 - Utilização de tecnologias mais eficientes 28
1.2.3.2 - R*etrofitting* em sistemas de iluminação 30
1.2.3.3 - Controle da iluminação 31
I.2.4 - Conservação de energia em motores elétricos 31
1.2.4.1 - Redução de perdas em motores devido à otimização do material de aço do núcleo 31
1.2.4.2 - Redimensionamento de motores elétricos 32
1.2.4.3 - Utilização de inversores de freqüência 32
1.2.5 - Projetos arquitetônicos levando-se em conta a conservação de energia 35
1.2.6 - Conservação em ar condicionado 36
1.2.7 - Conservação em sistemas prediais 37
1.2.7.1 - Sistemas de automação 37

1.2.7.2 - Sistemas de controle de utilidades 38
1.2.7.3 - Controle do sistema de ar condicionado e ventilação 38
1.2.7.4 - Controle do suprimento de energia 39
1.2.8 - Análise da conta de energia elétrica 40
1.2.9 - Conservação através do dimensionamento econômico de condutores elétricos 43
1.2.10 - Conservação de energia em outros equipamentos e sistemas 44
1.2.10.1 - Ar Comprimido 44
1.2.10.2 - Aquecimento de água e isolamento térmico 45
1.2.10.3 - Sistemas frigoríficos e ar condicionado 45
1.2.11 - - Análise do investimento pelo ciclo de vida 46
1.3 - Análise econômica em conservação de energia 47
1.3.1 - Fluxos de caixa 47
1.3.2 - Taxa mínima de atratividade (TMA) 49
1.3.3 - Taxa interna de retorno (TIR) 50
1.3.4 - Critérios econômicos de decisão 50

CAPÍTULO 2 - A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA 53

2 – Introdução 53
2.1 - A qualidade da energia elétrica 54
2.2 - Definição da qualidade da energia elétrica 55
2.3 - Distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica 56
2.4 - Causas de alguns distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica 62
2.5 – Harmônicos 64
2.5.1 - Cargas lineares 64
2.5.2 - Cargas não lineares 65
2.5.3 - Análise matemática dos harmônicos 66
2.5.4 - Fontes de harmônicos 72
2.5.5 - Efeitos dos harmônicos 76
2.5.6 - Normalização harmônica 90
2.6 - Algumas medidas técnicas e operacionais de mitigação/eliminação de alguns distúrbios da qualidade da energia elétrica 93

2.7 - Nova definição de potência 94
2.8 - Nova proposta tarifária para ambientes distorcidos 97

CAPÍTULO 3 - A RELAÇÃO ENTRE A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA 102

3 – Introdução 102
3.1 - A relação entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica 103
3.2 - O problema da localização da medição do nível harmônico 105
3.3 - Esforço preliminar de quantificação dos efeitos causados por algumas medidas de conservação sobre a qualidade da energia 110
3.3.1 - Quantidades físicas 110
3.3.1.1 - Controladores de velocidade 110
3.3.1.2 - Utilização de lâmpadas fluorescentes 114
3.3.1.3 - Instalação de banco de capacitores 115
3.3.1.4 - Controladores de intensidade luminosa ("dimmers") 115
3.3.2 - Quantidades econômicas 116
3.3.2.1 - Procedimento 1: comparação dos custos, devido ao consumo de energia, considerando-se a nova proposta tarifária 117
3.3.2.2 - Procedimento 2: quantificação e contabilização da ocupação do sistema elétrico e de suas perdas 121
3.3.2.2.1 – Custo de Ocupação do Transformador (COTraf) 123
3.3.2.2.2 - Custo de ocupação dos condutores ou cabos (COCond) 124
3.3.2.2.3 - Custo de ocupação devido às perdas (COPe) 126
3.3.2.3 - Procedimento 3: quantificação dos custos de algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios causados por medidas de conservação 128
3.3.3 - Seqüência de passos para aplicação da metodologia 133
3.3.3.1 - Grandezas que devem ser medidas, calculadas ou adotadas para os pontos de análise 133

3.3.3.2 - Procedimento 1: aplicável em todos os casos em que houver distorção de corrente no ponto de análise 135
3.3.3.3 - Procedimento 2 135
3.3.3.4 - Procedimento 3 135

CAPÍTULO 4 - ESTUDO PRÁTICO PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA 136

4 – Introdução 136
4.1 – Estudo prático: utilização de um variador de potência para controlar a temperatura da água de um chuveiro elétrico 137
4.2 - Caso base 139
4.3 - Aplicação da metodologia de verificação da relação de compromisso entre a qualidade da energia e a conservação de energia elétrica 140
4.3.1 - Aplicação dos procedimentos da metodologia 144
4.3.1.1 - Procedimento 1: comparação entre o custo de fornecimento sob condições distorcivas e não distorcivas 144
4.3.1.1.1 - Custo de fornecimento sem distorção 144
4.3.1.1.2 - Custo de fornecimento com distorção 144
4.3.1.1.3 - Análise financeira para o procedimento 1 145
4.3.1.2 - Procedimento 2: quantificação e contabilização da ocupação do sistema elétrico e de suas perdas 147
4.3.1.2.1 - Custo de ocupação devido ao transformador 147
4.3.1.2.2 - Custo de ocupação devido ao condutor ou cabo 148
4.3.1.2.3 – O custo das perdas harmônicas no transformador (COPeT) 148
4.3.1.2.4 – O custo das perdas harmônicas no condutor ou cabo (COPeC) 149
4.3.1.2.5 - Análise financeira do procedimento 2 149
4.3.1.3 - Procedimento 3 - quantificação dos custos de uma medida de mitigação da distorção harmônica causada pelo chuveiro controlado 151
4.3.1.3.1 - Análise financeira do procedimento 3 152

4.3.2 - Análise global dos resultados da metodologia 157
4.3.2.1 – Fluxo de caixa sem a medida de conservação para o consumidor 157
4.3.2.2 – Fluxo de caixa com a medida de conservação para o consumidor 157
4.3.2.3 – Fluxo de caixa sem a medida de conservação para a concessionária 158
4.3.2.4 – Fluxo de caixa com a medida de conservação para a concessionária 158

RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES 159

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 161

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR 166

ANEXOS 170

ANEXO A: Trabalho de Retrofitting Utilizando-se da Simulação de Monte Carlo 170
ANEXO B: Resultados de uma Análise do Impacto das Depressões de Tensão sobre alguns Equipamentos Eletrônicos 177
ANEXO C: Medições em Lâmpadas, Realizadas com a Utilização do Analisador de Redes Circutor Modelo AR4 179
ANEXO D: Medições de Grandezas Elétricas da Carga em Teste 188
ANEXO E: Resultados das Medições para o Estudo Prático 189
ANEXO F: Folheto Demonstrativo de um Variador de Potência para Chuveiro Residencial 194
ANEXO G: Artigos resultantes da Dissertação 197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Estrutura de consumo de energia por setor

Tabela 1.2 - Algumas Alternativas Tecnológicas Utilizadas pelo Lado da Demanda

Tabela 1.3 - Características de seis tecnologias eficientes em iluminação.

Tabela 1.4 - Equivalência entre lâmpadas

Tabela 1.5 - Potência Média Consumida a Plena Carga

Tabela 1.6 - Relação entre consumo de energia e vazamento de ar.

Tabela 2.1 - Características das Variações Instantâneas de Tensão.

Tabela 2.2 - Implicações de alguns distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica

Tabela 2.3 - Conteúdo harmônico das fontes usadas.

Tabela 2.4 - Fatores de Correção para correntes harmônicas em circuitos trifásicos com neutro.

Tabela 2.5 - Fatores de correção (K) para um transformador sujeito a harmônicos.

Tabela 2.6 - Limites de distorção de tensão - IEEE 519

Tabela 2.7 - Limites de tensão por consumidor expressos em % da tensão fundamental - ELETROBRÁS, 1993

Tabela 2.8 - Limites de distorção da Corrente (120 V a 69 kV) - IEEE 519

Tabela 2.9 - Limites globais de tensão expressos em % da tensão fundamental - ELETROBRÁS, 1993

Tabela 2.10 - Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa tensão-IEC1000-2-2

Tabela 3.1 - Benefícios e Efeitos da Conservação sobre a Qualidade da Energia Elétrica

Tabela 3.2 - Influência dos Harmônicos no Acréscimo de Corrente e na Redução do Fator de Potência.

Tabela 3.3 - Duração e Intensidade das Depressões de Tensão.

Tabela 3.4 - Categorização do Desempenho dos ASD's durante as Depressões de Tensão.

Tabela 3.5 - Desempenho dos ASD's de 20HP, durante as Depressões de Tensão.

Tabela 3.6 - Desempenho dos ASD's de 3HP, durante as Depressões de Tensão.

Tabela 3.7 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 20HP, THDi em %.

Tabela 3.8 - Eficiência dos ASD's de 20HP em %.

Tabela 3.9 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 3HP, THDi em %.

Tabela 3.10 - Eficiência dos ASD's de 3HP em %.

Tabela 3.11 - Efeitos do *Retrofitting* de lâmpadas na Qualidade da Energia Elétrica

Tabela 3.12 - Níveis de fator de potência e de Distorção da 3ª Harmônica de corrente para uma lâmpada incandescente com Controlador de intensidade luminosa *(dimmer).*

Tabela 3.13 - Aumento no Custo de Fornecimento de Energia para várias Distorções Harmônicas (THDi), baseado na Nova Proposta Tarifária para Ambientes Distorcidos.

Tabela 3.14 - Características das Correntes Harmônicas.

Tabela 3.15 - Potencial de energia economizada para diferentes localizações de colocação dos filtros.

Tabela 3.16 - Procedimentos para Avaliação da Relação de Compromisso entre a Conservação de Energia e a Qualidade de Energia Elétrica.

Tabela 4.1 - Alguns pontos retirados do Anexo D, representativos da medição realizada.

Tabela 4.2 - Condição de Consumo Antes da adoção da Medida de Conservação

Tabela 4.3 - Condição de Consumo Após a adoção da Medida de Conservação

Tabela 4.4 - Resultados da Medida de Conservação.

Tabela 4.5 - Pontos de Análise para Aplicação da Metodologia.

Tabela 4.6 - Condição de consumo antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 1 sem a cobrança da distorção harmônica.

Tabela 4.7 - Resultados da medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1, sem a cobrança da distorção harmônica.

Tabela 4.8 - Condição de Consumo Antes e Após a Medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1 com a cobrança da distorção harmônica.

Tabela 4.9 - Resultados da medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1, com a cobrança da distorção harmônica.

Tabela 4.10 - Perdas para a concessionária, antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 2, sem a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.

Tabela 4.11 - Perdas para a concessionária baseadas nos resultados da medida de conservação através do PROCEDIMENTO 2, sem a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.

Tabela 4.12 - Perdas para a concessionária, antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 2, com a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.

Tabela 4.13 - Perdas para a concessionária baseadas nos resultados da medida de conservação através do PROCEDIMENTO 2, com a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.

Tabela 4.14 - Custo máximo para a medida de mitigação do distúrbio provocado pela medida de conservação de energia adotada, baseado no PROCEDIMENTO 3.

Tabela 4.15 - Comparação entre os custos com consumo de energia com e sem as medidas de mitigação, baseado no PROCEDIMENTO 3.

Tabela 4.16 - Resumo dos Resultados da Aplicação da Metodologia através dos PROCEDIMENTOS 1 a 3

Tabela B1 - Falha dos Equipamentos por Ano.

Tabela B2 - Resistividade Elétrica e Coeficiente de Temperatura

Tabela B3 - Valores Experimentais dos Coeficientes Ks e Kp para condutores de cobre.

Tabela B4 - Resistência máxima do condutor à corrente contínua a 20°C, R_{CC20}, [Ω/km].

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxo e potência em função da velocidade de rotação para turbomáquinas

Figura 1.2 - Economia de Energia com Turbomáquinas.

Figura 1.3 - Custo inicial e operacional em função da seção nominal dos condutores.

Figura 1.4 - Exemplo de fluxo de caixa

Figura 1.5 - Fluxo de caixa

Figura 1.6 - Série Gradiente

Figura 1.7 - Taxa interna de retorno

Figura 1.8 - Processo gráfico para o cálculo da TIR

Figura 2.1 - Forma de onda de um sinal elétrico de uma carga linear.

Figura 2.2 - Forma de onda de tensão e corrente solicitada por uma carga não linear.

Figura 2.3 - Efeito Notch.

Figura 2.4 - Sobretensão e Subtensão Momentâneas, respectivamente.

Figura 2.5 - Momentary Interruption

Figura 2.6 - Temporary Interruption
Figura 2.7 - Forma de onda Harmônica
Figura 2.8 - Flutuação de Tensão.
Figura 2.9 - Ruído de um sinal elétrico.
Figura 2.10 - Consumo de um aquecedor de 1kW.
Figura 2.11 - Consumo de um motor trifásico de 1/6 cv
Figura 2.12 - Dispositivo Semicondutor de Controle da corrente e da tensão - Carga Não Linear.
Figura 2.13 - Sinal de tensão com harmônicos ímpares.
Figura 2.14 - Circuito Retificador de Onda Completa
Figura 2.15 - Ponte trifásica na Configuração Graetz.
Figura 2.16 - Variação da Corrente Harmônica em função da Potência de uma lâmpada.
Figura 2.17 - Aquecimento devido a fontes com harmônicos.
Figura 2.18 - Aumento de Temperatura no motor devido a fontes com intensidades harmônicas diferentes.
Figura 2.19 - Diagrama unifilar simplificado de um sistema conversor.
Figura 2.20 - Circuito equivalente para harmônica de ordem "n".
Figura 2.21 - Razão entre as resistências Rca/Rcc em função das freqüências harmônicas.
Figura 2.22 - Efeito pelicular (Y_S) e efeito de proximidade (Y_P) para o cabo AWG #12.
Figura 2.23 - Efeito pelicular (Y_S) e efeito de proximidade (Y_P) para o cabo AWG 4/0.
Figura 2.24 - Triângulo de Potências para Ambientes Distorcidos.
Figura 3.1 - Acréscimo de Corrente devido à distorção harmônica.
Figura 3.2 - Redução no Fator de Potência Total devido à distorção harmônica de corrente.
Figura 3.3 - Ocupação de parte do sistema elétrico devido à correção do fator de potência.
Figura 3.4 - Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos.
Figura 3.5 - Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos.
Figura 3.6 - Aumento no Custo de Consumo devido a Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).
Figura 3.7 - Aumento no Custo de Consumo devido a Vários Valores de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).
Figura 3.8 - Exemplo de Circuito com Cargas Lineares
Figura 3.9 - Formas de Onda da Tensão (a) e da Corrente na Carga (b).
Figura 3.10 - Possíveis localizações para mitigação harmônica.

Figura 4.1 - Circuito de Teste para Verificação da Relação Conservação / Qualidade.
Figura 4.2 - Perdas no transformador contabilizadas para o consumidor.
Figura 4.3 - Perdas no transformador contabilizadas para a concessionária.
Figura 4.4 - Custo devido ao Consumo de Energia Elétrica.
Figura 4.5 - Relação de Compromisso entre a Conservação e a Qualidade da Energia Elétrica.
Figura 4.6 - Fluxo de caixa do custo devido ao consumo de energia sem a medida de conservação.
Figura 4.7 - Fluxo de caixa do custo devido ao consumo de energia com a medida de conservação.
Figura 4.8 - Fluxo de caixa do faturamento da concessionária sem a medida de conservação.
Figura 4.9 - Fluxo de caixa do faturamento da concessionária com a medida de conservação.

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

ASD	- Adjustable Speed Drive
BID	- Banco Interamericano de Desenvolvimento.
BIRD	- Banco Mundial
CEPEL	- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CLP	- Controlador Lógico Programável
DEP	- Disciplina Energética Pessoal
GCOI	- Grupo de Coordenação e Operação Interligada
GCOS	- Grupo de Coordenação e Operação do Sistema Elétrico
GLD	- Gerenciamento pelo Lado da Demanda.
HVDC	- High Very Direct Current
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- International Electrotechnical and Electronics Engineering
LFC	- Lâmpadas Fluorescentes Compactas
PAC	- Ponto de Acoplamento Comum
PIR	- Planejamento Integrado de Recursos.
PROCEL	- Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica.
QEE	- Qualidade da Energia Elétrica
RGR	- Reserva Global de Reversão
RMS	- Root Medium Square
SMES	- Superconductor Magnetic Energy Storage
Trafo	- Transformador
UPS	- Uninterrupty Power System

SIGLAS

aFP - Fator de Potência devido à Assimetria

aFR - Fator de Potência de Referência, devido à Assimetria

VA - Retorno Anual [R$]

A - Potência de Assimetria [VA_{ASSIM}]

COCond - Custo de Ocupação dos Condutores (ou Cabos) [R$]

$COCond_F$ - Custo de Ocupação dos Condutores de Fase [R$]

$COCond_N$ - Custo de Ocupação do Condutor Neutro [R$]

$COCond_V$ - Custo de um Condutor Virtual [R$]

COPe - Custo de Ocupação devido às perdas [R$]

COPeC - Custo de Ocupação devido às perdas harmônicas no cabo [R$]

COPeT - Custo de Ocupação devido às perdas harmônicas no Transformador [R$]

COTraf - Custo de Ocupação do Transformador [R$]

dc - Diâmetro do condutor [mm]

dFP - Fator de Potência de deslocamento

D - Fluxo Volumétrico [m^3/s]

dFR - Fator de Potência de Referência

E - Energia Dissipada [Wh]

EER - Eficiência Energética de Refrigeração [%]

F - Freqüência do sistema, em Hz;

fr - Fator de redução

F - Valor Futuro [R$]

FP - Fator de Potência Real

FRC - Fator de Recuperação de Capital

FVP - Fator de Valor Presente

G - Valores de uma série gradiente

H - Potência Harmônica [VA_{HARM}]

h - Ordem dos harmônicos

h_{max} - Ordem máxima dos harmônicos

h_n - Nível do harmônico [%]

hFP - Fator de Potência devido aos Harmônicos

hFR - Fator de Potência de Referência, devido aos Harmônicos

i - Taxa de juros [%]

Inv - Investimento Inicial [R$]

I_{TOTAL} - Corrente Total rms [A]

I_h - Corrente Harmônica [A]

Ih_R - Corrente resultante da operação de um número determinado de equipamentos [A]

I_1 - Corrente Fundamental [A]

I_A - Corrente devido à Potência de Assimetria [A]

I_B - Corrente de Projeto [A]

I'_B - Corrente de Projeto Fictícia [A]

I_H - Corrente devido à Potência Harmônica [A]

I_N - Corrente de Neutro [A]

I'_N - Corrente de Neutro Fictícia [A]

I_L - Corrente média (período de 12 meses) correspondente à demanda máxima da carga. [A]

I_P - Corrente devido à potência ativa [A]

I_Q - Corrente devido à potência reativa [A]

Isc - Corrente de curto-circuito máxima no Ponto de Acoplamento Comum [A]

I_T - Corrente Total [A]

K - Fator de Correção ou majoração para transformador

Kd - Fator de Dispersão

K_I - Fator de Distorção de Corrente

K_P - Coeficiente utilizado para o cálculo de X_P

K_S - Coeficiente utilizado para o cálculo de X_S

Ksa - Fator de Saturação

Kv - Fator de Simultaneidade

ℓ - Comprimento do circuito [m]

n - Número de períodos [unidade do período]

n - Ordem do harmônico

N - Número de Consumidores por Barra

p - Porcentagem de 3° harmônico [%]

P - Potência Ativa [W]

P_1 - Potência Ativa Fundamental [W]

P_{EC} - Perdas devidas às Correntes de Foucault [W]

P_{EC-1} - Perdas devidas às Correntes de Foucault sob condições nominais [W]

P_{HC} - Perdas Harmônicas no Condutor [W]

P_{LIB} - Potência Liberada [W]

P_{LL} - Perda sob carga do transformador [W]

P_{Loss} - Potência perdida no transformador [W]

P_{NL} - Perdas em vazio do transformador [W]

P_R - Perdas por efeito Joule do transformador [W]

P_{ST} - Perdas Adicionais do transformador [W]

Q - Potência Reativa [VAr]

Q_1 - Potência Reativa Fundamental [VAr]

R_{CA} - Resistência elétrica do condutor em corrente alternada [Ω]

R_{CC} - Resistência elétrica do condutor em corrente contínua [Ω]

R_{CC20} - Resistência elétrica do condutor em corrente contínua a 20°C, em [Ω]

R_{CCT} - Resistência elétrica da bobina do transformador em corrente contínua [Ω]

R_h - Resistência (R_{CA}) do condutor para cada nível harmônico na temperatura de trabalho [Ω]

s - Distância entre os eixos dos condutores adjacentes [mm]

S - Potência Aparente [VA]

S_1 - Potência Aparente Fundamental [VA]

Sc - Seção transversal do condutor [mm^2]

S_T - Potência Aparente Total [VA]

S_n - Soma dos elementos de uma progressão geométrica

SE - Seção Econômica (mm^2)

t - Tempo de Operação do Sistema [horas]

TIR - Taxa Interna de Retorno [%]

TMA - Taxa mínima de atratividade [%]

TC - Tarifa de Consumo de Energia Elétrica [R$/kWh]

TD - Tarifa de Demanda [R$/kW]

TR - Tonelada de Refrigeração

THD - Distorção Harmônica Total [%]

THD_v - Distorção Harmônica Total de Tensão [%]

THD_i - Distorção Harmônica Total de Corrente [%]

THD_iR - Distorção Harmônica Total de Corrente de Referência [%]

V_1 - Tensão Fundamental [V]

VA - Valor Anual [R$]

VAL - Valor Anual Líquido [R$]

VAR0 - Valor Anual da redução esperada [R$]

VAR1 - Valor Anual da redução ocorrida [R$]

VAR2 - Valor Anual do custo da medida de mitigação [R$]

VP - Valor Presente [R$]

VPR0 - Valor Presente da Redução Esperada [R$]

VPR1 - Valor Presente da Redução Ocorrida [R$]

VPR2 - Valor Presente do Custo da Medida de Mitigação [R$]

V_{1B} - Tensão Fundamental Simétrica [V]

V_{1A} - Tensão Fundamental não Simétrica [V]

V_H - Tensão Harmônica total [V]

VP - Valor Presente [R$]

X_P - Argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito proximidade

X_S - Argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito pelicular

Y_S - Fator de efeito pelicular

Y_P - Fator de efeito proximidade

SÍMBOLOS GREGOS

θ_C - Máxima temperatura de operação (°C)

α_{20} - Coeficiente de temperatura a 20°C para correção da resistividade K

φ - Ângulo do Fator de Potência de Deslocamento [°]

φ_1 - Ângulo do Fator de Potência de Deslocamento para tensão e corrente fundamentais [°]

θ - Ângulo do Fator de Potência Real [°]

Δ - Variação instantânea [s]

ρ - Resistividade do material condutor [$\Omega.mm^2$ / m]

ω - Freqüência angular [rad/s]

∞ - Infinito

ϕ - Ângulo de Fase [°]

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ EFEI

CAPÍTULO 1

A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (PROCEL) adotado no Brasil. Suas medidas de conservação e suas metas.

São vistos também algumas medidas de conservação de energia, os principais sistemas consumidores e algumas alternativas tecnológicas utilizadas no gerenciamento pelo lado da demanda.

É abordada a conservação de energia em:

- Iluminação: novas tecnologias; *retrofitting;* controle através de *dimmers.*
- Motores elétricos: redução de perdas através de materiais mais eficientes no núcleo; redimensionamento; utilização de inversores de freqüência.
- Projetos arquitetônicos: levando-se em conta a conservação de energia.
- Ar condicionado: substituição ou *retrofitting,*
- Sistemas prediais: automação; controle do sistema de ar condicionado e ventilação; controle do suprimento de energia.
- Análise da conta de energia elétrica: consumo específico de energia; análise do fator de carga; otimização da demanda; análise da opção tarifária; correção do fator de potência.
- Dimensionamento econômico de condutores elétricos: determinação da seção econômica do condutor.
- Conservação de energia em outros equipamentos e sistemas: ar comprimido; aquecimento de água.
- Análise do investimento pelo ciclo de vida: análise econômica em conservação de energia, fluxos de caixa, valor presente, valor anual uniforme, valor futuro, taxa mínima de atratividade, taxa interna de retorno.

Este capítulo tem por objetivo introduzir algumas medidas de conservação, adotadas pelos programas, para que posteriormente elas possam ser relacionadas com a qualidade da energia elétrica no Capítulo 2.

1.1 - O PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL - PROCEL

O Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, criado em dezembro de 1985 e instituído no ano seguinte, é um programa do governo, coordenado pelo Ministério das Minas e Energia e cujo controle de sua execução cabe à Centrais Elétricas Brasileiras SA (Eletrobrás). Objetiva promover o combate ao desperdício de energia elétrica em todo o País, trazendo vantagens tanto para o consumidor como para o País, além da economia direta no consumo. A seguir, citam-se alguns benefícios:

- consciência contra o desperdício;
- postergação ou minimização dos investimentos necessários à expansão do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica;
- redução de custos para o setor elétrico, para os consumidores e para o País;
- melhoria da qualidade de produtos e serviços oferecidos à sociedade;
- aumento da produtividade e da competitividade;
- maior garantia e melhores condições de atendimento ao mercado consumidor de energia elétrica;
- minimização do impacto ambiental causado pelas instalações de geração, transmissão e distribuição de energia.

O PROCEL estabelece metas de redução de desperdícios que são consideradas no planejamento formal do setor elétrico. Neste planejamento é feito um Plano Estratégico para um horizonte de dez anos (Plano Decenal).

No período 1995/1998, as ações do PROCEL devem resultar numa redução de desperdícios da ordem de 7,3T Wh, o equivalente a uma usina virtual de 1.500 MW (ou a duas máquinas de Itaipu) que, se construída, custaria ao país cerca de R$3 bilhões.

As metas de longo prazo do programa, incluídas no plano 2015 da Eletrobrás, apontam para números ainda mais atrativos: a redução do consumo deverá ser da ordem de 130TWh no ano 2015, o que eqüivale a evitar a expansão do sistema elétrico em 25.000 MW (cerca de duas usinas de Itaipu), com ganho líquido para o Brasil de R$34 bilhões.

Para atingir estas metas, o PROCEL tem centrado seu interesse nas seguintes áreas:

- elaboração de planos de ação para programas de combate ao desperdício;
- elaboração e implementação de planos de marketing;

  Esta atividade inclui a concessão anual do Selo de Eficiência Energética e do Prêmio PROCEL de Combate ao Desperdício de Energia. O Selo de Eficiência Energética é entregue a equipamentos campeões de economia de energia em diversas categorias. O Prêmio é destinado a diversas empresas ou pessoas que apresentem realizações importantes no combate ao desperdício de energia elétrica.
- proposição de políticas e instrumentos legais/econômicos de incentivo

  O PROCEL/Eletrobrás dispõe de uma linha de crédito que pode ser usada de imediato pela concessionária - a Reserva Global de Reversão (RGR).
- política de financiamento e de fortalecimento de empresas privadas de diagnóstico energético;
- adequação e aplicação de metodologias;
- desenvolvimento de sistemas de informação computadorizados;
- projetos de **Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD);**

O gerenciamento pelo lado da demanda é um conjunto de ações planejadas, voltadas para administrar a demanda no interesse da concessionária, aliviando circuitos e transformadores de distribuição e transmissão, através do deslocamento de cargas dos consumidores. Podem resultar também em economia no suprimento ou na geração, com a redução de perdas e com o uso mais eficiente da energia.

Projetos de GLD permitem, basicamente, a redução da carga nos períodos de ponta, o que aumenta a segurança no abastecimento de energia. Em muitos casos essa redução resulta do deslocamento de cargas para períodos fora de ponta, suavizando a curva de carga e criando condições para o crescimento gerenciado do mercado.

Um programa de GLD se constitui, geralmente, em alternativas à expansão do sistema elétrico, e se baseia num plano integrado de ações que usa os parâmetros e os conhecimentos básicos da própria empresa e que envolve todas as suas áreas, permitindo a discussão de estratégias e a integração de toda a equipe. As soluções pelo lado da demanda custam, em média, 15% do valor daquelas adotadas pelo lado da oferta.

- Projetos de Planejamento Integrado de Recursos - PIR

  O Planejamento Integrado de Recursos é um planejamento moderno que contempla múltiplos objetivos, tais como: econômicos, sociais e ambientais. Requer para isso a aplicação de um processo de planejamento mais complexo que integre esses objetivos quase sempre conflitantes e, ao mesmo tempo, considere a utilização dos recursos energéticos alternativos e convencionais o mais amplamente possível.

  O resultado esperado das mudanças trazidas pelo PIR é o de criar um ambiente econômico mais favorável para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de uso-final eficientes, limpas e de produção de energia menos centralizadas, incluindo fontes renováveis. O uso do PIR significa que esta opções serão consideradas, e com a inclusão dos custos ambientais significa que elas poderão parecer relativamente atraentes, comparadas com as opções de oferta tradicionais.

- Montagem de projetos segundo modelos do BID/BIRD para pedidos de financiamento

  Com o objetivo de buscar oportunidades para prestação de serviços a países em desenvolvimento, o PROCEL mantém parcerias com instituições financeiras internacionais, como o Banco Interamericano de Desenvolvimento - BID e o Banco Mundial - BIRD.

- **atuação no uso final** (residencial, industrial, comercial, rural e público)

Dentre os benefícios monetários que a conservação de energia pode proporcionar, deve-se observar também outros indiretos da Eficiência Energética.

"Tecnologias para melhorar a eficiência do uso-final de energia freqüentemente oferecem outros benefícios além de continuar garantindo o acesso aos serviços de energia. Estes benefícios podem ser evidentes tanto no nível da sociedade como um todo quanto no nível do consumidor individual ou da firma. Para o consumidor, estes benefícios podem ser categorizados como (MILLS and ROSENFELD, 1994):

- ambiente interno melhorado, conforto, saúde e segurança (por melhor iluminação);
- ruídos reduzidos através de melhor isolamento;
- economias de tempo e trabalho (produtividade melhorada) por iluminação eficiente;
- economias de água e redução de desperdício por aparelhos mais eficientes;
- diminuição ou eliminação do equipamento de uso-final (através de cargas reduzidas);
- controle de processo melhorado.

Ao nível social (regional, nacional ou global), benefícios não-monetários de vantagens decorrentes de maior eficiência de uso de energia podem ser categorizados como:

- segurança de suprimento de energia através de redução nas importações;
- segurança nacional através de fluxo reduzido de materiais radioativos e físseis;
- criação de emprego e desenvolvimento econômico local;
- redução de pressões no mercado de capitais;
- aumento de competitividade internacional de produtos e serviços produzidos no país;
- posição realçada dos produtos domésticos eficientes no mercado exportador;
- proteção ambiental.

A princípio estes benefícios poderiam ser representados por quantias monetárias e aplicados para comparações de custo de energia. Na prática, entretanto, estas questões são tratadas totalmente de maneira qualitativa." (Jannuzzi - 1997).

Deste modo, pretende-se com a introdução dos conceitos de conservação de energia elétrica, entre outros, fomentar e realizar medidas que visem em princípio dois resultados básicos:

- A **Disciplina Energética Pessoal (DEP)**, que nada mais é do que obter bons modos no uso da energia elétrica (ou outra fonte energética qualquer).

- A utilização racional da energia visando a minimização das perdas e a eliminação dos desperdícios em geral.

1.2 MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A estrutura de consumo de energia elétrica no Brasil está mostrada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Estrutura de consumo de energia por setor

Industrial		**Residencial**		**Comercial**		**Público e Rural**
Motores Elétricos	51%	Refrigeração (geladeiras e *freezers*)	32%	Refrigeração	17%	Iluminação Pública
Processos Eletroquímicos	21%	Aquecimento de Água	26%	Condicionamento Ambiental	20%	
Aquecimento	20%	Iluminação	24%	Iluminação	44%	Saneamento
Refrigeração	6%	Outros	18%	Outros	19%	
Iluminação	2%					Prédios Públicos
% do total do consumo no Brasil						
45%		**26,9%**		**13,4%**		**14,7%**

FONTE: [PROCEL, 1998]

Baseado nesta estrutura, as ações de conservação de energia adotadas pelo PROCEL estão concentradas nos três maiores consumidores de cada setor.

1.2.1 - OS PRINCIPAIS SISTEMAS CONSUMIDORES DE ENERGIA

Pode-se dizer que a energia é um bem essencial e utilizado em todos os setores ou áreas da sociedade.

Em certos setores produtivos, a energia representa não somente um insumo essencial, mas também constitui-se como um dos elementos de maior peso na estrutura de custos. As indústrias siderúrgicas, de alumínio e ferro ligas, chamadas energo-intensivas, enquadram-se nessa situação. Nos demais setores industriais, a energia elétrica é predominantemente consumida nos motores, utilizados para a movimentação mecânica de diversos tipos.

No setor de comércio e serviços, a energia elétrica é utilizada principalmente para a iluminação e condicionamento de ar, que representam cerca de 80% do consumo total desse segmento e das edificações, e em menor escala para o transporte vertical nos elevadores e para o acionamento dos equipamentos elétricos em geral, com o computador ocupando crescentemente esse segmento.

1.2.2 - ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS UTILIZADAS PELO LADO DA DEMANDA

Dentre as medidas de gerência pelo lado da Demanda e atuação no uso final, pode-se destacar as alternativas tecnológicas, vistos na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Algumas Alternativas Tecnológicas Utilizadas pelo Lado da Demanda

Setor Residencial	Setor Comercial	Setor Industrial
• Eletrodomésticos de alta eficiência (incluindo ar condicionado e bombas de calor para aquecimento ambiental e de água) • Iluminação eficiente através de lâmpadas fluorescentes compactas • Isolação Térmica de aquecedores de água • Torneiras e chuveiros de baixa vazão • Isolação térmica de prédios • Projeto de prédios energeticamente eficientes • Filme solar para janelas • Controladores Programáveis • Aquecimento Solar • Etc.	• Iluminação fluorescente de alta eficiência • Controle de Iluminação (*dimmer*)[1] • Sistema de controle de Demanda • Isolação térmica de prédios • Filme solar para janelas • Ar condicionado e bombas de calor de alta eficiência • Projeto de prédios energeticamente eficiente • Estudos de Retrofitting em Iluminação • Etc.	• Controladores ajustáveis de freqüência ou os Controladores de Velocidade Variável para motores • Compensação de Potência Reativa através de bancos de capacitores • Motores de alta eficiência • Dimensionamento ótimo de motores • Iluminação interior e exterior com lâmpadas de sódio a alta pressão • Recuperação de calor de processo • Cogeração Industrial • Bombas de calor para processo • Equipamentos Eletrotérmicos • Recondutoramento de instalações

FONTE: [PROCEL, 1998].

[1] Os *dimmers* são dispositivos capazes de controlar o período de condução de corrente aplicado às lâmpadas incandescentes e consequentemente as suas intensidades luminosas.

1.2.3 – CONSERVAÇÃO NA ILUMINAÇÃO

A iluminação representa cerca de 17% do consumo de energia elétrica no Brasil (PROCEL, 1998). No setor comercial/serviços, é responsável por cerca de 44% do total. Dentro desse setor, em atividades bancárias ou educacionais, por exemplo, representa mais de 50% da energia elétrica total consumida.

Já se observa no segmento comercial, cujas tarifas são as mais elevadas, um crescente interesse em sistemas eficientes de iluminação. Esse processo é mais nítido no setor bancário, lojas de departamentos, grandes prédios comercias e *shopping centers*. Especialmente nesses setores, os investimentos em conservação de energia e redução de despesas operacionais passaram a ser considerados com maior importância e analisados em função do custo do ciclo de vida do empreendimento, e não somente pelo investimento inicial ou prazo de retorno.

Os equipamentos, produtos e sistemas eficientes de iluminação que mais crescem no segmento comercial são: lâmpadas fluorescentes tubulares eficientes (32 W e 36 W), lâmpadas fluorescentes compactas, luminárias reflexivas, reatores eletrônicos, sistemas de gerenciamento inteligente e projetos arquitetônicos racionais.

A metodologia para análise do sistema de iluminação consiste em avaliar a quantidade de luz que determinado ambiente necessita, levando em consideração o tipo de atividade que nele se desenvolve, além do estudo do tipo de lâmpada e luminária mais adequados ao ambiente.

Existem vários métodos de conservação de energia elétrica em Iluminação. Entre os principais, pode-se citar:

1.2.3.1 – Utilização de tecnologias mais eficientes.

A substituição de lâmpadas incandescentes, mista e vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de mercúrio e sódio na iluminação pública e em indústrias é um dos exemplos do uso de tecnologias mais eficientes. Incentivando a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) em residências, estabelecimentos comerciais. Dentro deste item, destacam-se também a utilização de reatores eletrônicos e luminárias reflexivas. A tabela 1.3 a seguir indica algumas características de seis tecnologias eficientes em iluminação.

Tabela 1.3 - Características de seis tecnologias eficientes em iluminação.

Produto	Redução Média de Potência por Unidade	Utilização Anual (horas / ano)	Vida Útil Média (anos)	Fator de Coincidência na Ponta
Vapor de Sódio	150	4.500	4	0,85
LF Compacta	45	2.500	3	0,5
LF Circular	60	1.000	10	0,8
Lâmpadas T8	10	3.000	3,3	0,5
Reatores Eletrônicos	28	3.000	10	0,5
Luminária Reflexiva	52	3.000	10	0,5

FONTE: (GELLER, H. S. et alli., 1996).

A Tabela 1.4 mostra a relação entre o fluxo luminoso de algumas lâmpadas com a sua potência.

Tabela 1.4 - Equivalência entre lâmpadas

Lâmpadas			
Tipo	Eficiência	Potência	Vida Útil
Incandescente comum	8 a 18 lm/W	25 a 500 W	1000 h
Incandescente refletora	8,75 a 12 lm/W	40 a 300 W	1000 h
Incandescente halógena	17 a 22 lm/W	300 a 2000 W	2000 h
Incandescente halógena dicróica	19 lm/W	20 a 75 W	3000 h
Fluorescente	56 a 75 lm/W	15 a 110 W	7500 h
Fluorescente compacta	44 a 65 lm/W	7 a 26 W	10000 h
Vapor de mercúrio de alta pressão	40 a 55 lm/W	50 a 400 W	15000 h
Vapor metálico	68 a 100 lm/W	70 a 3500 W	2000 a 10000 h
Vapor de sódio de alta pressão	80 a 125 lm/W	70 a 1000 W	15000 h
Luz mista	19 a 27 lm/W	160 a 500 W	5000 h

FONTE: [AGENCIA, 1998].

1.2.3.2 – *Retrofitting* em Sistemas de Iluminação.

O termo *Retrofitting* pode ser interpretado como a reforma de algum sistema onde se incorporam novas tecnologias voltadas para a conservação de energia, com melhoria significativa no seu desempenho.

Uma correta análise das alternativas e da avaliação dos investimentos se torna necessária para a execução do *retrofitting*.

Sabe-se que várias considerações devem ser feitas para que se consiga determinar com o menor erro possível o valor presente e/ou o tempo de retorno do investimento em análise.

Dentre estas estimativas, citam-se a vida útil de lâmpadas e reatores, implicando em um maior ou menor custo de manutenção no período considerado; o período de funcionamento do sistema em análise, implicando num aumento ou diminuição do custo de energia elétrica da alternativa. Outros fatores também podem ser relevantes, tais como a variação no custo da energia (demanda e consumo na ponta e fora de ponta), variação no preço das lâmpadas e reatores a serem substituídos e seus respectivos custos de troca.

Devido à sua popularidade, os sistemas de iluminação fluorescente tubular representam um interesse primordial em relação aos esforços de conservação de energia na iluminação. Especificamente lâmpadas de 32, 36 e 40 W e os reatores duplos de 220V concentram o maior volume de aplicações em sistemas de iluminação tubular. As lâmpadas tubulares representam cerca de 74% do mercado de lâmpadas fluorescentes e os reatores duplos 68% do mercado de reatores.

Assim, em muitas ocasiões, realizar um *retrofitting* em sistemas de iluminação torna-se muitas vezes bem interessante do ponto de vista da conservação de energia e também para a melhoria da qualidade do ambiente no qual o sistema participa.

No Anexo A, encontra-se um trabalho que realiza a "Análise do tempo de retorno de investimento e do valor presente em dois casos de *retrofitting* através da variação da vida útil e do período de funcionamento de reatores e lâmpadas fluorescentes, utilizando a técnica de simulação de Monte Carlo. Neste trabalho, chega-se a conclusões que demonstram que determinadas alternativas de *retrofitting* são financiáveis pela própria economia de energia gerada pela melhoria no sistema.

1.2.3.3 – Controle da Iluminação

Os controladores específicos para iluminação acionam os circuitos elétricos em função de programação horária ou de comandos remotos do operador da sua posição central. Isto significa operação sem pessoal, no instante exato para gastar somente o necessário. Com este recurso várias técnicas tornaram-se possíveis, tais como:

- comando de circuitos periféricos em função da luz natural;
- comando de reatores eletrônicos através de *dimmers*;
- rotinas de gerenciamento da equipe de limpeza;
- interface com o sistema telefônico para comando remoto dos circuitos de iluminação.

I.2.4 – CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos apresentam cerca de 51% do consumo de energia elétrica dentro do setor industrial, o que representa 22,95% de todo o consumo do País. Um valor que chama a atenção de qualquer programa de conservação de energia.

Assim sendo, diversos projetos para melhorar a eficiência energética de motores e reduzir o consumo de energia elétrica nestes equipamentos, podem ser conseguidos. Dentre os principais, cita-se:

1.2.4.1 – Redução de Perdas em Motores devido à Otimização do Material de Aço do Núcleo

Estudos realizados pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), demonstram que o tratamento térmico do aço carbono ou aço-silício, que compõem o núcleo do motor, pode reduzir as perdas no núcleo sem carga de motores que usam aço comum em até 40%, e nos de aço-silício na ordem de 14% (Furtado, 1996). Os motores padrão fabricados no Brasil contêm núcleos de aço carbono, embora alguns já venham usando aço com tratamento especial.

Com o intuito de se estimar a economia de energia resultante desse projeto foram utilizadas as seguintes premissas:

- Potência média do motor de maior peso em vendas: 10HP
- Perdas totais média de um motor típico: 15%
- Fator de carga médio dos motores: 70%

- Fração de perdas representadas por perdas no núcleo em motores com aço de carbono não tratados: 25%
- Redução média de perdas de núcleo devido ao tratamento térmico: 20%
- Fração de novos motores de indução que receberam tratamento térmico concomitante ao projeto (1993-1996): 30%
- Redução em perdas totais devido ao tratamento térmico: 0,75%
- Redução média de potência por motor que recebeu tratamento: 46W

1.2.4.2 – Redimensionamento de Motores Elétricos

Cerca de 24% dos motores utilizados pelas indústrias operam com cargas 50% abaixo de suas potências nominais (Tabosa, 1996).

Esse sobredimensionamento provoca a redução de eficiência efetiva do motor. Deste modo, um motor bem dimensionado proporcionará um consumo de energia devido à sua carga somente, não desperdiçando energia.

1.2.4.3 – Utilização de Inversores de Freqüência

Dentro da importância da conservação de energia, o incentivo ao uso de motores elétricos com velocidade variável e ao uso adequado de suas possibilidades de controle, vem sendo cada vez mais utilizadas. A instalação destes equipamentos em motores, pode ter um impacto substancial nos gastos com energia elétrica.

Antigamente esta técnica não era tão difundida, tendo em vista os altos custos dos inversores de freqüência. Mas, a evolução tecnológica fez e faz o seu papel, resultando numa rápida redução nos custos dos investimentos necessários a aplicação com inversores. Deste modo, mesmo as aplicações menos exigentes passaram a poder utilizar motores com velocidade variável.

Se uma carga acionada é variável, deve-se alimentar o motor de modo a obter sempre um rendimento ótimo. Neste caso, o controle da velocidade dos motores pode ser considerado.

O exemplo mais comum e evidente de ajuste de velocidade é o controle de fluxos de ventiladores, bombas centrífugas e compressores. O fluxo volumétrico (D) varia proporcionalmente com a velocidade da rotação da máquina. A potência necessária (P) aumenta com o cubo da velocidade de rotação, como indica a Figura 1.1. Com isto, pode-se

conseguir grande economia quando o processo permite uma redução de fluxo, desde que a velocidade possa ser ajustada simultaneamente.

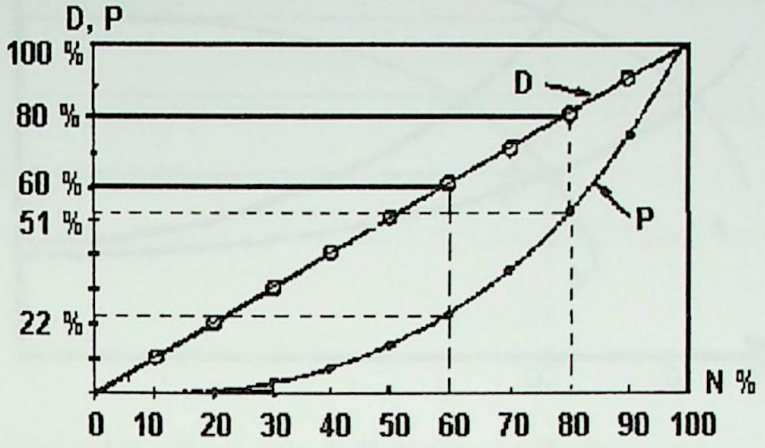


Figura 1.1 – Fluxo e potência em função da velocidade de rotação para turbomáquinas

A Figura 1.2 mostra como pode ser conseguida redução de potência e economia de energia nesses casos. As máquinas acima referidas são caracterizadas por uma curva quadrática fluxo-pressão - curva (a) da Figura 1.2 – para uma dada velocidade. Estas máquinas devem compensar a perda de carga dinâmica das tubulações e fornecer uma diferença de pressão estática Δp_s. A curva das perdas é também quadrática; o ponto de operação está na interseção das curvas (a) e (c), indicado com o algarismo 1 na Figura 1.2. A potência fornecida pela máquina é proporcional à área do retângulo Δp_1-1-D_1. Caso se queira reduzir o fluxo, pode-se fazer a curva de carga mais inclinada, por exemplo fechando-se a válvula; a curva (c) passa então a (d) e o novo ponto de operação torna-se o ponto 2 (potência proporcional ao retângulo Δp_2-2-D_2).

Entretanto, a mesma redução de fluxo pode ser obtida reduzindo-se a velocidade da máquina: a curva característica fluxo-pressão torna-se a curva (d), enquanto a curva de carga do circuito não varia. O ponto de operação move-se para 2'. A potência fornecida no caso de controle da velocidade é proporcional ao retângulo $\Delta p_{2'}$-2'-D_2 e representa apenas uma fração da potência exigida num caso convencional.

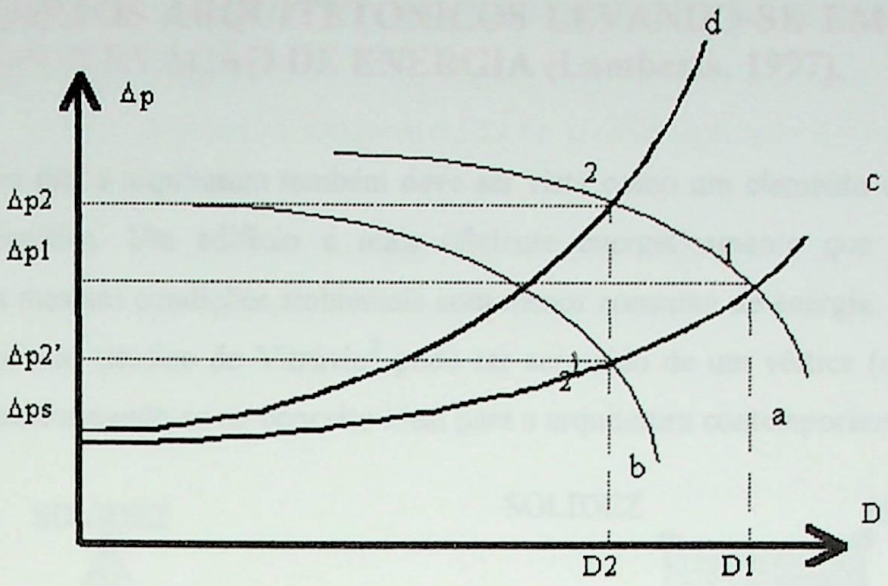


Figura 1.2 – Economia de Energia com Turbomáquinas.

A quantidade de energia economizada dependerá da natureza específica do processo. Se são gastos longos períodos operando com fluxo reduzido, a economia será substancial. Se o componente pressão dinâmica é grande em relação à pressão estática Δp_s, a economia será também considerável.

Deste modo, deve-se sempre realizar uma análise cuidadosa e precisa do processo no qual o motor está inserido, para se poder avaliar os benefícios ou não da inclusão de inversores de freqüência, objetivando a redução no consumo de energia elétrica.

Um dos grandes campos de atuação deste sistema de controle através de inversores está nos sistemas de abastecimento de água potável.

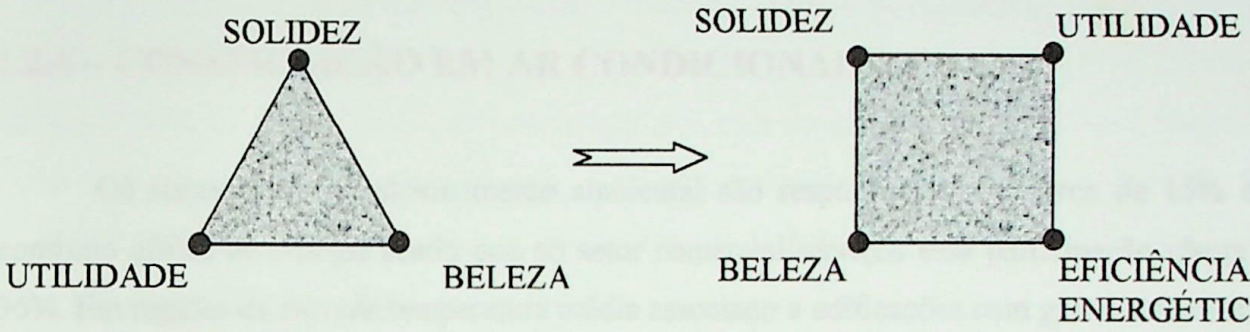
Nas empresas de saneamento os sistemas de abastecimento de água são os que apresentam maior oportunidade de economia de energia elétrica. A média das perdas de faturamento das operadoras brasileiras são da ordem de 45% do total de água faturada, valor extremamente elevado.

Como oportunidade de negócio, as empresas de saneamento obterão benefícios diretos e indiretos tais como:

- Uso mais eficiente de energia elétrica.
- Melhorias no abastecimento de água, e esgotamento sanitário.
- Aumento da vida útil dos equipamentos.
- Redução dos custos operacionais.
- Preservação do meio ambiente.
- Melhoria das condições de saúde da população.

1.2.5 – PROJETOS ARQUITETÔNICOS LEVANDO-SE EM CONTA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (Lamberts, 1997).

Hoje em dia, a arquitetura também deve ser vista como um elemento que precisa ter eficiência energética. Um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia. Desta forma o triângulo conceitual clássico do Vitrúvio[2] pode ser acrescido de um vértice (o da eficiência energética), transformando-se no conceito ideal para a arquitetura contemporânea.



O século XX tem sido particularmente fértil para a arquitetura e hoje, ao final do século, o panorama é jovem e pluralista. Estilos como o pós-modernismo, o *high-tech*, o construtivismo e o deconstrutivismo mostram experiências significativas da preocupação crescente dos arquitetos com a melhoria da qualidade das edificações, inclusive considerando aspectos de eficiência energética e de conforto ambiental.

Recentemente, após a crise de energia e a partir das discussões sobre o impacto ambiental provocado pelo homem, surge a necessidade de percorrer novas respostas arquitetônicas mais concordantes com as tecnologias disponíveis e com a idéia de preservação ambiental.

A arquitetura pode transformar o microclima externo; pode explorar suas características favoráveis ao mesmo tempo em que evita as desfavoráveis, tentando otimizar o conforto de seus usuários. Nesse sentido é importante fazer a integração entre as *variáveis climáticas* (como a radiação solar, o vento e a umidade do ar) e as *variáveis humanas* (conforto térmico e visual).

Se o arquiteto deseja que a luz natural contribua para a redução do consumo de energia, deve conhecer como os dispositivos arquitetônicos (janelas, clarabóias, domos, etc.) admitem luz. Somente assim será possível a integração entre os sistemas natural e artificial de iluminação.

---

[2] No período Clássico, Vitrúvio entendia a arquitetura como um espaço habitável que deveria equilibrar os aspectos estruturais, funcionais e formais. (Vitrúvio, 1982).

Da mesma forma, os sistemas de condicionamento térmico também incluem decisões a serem tomadas pelo arquiteto. Através da análise bioclimática do local, o profissional identifica as principais estratégias a serem adotadas no projeto arquitetônico com o intuito de estabelecer conforto térmico.

Desta forma, o objetivo principal de projetos arquitetônicos levando-se em consideração a conservação de energia é a minimização dos desperdícios com a mesma e a redução do impacto ambiental no planeta.

1.2.6 – CONSERVAÇÃO EM AR CONDICIONADO

Os sistemas de condicionamento ambiental são responsáveis por cerca de 15% do consumo global de energia sendo que no setor comercial/serviços essa participação chega a 35%. Em regiões de elevada temperatura média associado a edificações com grandes fachadas envidraçadas e alta carga térmica, o ar condicionado pode representar cerca de 50% do consumo total de um edifício.

Conforme pode ser visto na Tabela 1.5 a seguir, existe uma grande diversidade de tecnologias para condicionamento de ar, com diferentes graus de eficiência energética/térmica, diferentes patamares de investimento inicial e possibilidades de integração a sistemas de controle e gerenciamento inteligente, por exemplo de uma edificação.

Tabela 1.5 - Potência Média Consumida a Plena Carga

Sistema N°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Tipo de Sistema	Aparelho de Janela	*Split System*	*Self* a Ar	*Self* a Água	*Chiller* + *Fan Coil Baby*	*Chiller* + *Fan Coil* Central	Centrífuga + *Fan Coil* Central	Exp. Dir. Cond. Evap. + VAV	Cent. + Fan Coil Central + Tanque
Total (kW/TR)*	1,66	1,68	1,71	1,43	1,31	1,36	1,17	0,98	1,16
EER** (kWt/kWe)	2,12	2,1	2,06	2,46	2,69	2,59	3,01	3,60	3,03

FONTE: [CEB, 1995].

* kW/TR = kW elétrico por tonelada de refrigeração (1 TR = 12.000 BTU/h)

** EER= kW térmico / kW elétrico (potência térmica transferida por unidade de potência elétrica). Eficiência Energética de Refrigeração.

As economias derivadas da substituição ou *retrofitting* de sistemas de ar condicionado estão vinculadas ao tipo e características operacionais do sistema existente e em funcionamento no edifício e do sistema proposto para a substituição ou otimização.

Como pode ser visto na tabela anterior, a eficiência energética de um sistema que utiliza menos que 1 kW para produzir uma tonelada de refrigeração (TR) é muito superior aos sistemas que utilizam 1,6 ou 1,7 kW para produzir a mesma quantidade de TR. Adiciona-se ainda, a capacidade de integração a sistemas de automação e controle predial, existente nos sistemas mais avançados de condicionamento de ar.

Em prédios comerciais modernos percebe-se uma nítida tendência na adoção de soluções inteligentes e eficientes para o condicionamento ambiental, seja com *chillers* microprocessados de alta eficiência energética, seja com termoacumulação ou com sistemas de automação. O objetivo, em resumo, é a redução de custos operacionais e a elevação da qualidade no atendimento aos usuários, compensando tranqüilamente o investimento inicial superior ao exigido para soluções mais simples.

1.2.7 - CONSERVAÇÃO EM SISTEMAS PREDIAIS

1.2.7.1 – Sistemas de Automação

Os sistemas de automação, quando instalados e em operação nos edifícios, podem proporcionar uma série de benefícios aos seus usuários e operadores, destacando-se a redução dos custos operacionais, o aumento do conforto ambiental e da segurança patrimonial. Esses sistemas de controle automatizam uma série de atividades, normalmente realizadas manualmente, reduzindo assim a probabilidade de uma gestão inadequada ou insuficiente sobre os sistemas consumidores de energia. Além disso, o controle microprocessado permite uma gestão do uso de energia mais complexa, com a definição de estratégias definidas pelos usuários e operadores, o que resulta em um maior conforto ambiental associado a uma maior economia de energia e outros custos operacionais.

O avanço tecnológico, em todas as áreas da engenharia, tem sido muito rápido e vem proporcionando ao mercado novas e interessantes soluções às demandas funcionais das edificações.

Paralelamente, observa-se uma tendência uniforme de aumento nos custos operacionais das edificações, especialmente em relação à mão de obra qualificada, energia, água e demais insumos.

Observa-se, também, um crescente nível de exigência do mercado em relação aos aspectos de conforto ambiental (temperatura, ruído e iluminação), segurança e funcionalidade. Esses, sem dúvida, configuram-se como elementos básicos para proporcionar ambientes de elevada produtividade do trabalho.

1.2.7.2 - Sistemas de Controle de Utilidades

Os sistemas de controle de utilidades de uma edificação requerem energia e recursos humanos para funcionarem. O controle inteligente e integrado destes sistemas viabiliza a implementação de estratégias de gerenciamento otimizadas, e consequentemente a redução de custos operacionais.

Os sistemas mais comuns nas edificações são os seguintes:

- sistema de ar condicionado e ventilação mecânica
- sistema de suprimento de energia
- sistema de iluminação
- sistemas de água potável e águas servidas
- sistema de segurança e detecção de incêndio

1.2.7.3 - Controle do Sistema de Ar Condicionado e Ventilação

Um sistema de ar condicionado de grande porte, que utiliza água gelada como meio de transporte de energia, pode ser dividido em duas partes numa classificação simples: uma primeira parte, responsável pela produção, armazenamento e distribuição da água gelada, e a segunda, responsável pelo condicionamento e a distribuição do ar tratado.

O primeiro sistema é o responsável por grande parte do consumo elétrico de um edifício, sendo encontradas grandes oportunidades para otimizar o uso da energia com a implementação de controle sofisticado. Isto porque os processos de produção e bombeamento de água gelada, e armazenamento de energia (água gelada) podem ser otimizados com técnicas tais como o seqüenciamento dos *chillers*, controle do bombeamento de água no circuito secundário, reajuste da temperatura da água de condensação, e o seqüenciamento das torres, entre outras técnicas.

O segundo sistema é responsável pelo condicionamento e distribuição do ar, sendo que o controle digital direto também desempenha papel importante ao garantir a precisão e a repetibilidade das malhas de controle e alguns outros automatismos que economizam energia e facilitam a operação centralizada (reduzindo pessoal), dentre os quais cita-se:

- partida/parada ótima dos condicionadores;
- supervisão de fluxo de ar nos condicionadores;
- supervisão do quadro elétrico dos *fan-coils*;
- supervisão do estado dos filtros de ar;
- ajuste remoto e automático do *set-point* de temperatura.

1.2.7.4 - Controle do Suprimento de Energia

O sistema de gerenciamento integrado controla circuitos de acionamentos de disjuntores, supervisiona o estado de disjuntores e dispositivos de proteção e monitora a temperatura dos transformadores, assim como o consumo de energia, a tensão, a corrente, a freqüência e o fator de potência da instalação.

Estas informações alimentam rotinas automáticas que controlam a demanda dentro dos limites contratados com a concessionária, informa situações anormais, intertravam ações e enviam o histórico de tudo para arquivos ou relatórios, para posterior análise gerencial.

Hoje, o mercado disponibiliza dispositivos avançados de monitoração, proteção e controle em circuitos elétricos. Geralmente apresentados na forma de famílias de produtos, com diferentes modelos ou módulos para cobrir toda a gama de aplicações geralmente requeridas nos painéis elétricos, estes dispositivos substituem os tradicionais relés de proteção, os transdutores e outros itens que eram geralmente utilizados para supervisão e controle de subestações. São equipamentos que podem ser interligados via uma rede de comunicações própria, e que podem se comunicar com o sistema de gerenciamento integrado do edifício. Desta forma, o sistema de suprimento de energia da edificação passa a ser monitorado e controlado pelo operador do prédio, e rotinas automáticas podem ser criadas intertravando ações de diferentes sistemas, obtendo-se a melhor alternativa para o uso eficiente de energia.

1.2.8 - ANÁLISE DA CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

A análise dos parâmetros do consumo de energia é indispensável para uma tomada de decisão quanto ao uso eficiente desta. A conta de energia é uma síntese dos parâmetros de consumo, refletindo a forma como a mesma é utilizada. Uma análise histórica, com no mínimo 12 meses, apresenta um quadro rico de informações e toma-se a base de comparação para futuras mudanças, visando mensurar potenciais de economia. Nesse sentido, o estudo das contas de energia torna-se uma ferramenta importante para a execução de um gerenciamento energético em instalações.

Dentro deste escopo, deve-se fazer uma análise do perfil de uso da energia, contemplando os seguintes itens:

Consumo Específico de Energia: A análise do consumo de energia (kWh) ou da carga instalada (kW) do edifício em relação ao produto gerado, serviço prestado ou à área ocupada produz indicadores de desempenho passíveis de comparação à padrões estabelecidos no país e exterior, Em relação à área ocupada, o índice W/m^2 é determinado e comparado com as edificações tipológica e funcionalmente semelhantes mas com diferentes níveis de eficiência. Pode-se, dessa forma, projetar para os edifícios, padrões muito mais eficientes de consumo de energia elétrica, considerando-se a utilização de produtos e processos de melhor desempenho energético, especialmente nos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar.

O *retrofitting* em tais sistemas pode reduzir drasticamente o padrão médio atual de consumo de energia, tanto no horário da ponta como fora da ponta, podendo economizar cerca de 25% a 50%, em média da energia consumida, e atingindo um novo patamar de consumo específico para a edificação.

Análise do Fator de Carga: O custo médio de energia elétrica depende grandemente da forma como ela é utilizada. Se está sendo usada eficientemente, seu custo médio é menor e, ao contrario, se o uso não é eficiente. O fator de carga que é deduzido pelos dados das contas de energia, é um dos indicadores de eficiência, pois, mostra como a energia está sendo utilizada ao longo do tempo.

Quanto maior for o fator de carga, menor será o custo do kWh. Supondo-se a possibilidade de manter, ao longo do ano, o fator de carga na faixa do mais alto já obtido, no período analisado, projeta-seuma economia média em cima da fatura mensal de energia.

Para obter um fator de carga mais elevado existem três formas básicas:

a) aumentar o número de horas trabalhadas (ou seja, aumentando-se o consumo de kWh), porém conservando-se a demanda de potência;

b) otimizar a demanda de potência, conservando-se o mesmo nível de consumo de kWh;

c) atuar simultaneamente nos dois parâmetros acima citados.

Com a possibilidade de reduções na carga total instalada, a partir do aumento de eficiência dos sistemas consumidores instalados, deve-se também considerar a otimização da demanda de potência em função de níveis mais baixos de consumo de kWh.

Otimização da Demanda de Potência: A análise da demanda tem por objetivo a sua adequação às reais necessidades da unidade consumidora.

São analisadas as demandas de potência contratada, registradas (ou medidas) e as efetivamente faturadas.

A premissa básica adotada na metodologia é a de se procurar reduzir ou mesmo eliminar as ociosidades e ultrapassagens de demanda. Assim, a unidade consumidora estará trabalhando adequadamente quando os valores de demanda de potência registrados, contratados e faturados tiverem o mesmo valor, ou, pelo menos, apresentarem valores próximos, pois assim estará pagando por aquilo que realmente necessita.

A análise da demanda do edifício demonstra a situação presente e possível de otimização.

Deve-se, nesse ponto, considerar a possibilidade de reduções nas demandas contratadas em função de alterações nos principais sistemas consumidores, isto é, iluminação e ar condicionado, com a redução das cargas instaladas e a introdução de controles automatizados para a modulação ótima da carga.

Análise de Opção Tarifária: A otimização tarifária é a escolha da tarifa mais conveniente para a unidade consumidora, considerando-se o seu regime de funcionamento, as características do seu processo de trabalho, bem como a oportunidade/ possibilidade de se fazer modulação de carga. A simulação realizada com os dados obtidos nas contas de energia elétrica confirma ou não a tarifa utilizada como a mais conveniente, ou seja, com os fatores de carga vigentes e a legislação tarifária em vigor, aponta a tarifa que proporciona o menor custo médio.

Correção do Fator de Potência: Alguns aparelhos elétricos, como os motores e transformadores, além de consumirem energia ativa, solicitam também energia reativa necessária para criar o fluxo magnético que seu funcionamento exige.

Com base na relação entre a energia reativa e ativa, determina-se o Fator de Potência Indutivo Médio num determinado período. Mais à frente será discutida, através da Nova Definição de Potência, o correto cálculo do fator de potência, levando-se em conta as potências ativa e aparente.

Pode-se citar como principais causas do baixo fator de potência, o seguinte:

Motores Operando em Vazio: Os motores consomem praticamente a mesma quantidade de energia reativa, necessária à manutenção do campo magnético, quando operam à vazio ou à plena carga. Entretanto, isso não acontece com a energia ativa, que é diretamente proporcional à carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Assim, quanto maior a carga maior será a energia ativa consumida e quanto menor a carga mecânica, menor a energia ativa consumida e consequentemente menor será o fator de potência. Deste modo, os motores devem estar o mais corretamente dimensionados para se evitar tal desperdício de energia.

Motores Sobredimensionados: Este caso é idêntico ao anterior.

Transformadores Operando em Vazio ou com Pequenas Cargas: Assim como os motores, os transformadores quando estão sobredimensionados, consomem uma certa quantidade de energia reativa relativamente grande quando comparada com a energia ativa, provocando um baixo fator de potência.

Nível de Tensão Acima da Nominal: A potência Reativa (kVAr) é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da tensão aplicada, enquanto que a potência ativa praticamente só depende da carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Assim, quanto maior a tensão aplicada, além da nominal aos motores de indução, maior será a quantidade de energia reativa consumida e menor será o Fator de Potência.

Lâmpadas de Descarga: As lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescentes, etc.) para funcionarem necessitam do auxílio de um reator. Os reatores, como os motores e os transformadores, possuem bobinas ou enrolamentos que consomem energia reativa, contribuindo para a redução do Fator de Potência das Instalações.

Quando o fator de potência apresenta valor baixo, a legislação de energia elétrica prevê a cobrança do ajuste devido ao baixo fator de potência para aquelas unidades consumidoras que apresentam este fator inferior a 0,92.

A análise das contas de energia elétrica aponta um fator de potência médio, na ponta e fora de ponta, que comparado aos 0,92, aponta ou não para a necessidade da implantação de medidas corretivas, tais como:

- instalação de banco de capacitores estáticos ou automáticos;
- através de motores síncronos;
- aumento do consumo de energia ativa;

1.2.9 - CONSERVAÇÃO ATRAVÉS DO DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS (Procobre, 1998).

A idéia básica do dimensionamento de condutores levando-se em conta a perda de potência por dissipação, sugere que durante a vida útil do mesmo, seja levado em conta o custo associado às perdas.

Deste modo, para um dimensionamento que proporcione um menor custo total associado, deve-se levar em consideração o custo inicial do condutor, que está relacionado com a sua seção nominal, assim como também o custo operacional do mesmo, relacionado com as perdas.

A Figura 1.3 apresenta as curvas típicas de perdas de energia e custo inicial de uma instalação em função da seção dos condutores.

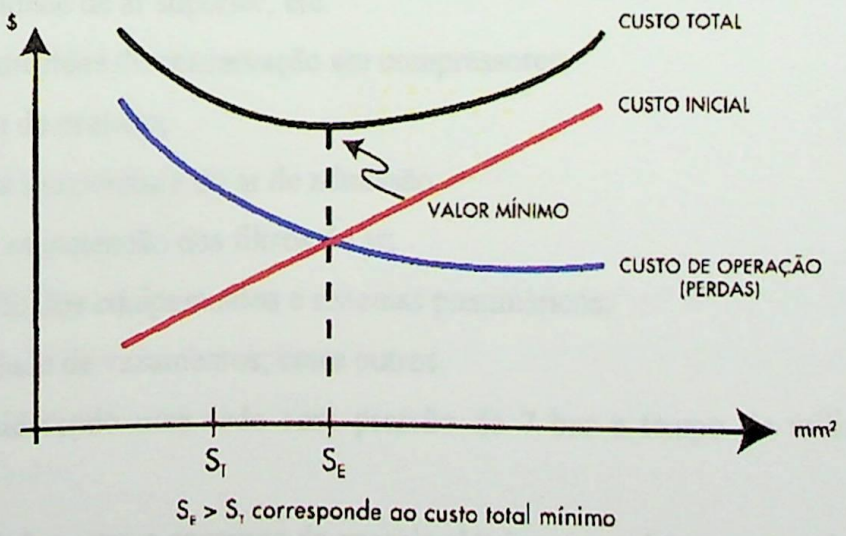


Figura 1.3 – Custo inicial e operacional em função da seção nominal dos condutores.

Como pode ser observado na figura anterior, a curva relativa ao custo total do cabo apresenta um ponto de valor mínimo ($) para uma dada seção ($mm^2$). Desta forma, chama-se de **Seção Econômica (SE)** de um dado circuito aquela que corresponde ao menor custo total de instalação e operação de um cabo.

Deste modo, um cabo dimensionado segundo os critérios da seção econômica apresentará além da redução nos custos operacionais, ao longo de sua vida útil, uma redução no consumo de energia, tendo em vista que as perdas associadas serão menores.

Com o dimensionamento econômico, além de não comprometer a segurança, a qualidade e a durabilidade da instalação elétrica, ele também diz que o reembolso inicial extra que deve ser realizado para a compra de um cabo com seção maior, retorna ao longo de sua vida útil, através da economia gerada pelo custo de operação que estão associados com as perdas, pois com uma seção maior, apresentam-se menores.

1.2.10 - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM OUTROS EQUIPAMENTOS E SISTEMAS

1.2.10.1 - Ar Comprimido:

Existem várias maneiras de se economizar energia em sistemas de ar comprimido. Bastam algumas regulagens simples, como por exemplo, baixar a pressão até o mínimo necessário ao funcionamento do equipamento, ou um pouco mais de cuidado na manutenção com a limitação e conserto de vazamentos, ou ainda tomar medidas mais dispendiosas como a substituição dos compressores ineficientes por novos que ofereçam melhor rendimento energético, qualidade de ar superior, etc.

Algumas medidas de conservação em compressores:

- Regulagem de pressão;
- Controle da temperatura do ar de admissão;
- Limpeza e manutenção dos filtros de ar;
- Lubrificação dos equipamentos e sistemas pneumáticos;
- Estanqueidade de vazamentos; entre outros.

Exemplo: Considerando uma rede com pressão de 7 bar e tempo de utilização de 6.000 horas/ano.

A Tabela 1.6 mostra o consumo de energia elétrica necessário para suprir vazamentos.

Tabela 1.6 - Relação entre consumo de energia e vazamento de ar.

Consumo de Energia Elétrica para suprir vazamentos.				
Vazamentos		Perda (litros/min.)	Potência necessária para comprimir o ar perdido (kW)	Consumo Anual (kWh)
Diâmetro (mm)	Superfície (mm^2)			
0,8	0,5	12	0,1	600
1,5	1,8	186	1,0	6.000
3,0	7,0	660	3,5	21.000
6,0	28,0	2.570	15,0	90.000

FONTE: [PROCEL, 1996].

1.2.10.2 - Aquecimento de Água e Isolamento Térmico:

A utilização de energia para aquecimento de água, tem muitas vezes, uma participação significativa no consumo total de energia de uma empresa.

Dentre os equipamentos utilizados para esse fim estão os aquecedores centrais de acumulação. Para economizar energia nesses equipamentos deve-se considerar basicamente três aspectos:

1) Melhoria do isolamento térmico e da tubulação de água quente;
2) Adequação dos níveis de temperatura utilizados;
3) Desligamento nos horários desnecessários.

Para a melhoria nos isolamentos térmicos, deve-se observar: o material isolante, a sua qualidade, a localização da tubulação de envio da água quente, o revestimento do tanque armazenador desta água, etc.

Um desperdício muito comum e de fácil reparo é devido à falta de isolamento em válvulas e outros componentes existentes ao longo do comprimento da tubulação, tal como medidores de pressão, entre outros.

1.2.10.3 - Sistemas Frigoríficos e Ar Condicionado:

Na planta industrial, muitas vezes é necessário o controle da temperatura ideal para o processo. Neste sentido um sistema de refrigeração adequado torna-se fundamental. Para a geração deste frio existem vários métodos e equipamentos, a citar:

- Compressor;
- *Chillers*;
- Sistemas termoacumuladores, etc.

O compressor pode ser de pressão de vapor, onde a compressão e expansão de um fluido refrigerante dissipa calor e "rouba" calor (respectivamente) com os líquidos nele em contato. Deste modo e com um fluido refrigerante que satisfaça as necessidades de resfriamento do processo, consegue-se o controle da temperatura do mesmo. O ganho associado de energia elétrica está em se manter sempre limpos os dutos por onde é feita a troca de calor entre o fluido refrigerante e o líquido que recebe o calor tirado do processo.

O *Chiller*, nada mais é do que um conjunto completo de refrigeração com compressor, tanque para o fluido refrigerante, bombas auxiliares, painel elétrico próprio, etc.

O sistema termoacumulador pode ser reduzido basicamente a: uma bomba responsável pela circulação do fluido pelo processo; um compressor com capacidade inferior àquela que o processo necessita; toda tubulação necessária e um tanque de acumulação. Assim, durante o período em que o processo não necessita de frio, o sistema termoacumulador continua em funcionamento acumulando este frio em um tanque. Este tanque armazena uma quantidade de energia fria, tal que, quando o processo solicitar, o tanque irá atender a demanda, não precisando para isso que o sistema padrão fosse projetado para a demanda máxima de frio que o processo solicita.

Estas e outras observações podem ser feias a respeito dos sistemas frigoríficos com objetivo de reduzir o gasto com energia elétrica ou utilizá-la racionalmente.

1.2.11 - ANÁLISE DO INVESTIMENTO PELO CICLO DE VIDA[3]

A análise do custo do ciclo de vida é utilizada como uma ferramenta de decisão e escolha entre alternativas de investimento, baseado nos desempenhos econômicos de longo prazo e não nos custos iniciais.

Essa técnica considera em sua análise, para um determinado período (normalmente o tempo de vida útil dos equipamentos ou sistemas), os custos iniciais, as substituições de capitais, os custos de operação, manutenção e reparo, e os custos com insumos energéticos. A análise considera a taxa de desconto e gera resultados em valor presente.

---

[3] Para maiores detalhes, ver: Fuller, S. K.; Petersen, S. R., "Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program", U. S. Department of Energy, Washington, February, 1996.

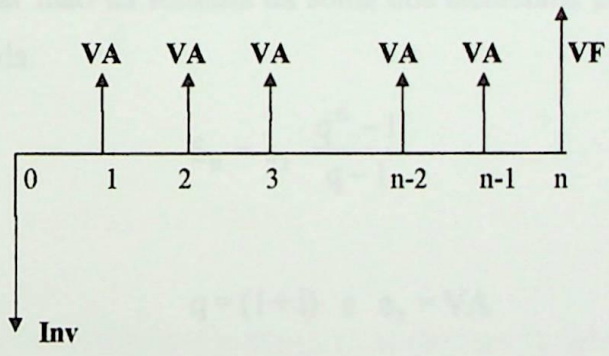
Os resultados obtidos com essa técnica, a partir de uma comparação entre algumas alternativas possíveis de otimização energética normalmente apontam a alternativa de menor custo do ciclo de vida como a mais adequada. Entretanto, as decisões também se apoiam em fatores qualitativos, não mensuráveis, que certamente devem ser considerados e podem modificar os resultados finais.

Como forma de auxiliar o processo de decisão, a técnica do custo do ciclo de vida apresenta, para cada análise comparativa, valores da economia líquida, da relação economia/investimentos e da taxa interna de retorno ajustada (considera a taxa de desconto).

1.3 - ANÁLISE ECONÔMICA EM CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (COENE, 1996)

1.3.1 - Fluxos de Caixa

O fluxo de caixa é uma maneira simplificada de se representar graficamente as despesas e benefícios ao longo do tempo. Sendo assim, a Figura 1.4 mostra um fluxo de caixa onde foi feito um investimento **Inv** no instante zero (seta para baixo) que resultará em um retorno anual **VA** (seta para cima) durante **n** anos. Note que, convencionalmente, consideram-se os gastos e investimentos como grandezas negativas e benefícios e reembolsos como grandezas positivas.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

Figura 1.4 - Exemplo de fluxo de caixa

Neste ponto é importante introduzir o conceito de taxa de juros **i**. Em geral, esta taxa é anual e representa o valor do dinheiro. Ou seja, desprezada qualquer inflação, mais vale receber mil reais hoje do que daqui a um ano. Através da taxa de juros pode-se relacionar o valor presente **VP** com o valor futuro **VF**, para **n** anos a uma taxa de juros **i**, da seguinte forma:

$$VF = VP \cdot (1+i)^n \tag{1.1}$$

Nestas análises, vale observar que o período de tempo não é, necessariamente, anual, bastando no entanto, tomar a taxa de juros relacionada ao intervalo de tempo em questão.

Para o caso de se ter várias anuidades, o cálculo deve ser cumulativo. Seja por exemplo o seguinte fluxo de caixa:

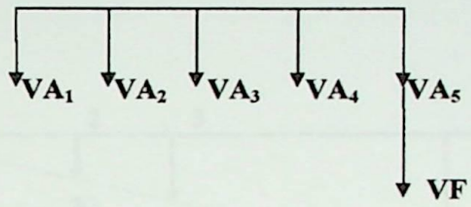


Figura 1.5 - Fluxo de caixa

O valor futuro será dado pela soma das contribuições de cada anuidade corrigida pela taxa de juros, da seguinte forma:

$$VF = VA_5 + VA_4 \cdot (1+i) + VA_3 \cdot (1+i)^2 + VA_2 \cdot (1+i)^3 + VA_1 \cdot (1+i)^4 \tag{1.2}$$

Se as anuidades e os intervalos de tempo forem iguais, caracterizando a chamada **série uniforme**, pode-se lançar mão da fórmula da soma dos elementos de uma p.g. para se obter uma equação generalizada.

Soma da p.g.: $$S_n = a_1 \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1} \tag{1.3}$$

Neste caso tem-se: $$q = (1+i) \quad \text{e} \quad a_1 = VA \tag{1.4}$$

No que resulta:

$$\frac{VF}{VA} = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \tag{1.5}$$

Importantes relações entre **VA** e **VP** podem ser obtidas combinando-se (1.1) e (1.5). Logo, tem-se:

- Fator de recuperação de capital (FRC):

$$FRC(i,n) = \frac{VA}{VP} = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{1.6}$$

- Fator de valor presente (FVP):

$$FVP(i,n) = \frac{VP}{VA} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \tag{1.7}$$

Em muitos casos, a série que se apresenta pode ser não uniforme. Um exemplo típico é a chamada série gradiente:

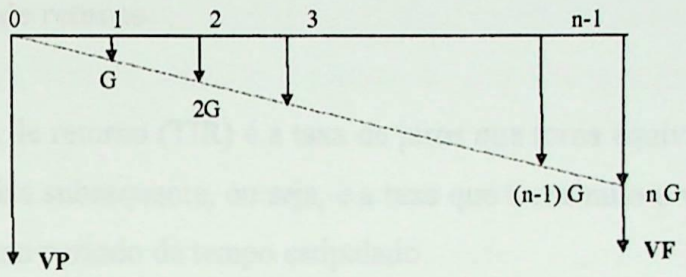


Figura 1.6 - Série Gradiente

Nestes casos, tem-se

$$\frac{VF}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2} \tag{1.8}$$

$$\frac{VP}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2 \cdot (1+i)^n} \tag{1.9}$$

1.3.2 - Taxa mínima de atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade é a expectativa mínima de lucratividade, em termos de taxa de juros, que se espera em um investimento. Na prática esta pode ser definida através de dois enfoques, quais sejam:

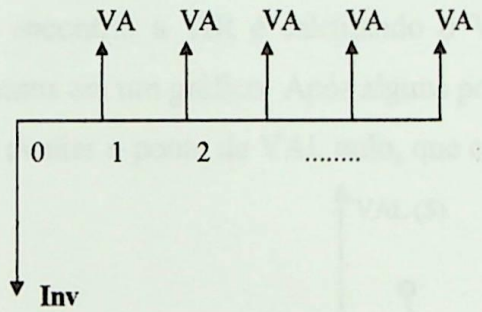
- É a taxa de juros equivalente à maior rentabilidade das aplicações correntes de pouco risco;
- Custo do capital mais o risco do investimento.

No primeiro caso, quando um investidor possui um capital e deseja aplicá-lo, evidentemente ele não vai aplicar em um projeto que possua uma taxa de rentabilidade menor do que uma outra aplicação já existente no mercado, já que esta última apresenta pouco risco ou, em outras palavras, ele só irá aplicar o seu capital em um projeto com taxa de retorno se

esta for maior que em aplicações garantidas comumente encontradas no mercado. Já o segundo caso poderá ser esclarecido supondo-se que o capital a ser investido seja obtido junto ao mercado a um custo de uma determinada taxa de juros, considerando que o projeto possua um determinado nível de risco, a taxa mínima de atratividade não deverá ser menor que o custo do capital adicionado ao risco do investimento. Deve-se notar que o risco pode atuar tanto negativamente como positivamente sobre o projeto e, sendo assim, deve-se considerar a pior alternativa.

1.3.3 - Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, é a taxa que torna nulo o valor presente líquido do projeto dentro de um período de tempo estipulado.



$$VA \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - Inv = 0 \qquad (1.10)$$

Figura 1.7 - Taxa interna de retorno

1.3.4 - Critérios Econômicos de Decisão

Os critérios de tomada de decisão baseados em análise econômica podem se basear em termos do valor presente, do valor anual uniforme e também da taxa interna de retorno. Naturalmente, as diversas técnicas apresentam certas vantagens quando comparadas entre si. É o caso, por exemplo, do método do custo anual com relação ao método do valor presente líquido, já que os valores alcançados com os custos anuais são números menores e de melhor compreensão, além do mais importante, que é a possibilidade de análise entre dois investimentos com vidas úteis diferentes.

Neste ponto é interessante observar a influência da taxa de juros na tomada de decisão. Maiores taxas de juros desestimulam altos investimentos, isto é, desincentiva a produção favorecendo a especulação financeira. Para as vidas úteis, no entanto, uma vida útil maior irá favorecer o investimento que exigir menores custos de operação e manutenção.

Sendo assim, fica evidenciada a importância de uma análise de sensibilidade. Esta deve fazer variar alguns parâmetros importantes, dentro de faixas relativamente estreitas, par se verificar como se comporta o valor presente ou anual. Isto contribuirá sobremaneira na tomada de decisão.

A análise econômica está fundamentada nos custos e benefícios dos investimentos. Detectá-los e equacioná-los é, sem dúvida, a principal tarefa do avalista, pois, a partir daí, pode-se manipular convenientemente, as equações da engenharia econômica, resultando na escolha da melhor opção.

Quando se analisa um projeto por si mesmo, com seus custos e benefícios, é bastante comum calcular-se a sua taxa interna de retorno, **TIR**. Esta é a taxa de juros que zera o valor líquido presente, ou anual, do empreendimento. Para o caso presente, a maneira mais fácil de se encontrar a TIR é calculando o VAL para crescentes taxas de juros, e marcando estes pontos em um gráfico. Após alguns pontos a curva VAL x i já é suficientemente definida para se avaliar o ponto de VAL nulo, que corresponde à TIR. A Figura 1.8 ilustra o exposto.

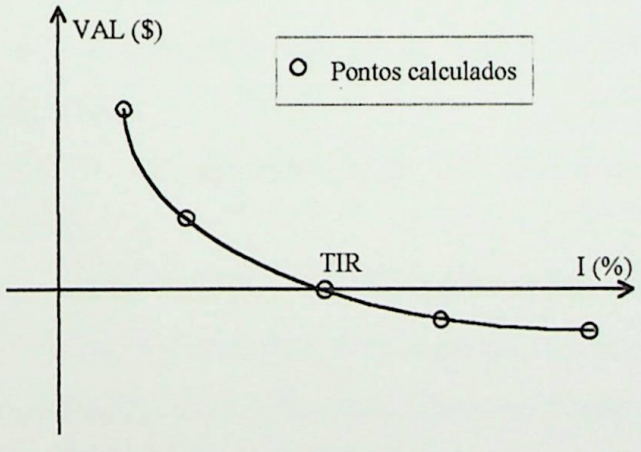


Figura 1.8 - Processo gráfico para o cálculo da TIR

Quando a TIR for superior à taxa de juros, considerada para o empreendimento, tem-se que este é atrativo, e vice-versa. A análise comparativa entre dois empreendimentos através da TIR não é recomendável. Basicamente a justificativa desta afirmação se baseia no princípio de se maximizar o lucro, sendo que este pode ser o VAL, que é a diferença entre o benefício total atual e custo total atual. Entretanto, pode-se ter um empreendimento cujo VAL é bem inferior, entretanto a relação entre o benefício total atual e o custo total atual é bem mais elevada, resultando maior TIR.

Em termos práticos, por exemplo, no primeiro caso se exige maior investimento mas resulta num lucro maior, enquanto o investimento é menor no segundo caso, resultando menor lucro, mas para cada unidade monetária investida tem-se um retorno maior. Uma análise que embute o conceito da TIR, tendo as mesmas limitações, é a de custo-benefício. Esta é, como explicita o nome, a relação entre o custo total atual, ou anual, pelo benefício total atual, ou anual. É bastante comum, em empreendimentos energéticos, utilizar-se índices, para comparação entre investimentos ou simples acompanhamento, que são na verdade a relação custo-benefício.

CAPÍTULO 2

A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2 - INTRODUÇÃO

Este capítulo introduz os conceitos principais relacionados com os distúrbios da qualidade da energia elétrica. Através deles torna-se possível a verificação de que algumas medidas de conservação, comentadas no capítulo anterior, interferem na qualidade da energia elétrica. Interferência esta que pode causar perdas e ocupação do sistema elétrico, que não estão sendo incluídas nas análises de viabilidade das medidas de conservação.

Os harmônicos são mais discutidos, tendo em vista que todas as medidas de conservação estudadas apresentam como característica este distúrbio. Suas fontes, causas, efeitos e normalização são abordados.

Para fazer parte da metodologia de análise da Relação de Compromisso entre a qualidade da energia e a conservação, um estudo sobre as perdas em condutores e transformadores foi desenvolvido.

Algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios relacionados com a qualidade são mostradas.

Desta forma, são também definidos aspectos relacionados com a Nova Definição de Potência e com a Nova Proposta Tarifária para Ambientes distorcidos.

Com todo esta base teórica, torna-se possível relacionar a conservação de energia e a qualidade da mesma, que será feita no próximo capítulo.

2.1 A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

No passado, a questão da qualidade da energia elétrica não era importante, por dois motivos principais: o primeiro deles porque a maioria dos usuários não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, já que seus processos e equipamentos não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade. O segundo deles está relacionado com as empresas brasileiras de eletricidade, pois a quase meio século, operaram dentro de um regime de monopólio de tarifas com base no custo do serviço. Significando que todo aumento ou redução de custos não implicava em aumento ou redução dos lucros respectivamente.

Atualmente, a questão da qualidade da energia elétrica surge como um fator muito mais relevante e de necessidade aos vários envolvidos no sistema elétrico. A deterioração da qualidade pode provocar ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a comunidade.

A revista *Busines Week*[1], informava que a "poluição" elétrica estava custando cerca de US$ 26 bilhões por ano em danos e atitudes preventivas, só nos Estados Unidos. E a "poluição" está aumentando, calculando-se que para este fim de milênio, 60% da energia elétrica esteja circulando por cargas não-lineares. E que a maioria destas cargas serão do tipo eletrônica.

Diante de um mercado globalizado crescentemente competitivo, o assunto da qualidade tem se tornado de fundamental importância no cenário econômico nacional, uma vez que os modernos processos industriais produtivos podem sofrer interrupções mais ou menos longas devido às variações momentâneas da tensão, implicando em significativas perdas econômicas. E também porque a sensibilidade dos equipamentos aos distúrbios originários do sistema elétrico tem aumentado.

Por outro lado a desregulamentação do setor elétrico incorpora uma mudança na atuação das empresas brasileiras de eletricidade, que reduzindo seus custos podem aumentar seus lucros, sem que a tarifa seja modificada.

---

[1] de 8 de Abril de 1991.

Ao lado das medidas propostas de conservação de energia, os serviços de melhoria da qualidade da energia elétrica também podem ser feitos pelas concessionárias e/ou pelo PROCEL. Esta nova oportunidade de negócio, para as concessionárias, poderão ampliar os seus serviços e aumentar a sua competitividade[2] neste mercado desregulamentado.

Deste modo, este capítulo pretende, numa primeira etapa, abordar a questão da qualidade da energia elétrica, definindo e identificando os seus principais distúrbios e suas causas.

Numa segunda etapa, definir de uma forma mais aprofundada a questão dos harmônicos, o que são, como surgem, qual a sua formulação, os seus efeitos, entre outros, que serão utilizados no decorrer de outros capítulos.

Numa última etapa, mostrar a nova definição de potência, levando-se em consideração aspectos relacionados com a qualidade da energia elétrica. E ainda dentro desta etapa, mostrar uma nova proposta tarifária, que inclui aspectos de qualidade da energia, em ambientes distorcidos.

Toda esta teoria anterior torna-se necessária para que se possa compreender melhor os próximos capítulos, que irão relacionar a conservação de energia com a qualidade da energia elétrica.

2.2 DEFINIÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Qualidade da energia elétrica pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da 7concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este último pelo lado do cliente), medidos no *ponto de entrega de energia*[3]. Se, entretanto, olharmos o problema sob o ponto de vista 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"*. (BRONZEADO, 1997).

---

[2] Ver Lonie, Bruce; "Utility Deregulation and Its Opportunities", PowerCET Corporation, Santa Clara. California

[3] Trata-se da fronteira entre as instalações da concessionária e as do consumidor.

2.3 DISTÚRBIOS RELACIONADOS COM A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e freqüência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros pode ser considerado como uma perda de QEE. Em outras palavras, existe um problema de QEE, sempre que ocorre um desvio na forma de onda da tensão de alimentação. Portanto, a qualidade de energia elétrica, na maioria dos casos, poderia ser representada pela qualidade da tensão elétrica do ponto onde a carga está ligada.

Por outro lado, a natureza das cargas conectadas à rede de distribuição cujas correntes solicitadas são também senoidais, são ditas lineares e apresentam formas de onda de corrente e tensão, conforme Figura 2.1. Para outras cargas , chamadas de não lineares (ou especiais), as correntes são distorcidas (Figura 2.2).

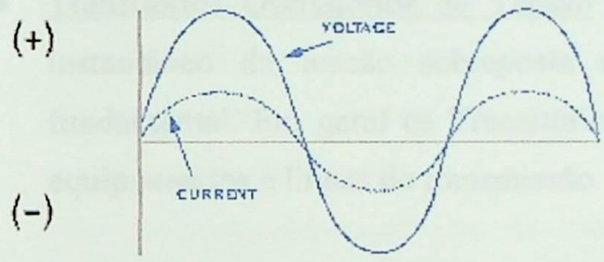


Figura 2.1 - Forma de onda de um sinal elétrico de uma carga linear.

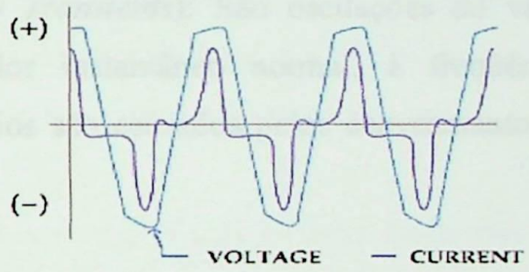


Figura 2.2 - Forma de onda de tensão e corrente solicitada por uma carga não linear.

Assim, a qualidade da energia pode ser caracterizada por um conjunto de parâmetros, relacionados com a qualidade da fonte de tensão e corrente.

Os sistemas elétricos de potência e os equipamentos são desenvolvidos ou projetados, assumindo-se que estes parâmetros das fontes de tensão e corrente estão dentro de certas faixas. Qualquer desvio maior do que os níveis previstos podem causar efeitos negativos sobre os equipamentos e para o sistema como um todo.

A qualidade das fontes de tensão e corrente pode ser definida através de quatro parâmetros principais:

1. Freqüência;
2. Forma de onda;
3. Amplitude da tensão;
4. Assimetria em sistemas trifásicos.

Os principais fenômenos eletromagnéticos associados à QEE conforme (BRONZEADO, 1997) e (IEEE Standard 1159, 1995) podem ser agrupados em:

a) **Variações Instantâneas de Tensão** (*Transient Voltages*): São variações súbitas do valor instantâneo da tensão. Em geral, dependem do montante de energia armazenada nos elementos do sistema no instante inicial da ocorrência e do comportamento transitório do sistema para atingir o seu novo ponto de operação. Neste grupo estão incluídos os Surtos de Tensão; Transitórios Oscilatórios da Tensão e os Cortes na Tensão

- Surtos de Tensão (*Impulsive Transients*): Usualmente causados por descargas atmosféricas, são caracterizados pelo tempo de subida (Tempo de Crista), tempo de caída (Tempo de Cauda) e pelo valor de pico da tensão. Em geral, os Surtos de Tensão têm polaridade unidirecional.

- Transitórios Oscilatórios de Tensão (*Oscilatory Transients*): São oscilações do valor instantâneo da tensão sobreposta ao seu valor instantâneo normal, à freqüência fundamental. Em geral os Transitórios Oscilatórios são causados pelos chaveamento de equipamentos e linhas de transmissão.

- Cortes na Tensão (*Notching*): São descontinuidades do valor instantâneo da tensão causadas geralmente pelos curtos-circuitos fase-fase durante a comutação da corrente entre as fases do sistema sob operação normal dos conversores de potência. Normalmente são seguidos de transitórios oscilatórios e, por serem periódicos, têm sido também analisados como distorção harmônica (Figura 2.3).

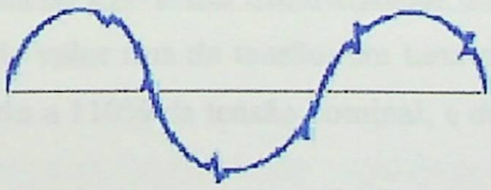


Figura 2.3 - Efeito *Notch*.

A Tabela 2.1 mostra algumas características relacionadas com a variação instantânea da tensão:

Tabela 2.1 – Características das Variações Instantâneas de Tensão.

Variações Instantâneas da Tensão	Conteúdo Espectral	Duração	Amplitude da Tensão
Surtos de Tensão	Nanosegundo	5 ns	
	Microsegundo	1 μs	
	Milisegundo	0.1 ms	
Transitórios Oscilatórios de Tensão	Freqüência Baixa	< 5 kHz	0 a 4 pu
	Freqüência Média	5 até 500 kHz	0 a 8 pu
	Freqüência Alta	0.5 até 5 MHz	0 a 4 pu

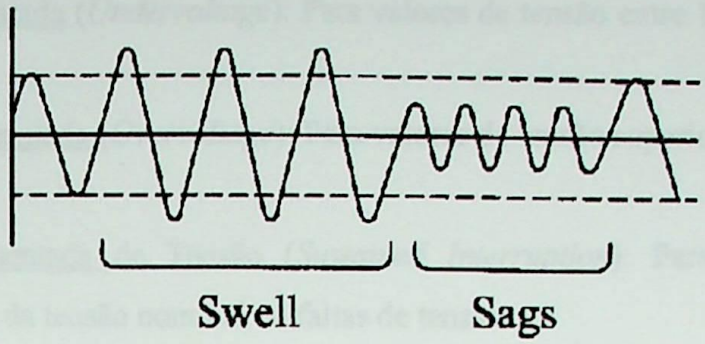
Fonte: Mielczarski, 1998.

b) **Variações Momentâneas de Tensão** (*Short Duration Voltage Variations*): São variações momentâneas no valor eficaz (rms) da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta, porém menor do que 1 (um) minuto. Geralmente são causadas por curtos-circuitos no sistema elétrico e chaveamentos de equipamentos que demandam altas correntes de energização.

As Variações Momentâneas de Tensão podem ser classificadas como Subtensões e Sobretensões Momentâneas, e Interrupções Momentâneas de Tensão:

- Subtensões Momentâneas ou Depressão Momentânea de Tensão. (*Voltage Sags*): São reduções momentâneas do valor rms da tensão em uma ou mais fases do sistema elétrico, para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal, e duração entre 1/2 ciclo e 1 (um) minuto (Figura 2.4).

- Sobretensões Momentâneas ou Elevações Momentâneas de Tensão (*Voltage Swells*): São elevações momentâneas do valor rms da tensão, em uma ou mais fases do sistema, para valores de tensão superiores a 110% da tensão nominal, e duração entre 1/2 ciclo e 1 (um) minuto (Figura 2.4).



Figuras 2.4 - Sobretensão e Depressão Momentâneas, respectivamente.

- Interrupções Momentâneas de Tensão (*Short Duration Interruptions*): São reduções do valor rms da tensão, em uma ou mais fases do sistema, para valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal e duração entre 1/2 ciclo a 1 (um) minuto. Em termos de duração as Variações Momentâneas de Tensão podem ser dividida em:

- De Curtíssima Duração (*Instantaneous*): Duração entre 1/2 ciclo e 30 ciclos.
- De Curta Duração (*Momentary*): Duração entre 30 ciclos e 3 segundos (Figura 2.5).
- Temporária (*Temporary*): Duração entre 3 segundos e 1 minuto (Figura 2.6).

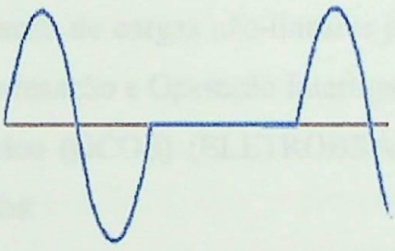


Figura 2.5 - *Momentary Interruption*

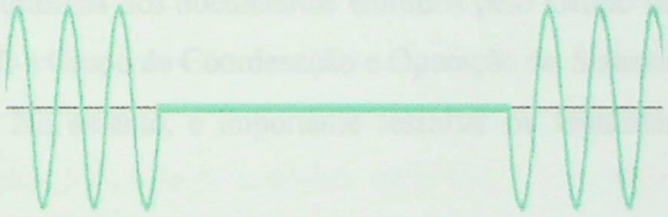


Figura 2.6 - *Temporary Interruption*

c) **Variações Sustentadas de Tensão** (*Long Duration Voltage Variation*): São variações de valor rms da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta, porém maior que ou igual a 1 (um) minuto. Em geral, são causadas pela entrada e saída de grandes blocos de carga, linhas de transmissão e equipamentos de compensação de potência reativa (banco de capacitores e reatores).

A comunidade internacional tende a não considerar as Variações Sustentadas de Tensão como sendo um problema de "*Power Quality*" (ABRACE, 1985).

As Variações Sustentadas de tensão podem ser classificadas como Subtensão e Sobretensão Sustentada, e Interrupção Sustentada de Tensão:

- Subtensão Sustentada (*Undervoltage*): Para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal.
- Sobretensão Sustentada (*Overvoltage*): Para valores de tensão superiores a 110% da tensão nominal.
- Interrupção Sustentada de Tensão (*Sustained Interruption*): Para valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal ou faltas de tensão.

d) **Variações Momentâneas de Freqüência** *(Power Frequency Variations)*:

São pequenos desvios momentâneos do valor da freqüência fundamental da tensão decorrentes do desequilíbrio entre a geração da energia elétrica e a demanda solicitada pela carga. A sua duração e magnitude dependem essencialmente da dimensão do desequilíbrio ocorrido, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações de potência.

e) **Distorção Harmônica Total, Flutuação de Tensão, Cintilação e Desequilíbrio de Tensão**:

Estes termos, os quais se referem aos distúrbios "quase-permanentes, causados pela operação de cargas não-lineares já foram definidos nos documentos emitidos pelo Grupo de Coordenação e Operação Interligada (GCOI) e Grupo de Coordenação e Operação do Sistema Elétrico (GCOS) (ELETROBRÁS, 1986). No entanto, é importante ressaltar os seguintes pontos:

- Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion*): Este termo tem sido usado tanto para os sinais de tensão como de corrente, para quantificar o nível de distorção da forma de onda com relação a forma de onda ideal (senoidal), à freqüência fundamental (Figura 2.7).

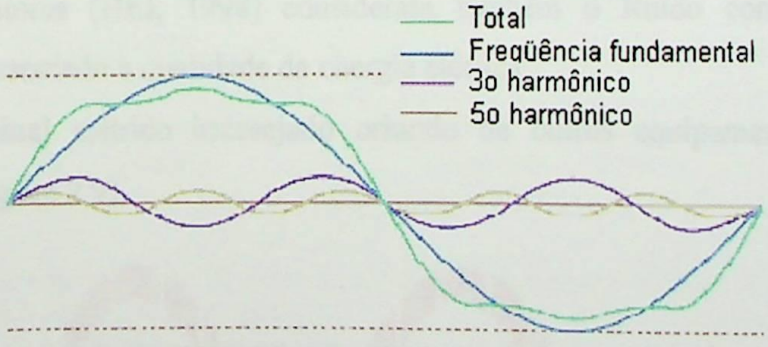


Figura 2.7 - Forma de onda Harmônica

- Flutuação de Tensão (*Voltage Fluctuation*): É uma série de Variações de Tensão sistemáticas e intermitentes dentro de uma faixa entre 95% e 105% da tensão nominal. Este termo tem sido usado de forma incorreta para se referir às Variações de Tensão e Cintilação (Figura 2.8).

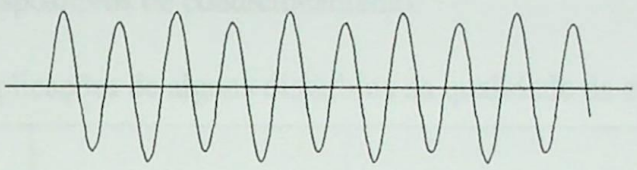


Figura 2.8 - Flutuação de Tensão.

- Cintilação (*Flicker*): É a impressão visual resultante da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas submetidas às Flutuações de Tensão do sistema elétrico. Este efeito também pode ser notado em ambientes iluminados artificialmente que têm ventiladores de teto, embora isto não seja um problema relacionado com a QEE.

- Desequilíbrio de Tensão (*Voltage Imbalance*): É a razão entre a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva da tensão do sistema (trifásico). É prática, embora incorreta, se medir o desequilíbrio de tensão através da medição das magnitudes das tensões de fase, sem levar em consideração os ângulos de fase entre elas. Um sistema com tensões de magnitude iguais, porém com defasagens diferentes de 120° podem causar grandes desequilíbrios. O IEEE considera também a relação entre a componente de seqüência zero e a positiva para medir o desequilíbrio de tensão (IEEE Standard 1159-1995).

Alguns autores (HEI, 1998) consideram também o Ruído como um fenômeno eletromagnético associado à qualidade da energia elétrica.

- Ruído: Um sinal elétrico indesejado oriundo de outros equipamentos. É um sinal esporádico (Figura 2.9).

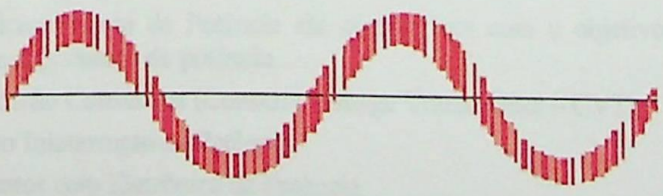


Figura 2.9 - Ruído de um sinal elétrico.

2.4 CAUSAS DE ALGUNS DISTÚRBIOS RELACIONADOS COM A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

A Tabela 2.2 relaciona alguns distúrbios da qualidade da energia com suas causas e conseqüências, assim como também apresenta algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios através dos dispositivos de condicionamento.

Tabela 2.2 - Implicações de alguns distúrbios da qualidade da energia elétrica

Distúrbios	Causas	Conseqüências	Dispositivos de condicionamento (1)
Transitórios Impulsivos	Descargas Atmosféricas Manobra de Carga	Distúrbios em Dispositivos Eletrônicos	Pára-Raios Filtros Trafo de Isolamento
Transitórios Oscilatórios	Descargas Atmosféricas Manobras de linhas, cabo, capacitor, trafo, carga.	Distúrbios em Dispositivos Eletrônicos	Pára-Raios Filtros Trafo de Isolamento
Variações de Curta Duração	Faltas Remotas Manobra de Carga	Distúrbios em Processos Industriais	Trafo de Tensão Constante (2)
Variações de Longa Duração	Partida de Motor Variação de Carga Manobra de Capacitor Sobrecargas	Distúrbios em Processos Industriais	Regulador de Tensão Trafo de Tensão Constante
Interrupções	Faltas Manobra de Disjuntores	Distúrbios em Processos Industriais	Sistema UPS[4] (3) Geradores de Reserva
Desequilíbrio de Tensão	Cargas Desequilibradas		
Harmônicas	Cargas Não Lineares	Sobreaquecimento, Distúrbios em contadores	Filtros Trafo de Isolamento
Notching	PE's com Comutação de Corrente entre fases		
Ruído	Manobra de PE's (4) Arcos Radiação Eletromagnética	Distúrbios em Computadores e Controladores Programáveis	Aterramento Bobina de Bloqueio, Filtro Blindagem
Flutuação de Tensão	Cargas Intermitentes Cargas a Arco Partida de Motor	*Flicker* (Cintilação)	Componentes Estáticos Capacitor Série
Variação da Freqüência	Variação de Carga e Geração	Afeta operação de Máquinas Girantes e Contadores	

Notas:

(1) Dispositivos de Condicionamento de Potência são dispositivos com o objetivo de isolar a barra de carga de vicissitudes da barra de suprimento de potência.

(2) Transformadores de Tensão Constantes (Constant Voltage Transformer – CVT)

(3) Sistemas de Suprimento Ininterrupto de Potência

(4) Manobra de Equipamentos com Eletrônica de Potência

FONTE: Brasil (1997).

Pesquisas realizadas nos EUA, patrocinadas pelo Electrotechnical Power Research Institute (EPRI), identificaram três distúrbios da QEE que mais tem afetado os consumidores: as *Variações Instantâneas de Tensão (Transitórios), as Depressões de Tensão (Voltage Sags)* e os *Harmônicos*. Estes distúrbios podem causar problemas, como os listados a seguir:

DEPRESSÃO DE TENSÃO[5]

Principais problemas:

- Operação inadequada de equipamentos industriais como os Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), responsáveis pelo controle de processos industriais; de relês, responsáveis pela proteção do sistema elétrico; microprocessadores, componente usado em dispositivos de controle;
- Variação da velocidade ou parada de motores;
- Falhas em inversores de freqüência, usados para o controle de velocidade de motores;
- Perda de memória de equipamentos eletrônicos domésticos como vídeos, microondas e relógios digitais, entre outros.

TRANSITÓRIOS

Os transitórios, via de regra, provocam a degradação ou falha imediata nos isolamentos de equipamentos elétricos, falhas em fontes eletrônicas e desligamentos indevidos em acionamentos de velocidade variável usados em motores.

HARMÔNICOS

Este distúrbio tem maior significado dentro desta dissertação, devido ao fato de que os principais equipamentos adotados em medidas de conservação de energia são responsáveis pela geração dos mesmos. Deste modo, uma maior atenção será dada para os harmônicos.

---

[4] Uninterrupty Power System

[5] Abreu, 1997-1 mostra os resultados de uma análise do impacto das Depressões de Tensão sobre alguns equipamentos eletrônicos, podendo-se resumir os principais resultados no Anexo B – Tabela B1.

2.5 HARMÔNICOS

A geração de energia elétrica se dá através da freqüência fundamental de 60 Hz, de formas de onda perfeitamente senoidais. Harmônicos é o nome dado para uma distorção na forma de onda do sinal elétrico que não possui somente a freqüência fundamental em sua composição, mas também, sinais cujas freqüências são múltiplas da fundamental.

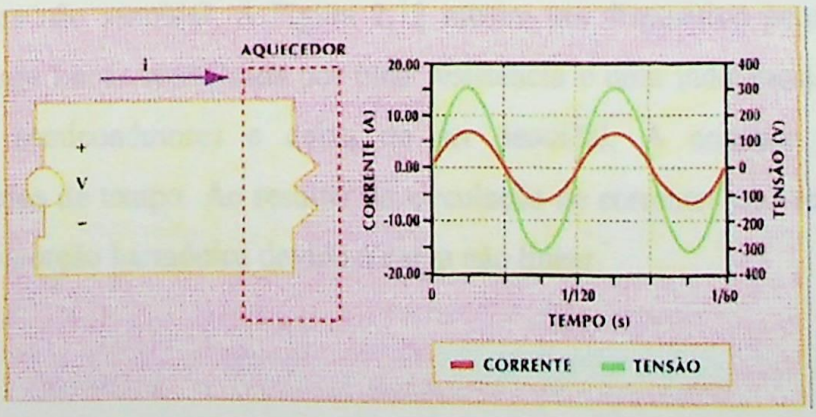
A explicação deste aparecimento de harmônicos no sistema elétrico está diretamente ligado ao crescimento e uso disseminado das chamadas cargas não lineares. Estas últimas, por sua vez, não apresentam proporcionalidade entre a tensão aplicada com a respectiva corrente.

Os harmônicos são conhecidos no sistema elétrico há uns 40 anos. Mas até antes dos equipamentos com base na eletrônica de potência surgirem (conversores estáticos), os elementos não lineares em circuitos elétricos eram relativamente pequenos, fazendo com que a sua influência no sistema fosse insignificante. Atualmente, com o crescimento cada vez maior e mais rápido de cargas com princípio de funcionamento baseado na eletrônica de potência, ditas não lineares, a questão dos harmônicos preocupa pela sua influência no sistema como um todo.

2.5.1 – CARGAS LINEARES

As Cargas Lineares seguem a Lei de Ohm. Onde a sua corrente é proporcional à tensão aplicada, dividida pela sua impedância. Assim, caso a forma de onda da tensão seja senoidal, a da corrente também será.

As Figuras 2.10 e 2.11 mostram uma relação entre a tensão e a corrente para dois tipos de cargas lineares.



Figuras 2.10 – Consumo de um aquecedor de 1kW.

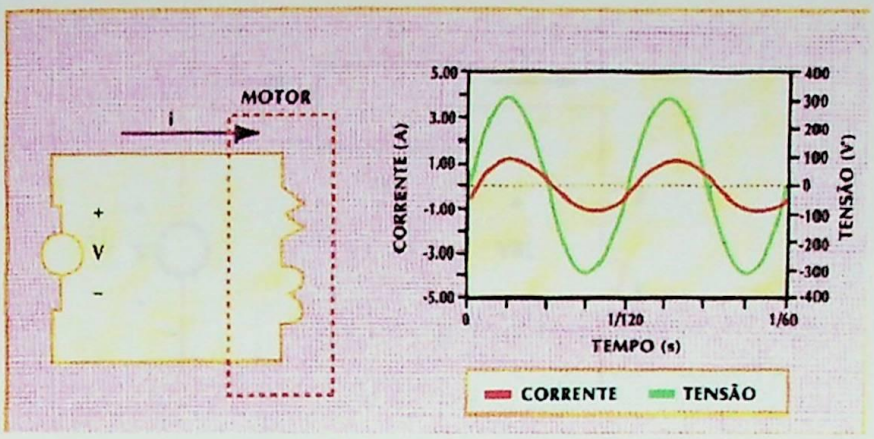


Figura 2.11 - Consumo de um motor trifásico de 1/6 cv

2.5.2 – CARGAS NÃO LINEARES

A eletrônica de potência disponibilizou para vários setores, como escritórios, indústrias, residências, etc., diversos equipamentos capazes de controlar o produto final: iluminação variável, velocidade ajustável de motores, etc.. Desse modo, aproximadamente 50% da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes de ser realmente utilizada. Essa eletrônica faz uso de diodos, tiristores, transistores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção. Isto significa que funcionam essencialmente em dois estados: **Condução e Bloqueio.** O primeiro corresponde ao período em que o dispositivo permite a passagem de corrente. O segundo estado tem operação inversa ao primeiro, bloqueando a passagem da corrente. Deste modo, a tensão na carga é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal. Podendo o usuário, variar o instante de condução e consequentemente a tensão e a corrente no circuito.

Assim sendo, a forma de onda da corrente em um circuito com cargas não lineares, apresenta-se de forma não senoidal. A Figura 2.12 mostra um dispositivo para controlar a corrente em uma carga linear constituída por uma resistência e uma indutância. A tensão é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal. A corrente é nula em determinados intervalos de tempo. Ao resultar na circulação de correntes não senoidais pelo circuito, fala-se da distorção harmônica devido à carga não linear.

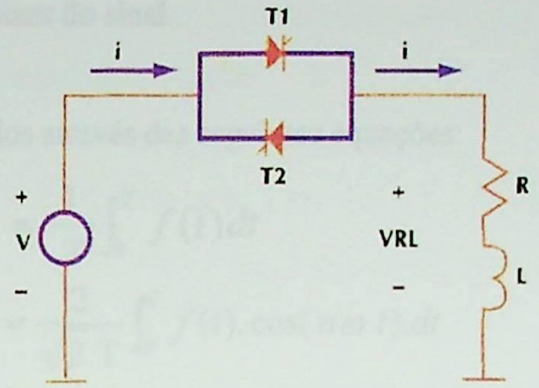


Figura 2.12 – Dispositivo Semicondutor de Controle da corrente e da tensão – Carga Não Linear.

2.5.3 – ANÁLISE MATEMÁTICA DOS HARMÔNICOS

Os sinais tanto de tensão, quanto de corrente, podem ser decompostos em componentes harmônicos.

Para tanto, utiliza-se a Série de Fourier de uma função periódica, no domínio da freqüência, dada pela equação 2.1:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)\right) \qquad (2.1)$$

onde,

$x(t)$ = função periódica a ser decomposta em série de Fourier;

a_0 = componente contínua ou valor médio do sinal;

a_n e b_n = amplitude de pico das componentes de freqüência nω.

T = período da forma de onda do sinal na freqüência fundamental.

Na eletrotécnica, costuma-se utilizar valores eficazes ao invés de valores de pico. Desse modo, a equação 2.2, fica:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_n\sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + B_n\sqrt{2} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)\right) \qquad (2.2)$$

sendo An e Bn valores eficazes do sinal.

Estes coeficientes são obtidos através das seguintes equações:

$$A_0 = \frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^T f(t)dt \tag{2.3}$$

$$A_n = \frac{2}{\sqrt{2}\,\mathrm{T}}\int_0^T f(t).\cos(n\omega\, t).dt \tag{2.4}$$

$$B_n = \frac{2}{\sqrt{2}\,\mathrm{T}}\int_0^T f(t).\mathrm{sen}(n\omega\, t).dt \tag{2.5}$$

Várias outras formas podem ser adotadas, equivalentes à equação 2.2, tais como:

Forma Complexa:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(C_n\sqrt{2}\; e^{\,j(n\omega\, t+\phi n)}\right) \tag{2.6}$$

sendo

$$C_n = \sqrt{A_n{}^2 + B_n{}^2} \tag{2.7}$$

$$\phi_n = -\arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \tag{2.8}$$

Forma Cossenoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(C_n\sqrt{2}\cos(n\omega\, t + \phi n)\right) \tag{2.9}$$

Forma Senoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(C_n\sqrt{2}\,\mathrm{sen}(n\omega\, t + \varphi n)\right) \tag{2.10}$$

$$\text{onde}\quad \varphi n = \arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \tag{2.11}$$

Deste modo, um sinal de tensão e corrente, poderão ser representados pela forma cossenoidal, resultando nas seguintes equações:

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t + \phi_{v1}) + V_2 \cos(2\omega t + \phi_{v2}) + V_3 \cos(3\omega t + \phi_{v3}) + \\ + V_4 \cos(4\omega t + \phi_{v4}) + V_5 \cos(5\omega t + \phi_{v5}) + ... + V_n \cos(n\omega t + \phi_{vn}) \quad (2.12)$$

$$I(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega t + \phi_{i1}) + I_2 \cos(2\omega t + \phi_{i2}) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_{i3}) + \\ + I_4 \cos(4\omega t + \phi_{i4}) + I_5 \cos(5\omega t + \phi_{i5}) + ... + I_n \cos(n\omega t + \phi_{in}) \quad (2.13)$$

onde

V_0 e I_0 são as componentes contínuas dos sinais de tensão e corrente respectivamente.

$V_1, V_2, V_3, V_4, \ldots, V_n$ são as respectivas amplitudes das tensões harmônicas.

$I_1, I_2, I_3, I_4, \ldots, I_n$ são as respectivas amplitudes das correntes harmônicas.

$\phi_{v1}, \phi_{v2}, \phi_{v3}, \phi_{v4}, \ldots, \phi_{vn}$, são as fases dos respectivos harmônicos de tensão.

$\phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}, \phi_{i4}, \ldots, \phi_{in}$, são as fases dos respectivos harmônicos de corrente.

"n" é a ordem de cada harmônico.

Cada harmônico tem a sua fase e seu módulo. Em geral, os harmônicos de ordem par são nulos, devido a que os dispositivos atuam de forma simétrica e periódica. Os harmônicos de ordem elevada são pequenos, fundamentalmente porque as variações são suavizadas pela presença de indutâncias no sistema. A presença de harmônicos pares é sintoma de que o controle dos semicondutores está desajustado e a existência de harmônicos elevados pode ser indício de variações bruscas de tensão ou corrente.

A distorção harmônica pode ser quantificada de várias formas. Uma das mais comuns é a Distorção Harmônica Total – THD (Total Harmonic Distortion) (IEEE 519–1992). Ela representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal. É definida como sendo uma percentagem da freqüência fundamental e é calculada através da equação (2.14) a seguir.

$$THD = \sqrt{\frac{\textit{Somatório}\ \text{de Todos os Quadrados das Amplitudes de Todos os Harmônicos do Sinal}}{\text{Quadrado da Amplitude da Frequência Fundamental do Sinal}}} \bullet 100\%$$

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}{C_1^2}} \cdot 100\ \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \cdot 100\ \% \qquad (2.14)$$

onde

C_1 e C_n são as amplitudes dos harmônicos de freqüências fundamental e de ordem "n", respectivamente, baseados na forma Cossenoidal.

Deste modo, basta substituir os valores de C_n por valores de amplitudes de tensão ou corrente para se determinar a Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v) ou a Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i), respectivamente. Obtendo-se as seguintes equações mais especificamente:

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI Biblioteca

Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v):

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\ \% \qquad (2.15)$$

Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i):

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\ \% \qquad (2.16)$$

O valor total da corrente em um circuito contendo uma carga linear é dado pela equação (2.17), onde I_2, ..., I_N são as correntes harmônicas e I_1 é a corrente fundamental.

$$I_{TOTAL}(rms) = \sqrt{I_1^2(rms) + I_2^2(rms) + I_3^2(rms) + ... + I_h^2(rms)} \qquad (2.17)$$

Assim, define-se a Distorção Total Harmônica de corrente - THD_I, conforme [IEEE-519], como sendo:

$$THD_I(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^{\,2}(rms) + I_3^{\,2}(rms) + ... + I_h^{\,2}(rms)}}{I_1\,(rms)} \tag{2.18}$$

ou conforme [IEC-1000],

$$THD_I(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^{\,2}(rms) + I_3^{\,2}(rms) + ... + I_h^{\,2}(rms)}}{I_{TOTAL}(rms)} \tag{2.19}$$

A Figura 2.13 mostra um exemplo de um sinal contendo as freqüências fundamental, de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

É mostrado também o espectro de freqüências existentes no sinal. Neste espectro, pode-se verificar a ordem dos harmônicos existentes no sinal de tensão com as suas respectivas amplitudes.

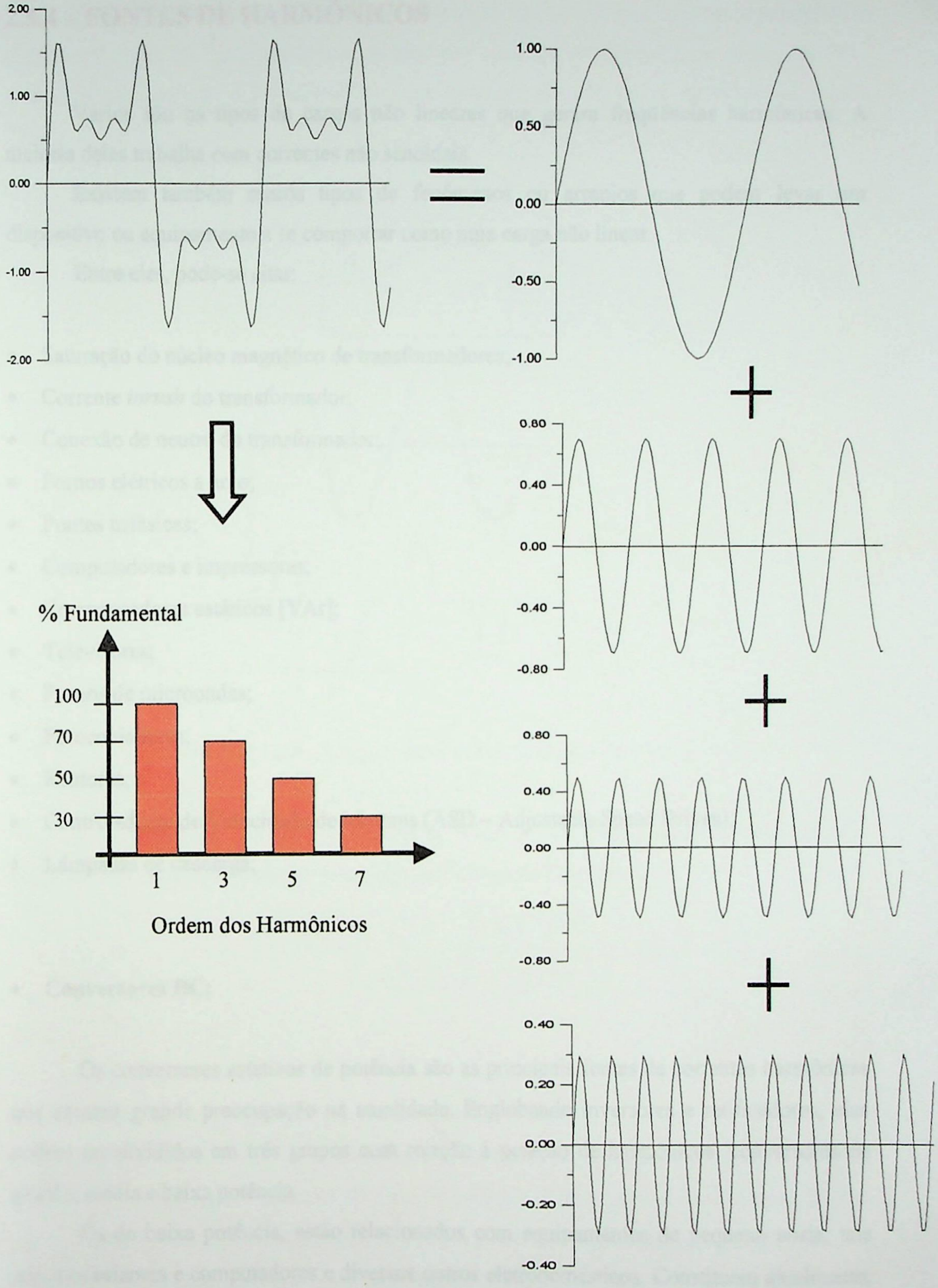


Figura 2.13 – Sinal de tensão com harmônicos ímpares.

2.5.4 – FONTES DE HARMÔNICOS

Vários são os tipos de cargas não lineares que geram freqüências harmônicas. A maioria delas trabalha com correntes não senoidais.

Existem também outros tipos de fenômenos ou arranjos que podem levar um dispositivo ou equipamento a se comportar como uma carga não linear.

Entre eles, pode-se citar:

- Saturação do núcleo magnético de transformadores;
- Corrente *inrush* do transformador;
- Conexão de neutro do transformador;
- Fornos elétricos a arco;
- Pontes trifásicas;
- Computadores e impressoras;
- Compensadores estáticos [VAr];
- Televisores;
- Fornos de microondas;
- Fotocopiadoras;
- Reatores;
- Controladores de Velocidade de Motores (ASD – Adjustable Speed Drives);
- Lâmpadas de descarga;

- **Conversores DC;**

Os conversores estáticos de potência são as principais fontes de correntes harmônicas que causam grande preocupação na atualidade. Englobando inversores e retificadores, eles podem ser divididos em três grupos com relação à geração de harmônicos: conversores de grande, média e baixa potência.

Os de baixa potência, estão relacionados com equipamentos de pequeno porte, tais como televisores e computadores e diversos outros eletrodomésticos. Constituem atualmente, devido a sua utilização disseminada, uma grande preocupação para o sistema elétrico. Ocasionando muitos problemas para o mesmo (Rocha, A. C.; et. Alii, 1997).

Tanto os televisores, como os computadores e vários outros equipamentos eletrodomésticos, são geralmente alimentados por circuitos retificadores de onda completa, com uma capacitância de alisamento de valor bastante elevado, como mostrado na Figura 2.14.

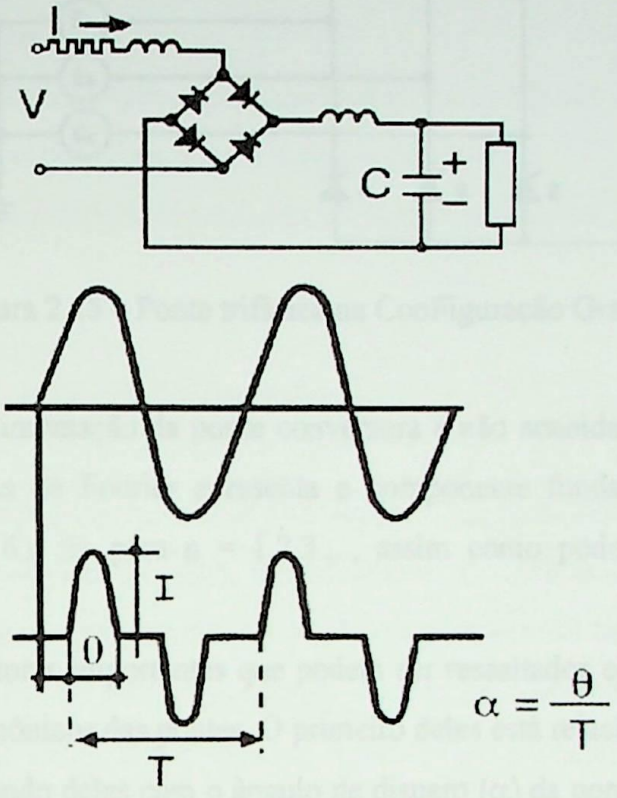


Figura 2.14 – Circuito Retificador de Onda Completa

Aplicando-se a análise de Fourier à onda de corrente produzida pelo circuito retificador da Figura 2.14, obtêm-se as seguintes correntes harmônicas:

$$I_{(t)} = \frac{8\alpha I}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{\cos(n\alpha\pi)}{1-(n\alpha\pi)^2} \cos(n\omega t) \qquad (2.20)$$

onde

I é o valor de pico da corrente;

$\alpha = \theta/T$ é a duração com relação ao período da tensão da fonte.

Pode-se dizer, devido à sua vasta aplicabilidade industrial, que a fonte mais comum de problemas harmônicos em sistemas elétricos de potência, é certamente a Ponte Conversora na configuração Graetz. Ela é largamente utilizada em sistemas Controladores de Velocidade de motores ASD's, em sistemas de Transmissão High Very Direct Current (HVDC) e equipamentos como *No-Breaks*, entre outros. Deste modo, uma maior atenção para a mesma será dada neste tópico.

Um exemplo de uma ponte conversora trifásica na configuração Graetz está mostrada na Figura 2.15.

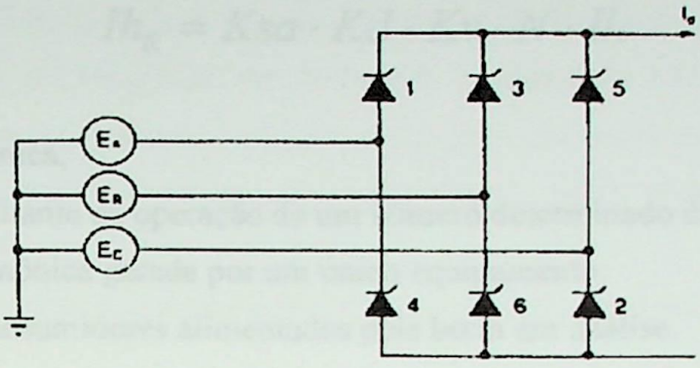


Figura 2.15 – Ponte trifásica na ConFiguração Graetz.

A corrente de alimentação da ponte conversora é não senoidal e quando decomposta em série trigonométrica de Fourier apresenta a componente fundamental e componentes harmônicas de ordem 6.n ±1 para n = 1,2,3...., assim como pode ser representado pela equação (2.20).

Existem dois fatores importantes que podem ser ressaltados com relação ao efeito de redução dos níveis harmônicos das pontes. O primeiro deles está relacionado com o ângulo de comutação (μ) e o segundo deles com o ângulo de disparo (α) da ponte. Quanto maior forem estes ângulos, maior será a atenuação da componente harmônica com relação à componente fundamental com ângulo de comutação zero graus (Rezek, A.J.J., 1995).

Por serem cargas de pequena potência, muitas vezes o nível de distorção harmônica causada pela mesma não afeta o sistema. Mas, o efeito, devido ao elevado número destes equipamentos existentes na rede elétrica, pode tornar-se significativo.

A contribuição harmônica de equipamentos de pequenas potências pode ter efeitos maiores ou menores sobre o sistema elétrico, quando levados em consideração alguns aspectos, tais como (De Vré, 1994):

- Fator de Saturação (Ksa): Relação entre o número de consumidores que possuem o equipamento e o número total de consumidores ligados ao sistema;
- Fator de Simultaneidade (Kv): Relação entre o número de consumidores cujos aparelhos estão em funcionamento em determinado horário e o número de consumidores que possuem tal aparelho;
- Fator de Dispersão (Kd): Relação entre a soma vetorial e a soma algébrica das correntes harmônicas de determinada ordem, geradas pelos equipamentos existentes.

Deste modo, a corrente harmônica injetada em uma determinada barra do sistema pode ser obtida através da equação (2.21):

$$Ih_R = Ksa \cdot Kd \cdot Kv \cdot N \cdot Ih \qquad (2.21)$$

onde

h = ordem harmônica;

Ih_R = Corrente resultante da operação de um número determinado de equipamentos;

Ih = Corrente harmônica gerada por um único equipamento;

N = número de consumidores alimentados pela barra em análise.

- **Controladores de Iluminação (*Dimmers*);**

Um sistema similar ao apresentado pela Figura 2.12, pode ser utilizado para regular o fluxo de luz emitido por uma lâmpada incandescente. É certo que, com plena carga, os semicondutores conduzem o tempo todo, e a tensão e a corrente são senoidais. Para diminuir a intensidade luminosa, os semicondutores operam durante um tempo mais curto, diminuindo a potência fornecida à lâmpada. Nesse caso, a corrente que passa através da lâmpada e do sistema, apresenta distorções e consequentemente harmônicos.

A Figura 2.16 mostra a variação da 3ª harmônica em função da potência da lâmpada. Pode-se observar que, entre 15 e 75% de luminosidade, a corrente de 3ª harmônica varia entre 0,18 a 0,20A no máximo, ou seja, aproximadamente 30% da corrente nominal da lâmpada.

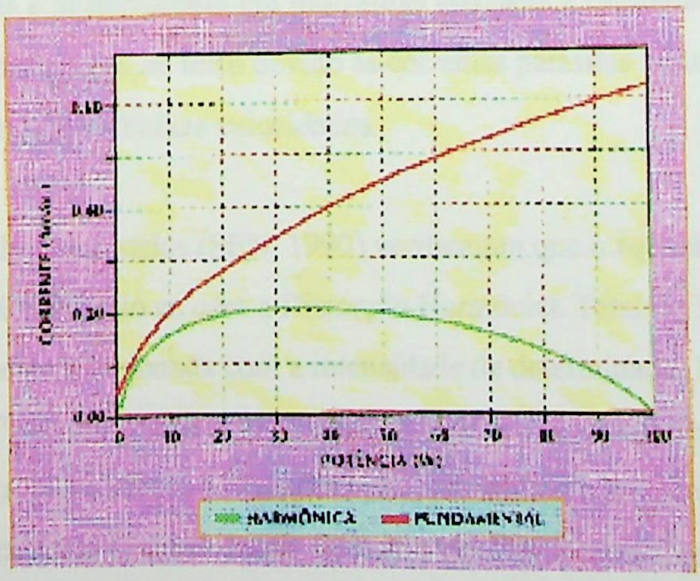


Figura 2.16 – Variação da Corrente Harmônica em função da Potência de uma lâmpada.

- **Lâmpadas de Descarga;**

A família das lâmpadas de descarga incluem as lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio, e as lâmpadas fluorescentes compactas. Estas lâmpadas possuem características não lineares, portanto, causam distorções na forma de onda da corrente. As maiores distorções são observadas nas lâmpadas fluorescentes compactas, por possuírem *starter* e reatores eletrônicos.

Estas lâmpadas serão discutidas com mais detalhes em capítulos posteriores.

- **Fornos a Arco;**

O conteúdo harmônico produzido por fornos a arco variam continuamente devido à condição de operação do forno, posição dos eletrodos, aleatoriedade dos arcos entre os eletrodos, posição dos eletrodos com relação ao terra, entre outros. Uma característica destes fornos é a presença de sub-harmônicos, isto é, harmônicos cujas freqüências não são múltiplos inteiros da freqüência fundamental.

2.5.5 – EFEITOS DOS HARMÔNICOS

Alguns dos problemas originados pelos harmônicos podem ser listados abaixo:

A. Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores

- aumento das perdas no ferro devido às correntes parasitas induzidas;
- torques parasitas a baixas velocidades.

Alguns trabalhos realizados (SEN, 1990) verificaram que o aquecimento de um motor de indução está relacionado não só com a Distorção Harmônica Total de Tensão como também está diretamente relacionada com a intensidade de determinadas harmônicas.

A Figura 2.17 mostra o aumento de temperatura de um motor de indução trifásico de 11kW, sem carga e a plena carga, alimentado por três fontes com intensidades harmônicas diferentes. A primeira fonte (Fonte a) com distorção de 2ª harmônica igual a 5%. A segunda

(Fonte b) com distorção de 5ª harmônica igual a 5%. E a terceira (Fonte c) com uma distorção harmônica variada. A Tabela 2.3 mostra estes valores.

A Figura 2.18 mostra as curvas de temperatura *versus* a faixa de potência de alguns motores, levando-se em conta que eles estão sendo alimentados pelas fontes da Tabela 2.3. Observa-se que, sendo o motor alimentado com uma fonte que apresenta 5% de distorção devido à 2ª harmônica, ele aquece mais do que se alimentado pelas outras fontes.

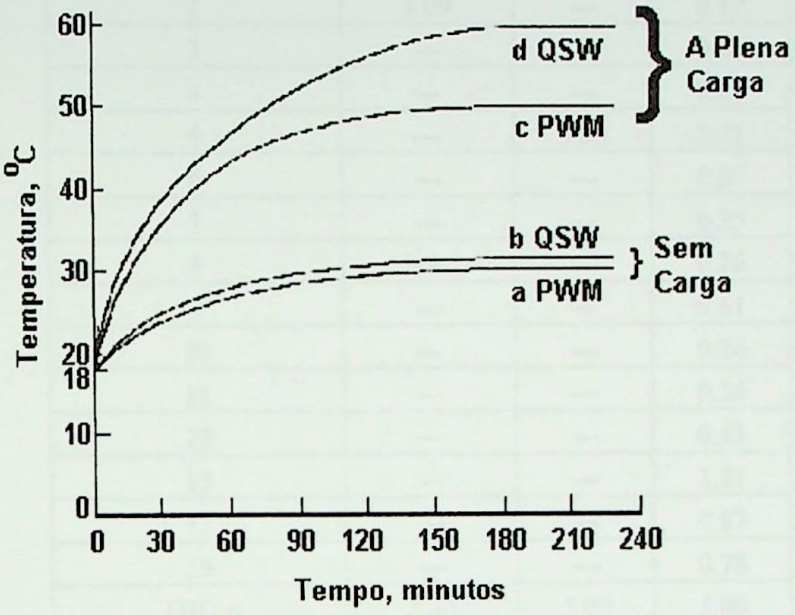


Figura 2.17 – Aquecimento devido a fontes com harmônicos.

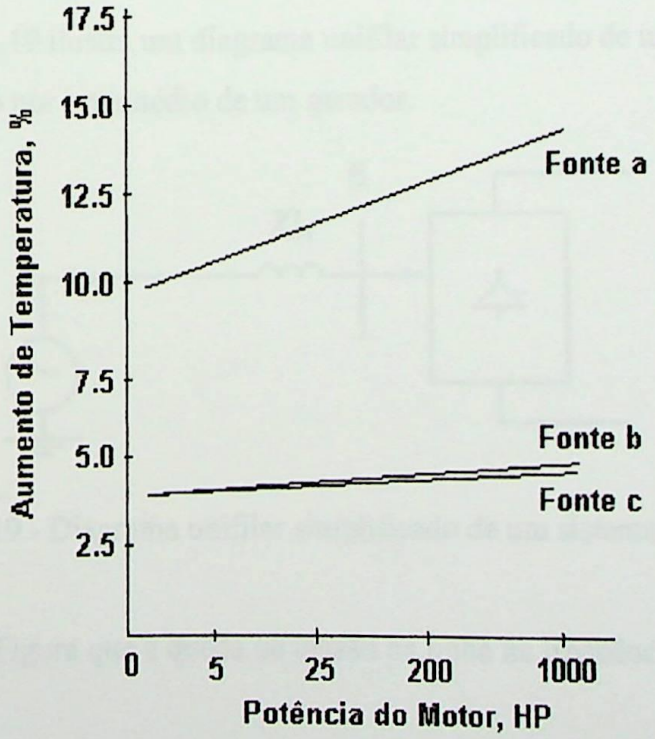


Figura 2.18 – Aumento de Temperatura no motor devido a fontes com intensidades harmônicas diferentes.

Deste modo, o aquecimento do motor devido ao 2° harmônico é 3 vezes maior do que aquele com o 5° ou outros harmônicos. (Yacamini, 1995).

Tabela 2.3 – Conteúdo harmônico das fontes usadas.

Ordem do Harmônico	Fonte a (%)	Fonte b (%)	Fonte c (%)
2	5.00	---	0.17
3	---	---	0.21
4	---	---	0.26
5	---	5.00	3.41
6	---	---	0.87
7	---	---	0.25
8	---	---	0.26
9	---	---	0.61
10	---	---	0.26
11	---	---	0.56
12	---	---	0.43
13	---	---	1.21
17	---	---	0.87
19	---	---	0.78
THD =	5.00	5.00	5.00

B. Distorção de tensão no barramento dos conversores;

- A Figura 2.19 ilustra um diagrama unifilar simplificado de um sistema conversor, alimentado por intermédio de um gerador.

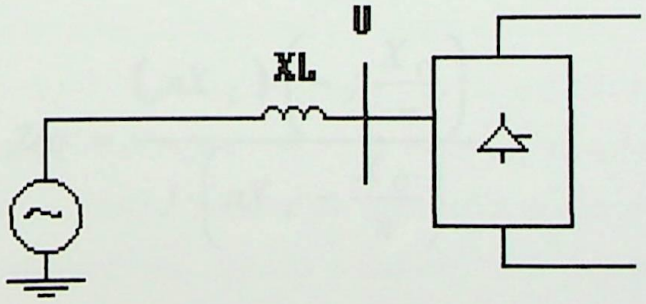


Figura 2.19 - Diagrama unifilar simplificado de um sistema conversor.

Tem-se nesta Figura que a queda de tensão na linha na freqüência fundamental é:

$$\Delta U_1 = X_L \cdot I_1 \tag{2.22}$$

$$I_n = \frac{I_1}{n} \tag{2.23}$$

assim,

$$\Delta U_n = n \cdot X_L \cdot \frac{I_1}{n} = X_L \cdot I_1 = \Delta U_1 \tag{2.24}$$

C. Sobretensões devido a ressonâncias;

Na Figura 2.20 caso um banco de capacitores seja conectado ao barramento de um conversor, para correção do fator de potência, tem-se o circuito equivalente para o harmônico de ordem **"*n*".**

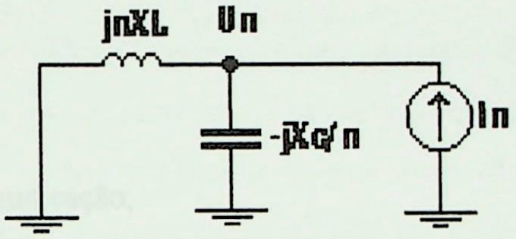


Figura 2.20 – Circuito equivalente para harmônica de ordem "n".

No caso da ressonância paralela, tem-se:

$$nX_L = \frac{X_C}{n} \tag{2.25}$$

$$Zeq = \frac{(jnX_L) \cdot \left(-j\frac{X_C}{n}\right)}{j \cdot \left(nX_L - \frac{X_C}{n}\right)} \tag{2.26}$$

sendo

$$U_n = Zeq \cdot I_n \tag{2.27}$$

e como Un é muito elevado devido à ressonância, tem-se:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{ou} \quad \sqrt{\frac{Scc}{Sbc}} \tag{2.28}$$

onde

Scc = Potência de curto circuito no barramento do conversor;

Sbc = Potência do banco de capacitores, nominal.

Isto significa que a distorção de tensão cresce no sistema e, o que é mais grave, o sistema apresentará uma ressonância em torno de uma determinada freqüência harmônica. Assim, os capacitores contribuem com o fenômeno da ressonância, podendo em muitas vezes ser o próprio banco danificado (explodir), ou danificar outros equipamentos, como transformadores.

D. Interferências em:

- Sistemas de comunicação;
- Circuitos telefônicos, circuitos de proteção e controle que operam em uma faixa de freqüência de 100 Hz a 4 kHz.
- Disjuntores

Os disjuntores termomagnéticos usuais, possuem um disparador térmico sensível ao aquecimento produzido pela corrente do circuito protegido. Tal disparador é projetado para responder ao valor eficaz (real) da corrente de modo a atuar quando se aquece acima de um certo limite. Nessas condições, num circuito que alimenta cargas não lineares, pode ocorrer o disparo do disjuntor com uma corrente, medida por um amperímetro convencional, inferior (ou igual) à nominal do dispositivo, o que caracterizaria um disparo "aparentemente" intempestivo; na realidade o disjuntor está protegendo adequadamente o circuito contra uma sobrecarga produzida pelas harmônicas.

No caso dos disjuntores eletrônicos, o problema é diferente. Se o disparador não for projetado para responder a valores eficazes reais e sim a valores de crista, frente a correntes com resíduo harmônico, ele poderá detectar valores muitos altos e disparar prematuramente, ou detectar valores muito baixos e deixar de atuar, dependendo da forma de onda da corrente; isso caracteriza um funcionamento não confiável do disjuntor.

E. Aumento da Corrente de Neutro

Em instalações contendo muitas cargas monofásicas não lineares, caso típico de edifícios comerciais e análogos contendo grande quantidade de aparelhos de iluminação fluorescente e de microcomputadores, a corrente de neutro nos circuitos de distribuição trifásicos a 4 condutores, mesmo havendo um equilíbrio razoável entre as cargas, é superior à "corrente de desequilíbrio", podendo mesmo superar a corrente de fase. Isso deve-se às correntes harmônicas de ordem 3 e múltiplos que somam-se ao neutro. Na prática destacam-se as correntes de 3ª harmônica e as de freqüência ímpar e múltipla de 3 (9ª, 15ª, 21ª, etc.), conhecidas como harmônicas homopolares.

Uma corrente excessiva no neutro, causa sobreaquecimento do condutor, de suas conexões e da barra de neutro, e também uma queda de tensão no circuito, que pode superar os limites fixados.

Atualmente a norma NBR5410 apresenta um critério de dimensionamento aplicável a circuitos trifásicos a 4 condutores, com um desequilíbrio inferior a 50% onde é prevista corrente harmônica de 3ª ordem no neutro. Neste caso os 4 condutores devem ser dimensionados com a mesma seção, considerando-os carregados. (Tabela 2.4). Quando a corrente de neutro é inferior ou igual a de fase, toma-se como base a corrente de fase e quando for superior a de fase, o dimensionamento é feito com base na corrente de neutro.

Tabela 2.4 - Fatores de Correção para correntes harmônicas em circuitos trifásicos com neutro.

	Fator de Redução (fr)	
Fator de 3ª harmônica da corrente de fase (%)	**Dimensionamento pela corrente de fase**	**Dimensionamento pela corrente de neutro**
0 – 15	1,0	----
15 – 33	0,86	----
33 – 45	----	0,86
> 45	----	1,0

Fonte: NBR 5410/1997

Os fatores de correção da Tabela 7, quando aplicados à capacidade de condução de corrente dos condutores de um circuito de 3 condutores, dão o valor correspondente a um circuito de 4 condutores carregados. Levam em consideração, também, o aquecimento produzido pela corrente harmônica nos condutores fase. Foram originalmente calculados para condutores neutros componentes de cabo terra ou pentapolares, podendo em princípio, ser também aplicados a circuitos constituídos por cabos unipolares ou por condutores isolados.

Observa-se que, se for prevista uma porcentagem superior a 10% para as harmônicas de ordem 9, 12, etc., os fatores devem ser menores, o mesmo acontece quando o desequilíbrio entre fases for superior a 50%.

A primeira coluna da Tabela indica a porcentagem (**p**) da 3ª harmônica (I_3) em relação à corrente de projeto I_B, isto é:

$$p = \frac{I_3}{I_B} \cdot 100\% \tag{2.29}$$

A corrente de 3ª harmônica no neutro, $I_N = 3.I_3$, poderá ser vista na Tabela 2.4.

- Inferior à corrente de fase, para **p** < 33%, valendo no limite $3.0{,}33.I_B$;
- Superior à corrente de fase, para **p** > 33%.

Quando I_N for inferior (ou igual) à corrente de fase, o dimensionamento será feito à partir da corrente de fase, I_B, utilizando-se uma corrente de projeto fictícia, I'_B, dada por:

$$I'_B = I = \frac{I_B}{fr} \tag{2.30}$$

sendo "f" o fator de correção dado na Tabela 2.4.

Quando I_N for superior à corrente de fase, o dimensionamento será feito à partir de I_N, que vale:

$$I_N = I_B \cdot \frac{p}{100} \cdot 3 \tag{2.31}$$

utilizando-se uma corrente fictícia, $\mathbf{I'_N}$, dada por:

$$I'_N = \frac{I_N}{fr} = \frac{1}{fr} \cdot I_B \cdot \frac{p}{100} \cdot 3 \tag{2.32}$$

F. Erros em Instrumentos Convencionais por Efeitos Harmônicos

Os medidores residências apresentam variações em suas medições, quando sob condições harmônicas, dependendo do grau de intensidade desta última. Trabalhos realizados com o objetivo de se determinar estas variações apresentaram os seguintes resultados:

- Para uma bomba de calor com acionamento controlável de velocidade, tendo como distorção harmônica total de tensão $THD_V = 6,03\%$ e de corrente $THD_I = 32,33\%$, apresentou erros de +7,97% a +9,46% do valor correto (valor sem distorção). Já para o caso de uma estação bombeadora com um motor à velocidade controlada por um retificador de 6 pulsos, com desbalanço[6] de tensão de 5,55% e corrente de 28,0% chegou a apresentar erros de -10,09% a +0,52% do valor correto. Esta diferença se deu devido às distorções e à diferença dos medidores utilizados. (Guimarães, 1997)
- Em outro teste realizado com um medidor trifásico convencional os erros variaram de +1,32% a +7,05% do valor correto para determinado nível de distorção.

G. Aumento de Perdas em Condutores

Existem duas formas através das quais as correntes harmônicas podem causar aquecimento em condutores, acima do esperado para os valores de corrente fundamental.

A primeira delas é a redistribuição da corrente dentro do condutor que inclui o efeito pelicular (*skin)* e o efeito de proximidade. A segunda forma se dá através da corrente de neutro em circuitos trifásicos a 4 fios nos sistemas de distribuição com cargas monofásicas, já comentado anteriormente no item 5.

O efeito pelicular é a concentração da corrente na camada externa do condutor. Com ele, a resistência do condutor aumenta. Este efeito aumenta com a freqüência e com o diâmetro do condutor.

O efeito de proximidade é devido à distorção que o campo magnético de outros condutores adjacentes causam sobre a corrente do condutor em questão.

Como as perdas nos cabos são dadas pela equação:

$$I^2R = (I_1^2+I_h^2).R = RI_1^2+R\,I_h^2 \tag{2.33}$$

$$I^2(rms) = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_n^2 \tag{2.34}$$

sendo I a corrente rms que circula pelo mesmo, I_1 a corrente na freqüência fundamental, I_h as correntes harmônicas e R a sua resistência, que é a resistência R_{CC} acrescida de um valor devido aos efeitos pelicular e de proximidade, aqui chamada de R_{CA}. Tem-se deste modo um acréscimo nas perdas devido a estes efeitos (NBR 11301, 1990; Key, 1996).

---

[6] Desbalanço de tensão é a diferença dos valores de tensão em cada fase do sistema. O mesmo para a corrente.

Levando-se em conta os efeitos relativos à freqüência, a resistência elétrica do condutor em corrente alternada (R_{CA}) na temperatura de operação é calculada através da equação 2.35:

$$R_{CA} = R_{CC}(1 + Y_S + Y_P) \tag{2.35}$$

onde

Y_S = fator de efeito pelicular.

Y_P = fator de efeito proximidade.

Na temperatura de operação, a resistência do condutor em corrente contínua (R_{CC}) é calculada pela seguinte equação:

$$R_{CC} = R_{CC20}\left[1 + \alpha_{20}(\theta_C - 20)\right] \quad [\Omega/m] \tag{2.36}$$

onde

R_{CC20} = resistência elétrica do condutor em corrente contínua a 20°C, em [Ω/m] [7].

θ_C = máxima temperatura de operação (°C);

α_{20} = coeficiente de temperatura a 20°C para correção da resistividade K, conforme AnexoB, Tabela B2.

O fator de efeito pelicular é dado por[8]:

$$Y_S = \frac{X_S^4}{\left(192 + 0{,}8X_S^4\right)} \tag{2.37}$$

sendo

$$X_S^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_S \cdot 10^{-7}}{R_{CC}} \tag{2.38}$$

onde:

X_S = argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito pelicular.

f = freqüência do sistema, em Hz;

K_S = coeficiente utilizado para o cálculo de X_S, conforme Anexo B, Tabela B3.

---

[7] A resistência do condutor em corrente contínua a 20°C (R_{cc20}) é obtida da especificação do cabo,. Recomenda-se a utilização do valor máximo especificado (Anexo B - Tabela B4) (FICAP, 1998).

[8] Estas fórmulas são válidas para valores de X_S não maiores que 2,8 e portanto se aplicam à maioria dos casos práticos.

O fator de efeito proximidade, para cabos com duas veias e para dois cabos unipolares, é dado por:

$$Y_P = \frac{X_P^4}{\left(192 + 0{,}8X_P^4\right)} \cdot \left(\frac{dc}{s}\right)^2 \cdot 2{,}9 \tag{2.39}$$

sendo

$$X_P^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_P \cdot 10^{-7}}{R_{CC}} \tag{2.40}$$

onde:

X_P = argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito proximidade;

f = freqüência do sistema, em Hz;

s = distância entre os eixos dos condutores adjacentes, em mm;

dc = diâmetro do condutor, em mm.

K_P = coeficiente utilizado para o cálculo de X_P, conforme Anexo B, Tabela B3.

O fator de efeito proximidade, para cabos tripolares e para três cabos unipolares, é dado por:

$$Y_P = \frac{X_P^4}{\left(192 + 0{,}8X_P^4\right)} \cdot \left(\frac{dc}{s}\right)^2 \cdot \left[0{,}312\left(\frac{dc}{s}\right)^2 + \frac{1{,}18}{\frac{X_P^4}{\left(192 + 0{,}8X_P^4\right)} + 0{,}27}\right] \tag{2.41}$$

sendo

$$X_P^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_P \cdot 10^{-7}}{R_{CC}} \tag{2.42}$$

Desta forma, pode-se observar que, com a introdução de harmônicos, a resistência R_{CC} de um condutor aumenta, implicando num aumento de perdas para o mesmo.

A perda nos condutores devido aos harmônicos (P_{HC}) pode ser determinada através da equação abaixo:

$$P_{HC} = \sum_{h=2}^{hmáx} I_h^2 \cdot R_h \tag{2.43}$$

sendo R_h as resistências (R_{CA}) do condutor para cada nível harmônico obtidas através das equações anteriores.

A Figura 2.21 mostra a relação entre as resistências R_{CA} e R_{CC} para 4 condutores diferentes. As Figuras 2.22 e 2.23 mostram o aumento na resistência R_{CC} devido aos efeitos pelicular e de proximidade.

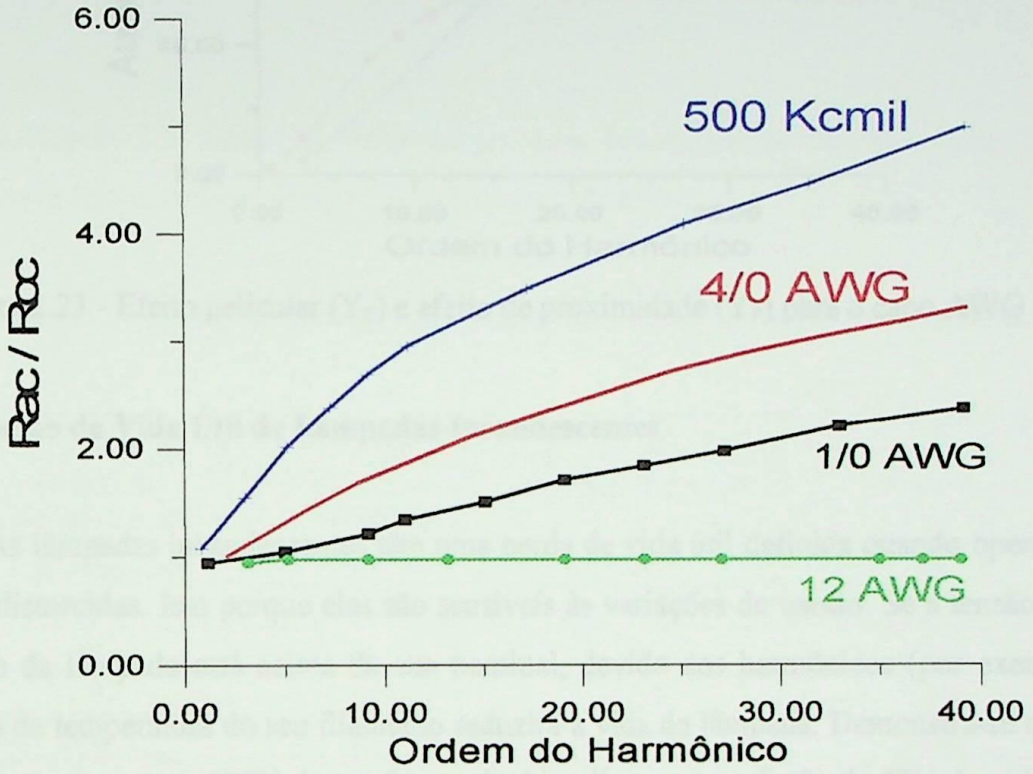


Figura 2.21 - Razão entre as resistências R_{CA}/R_{CC} em função das freqüências harmônicas.

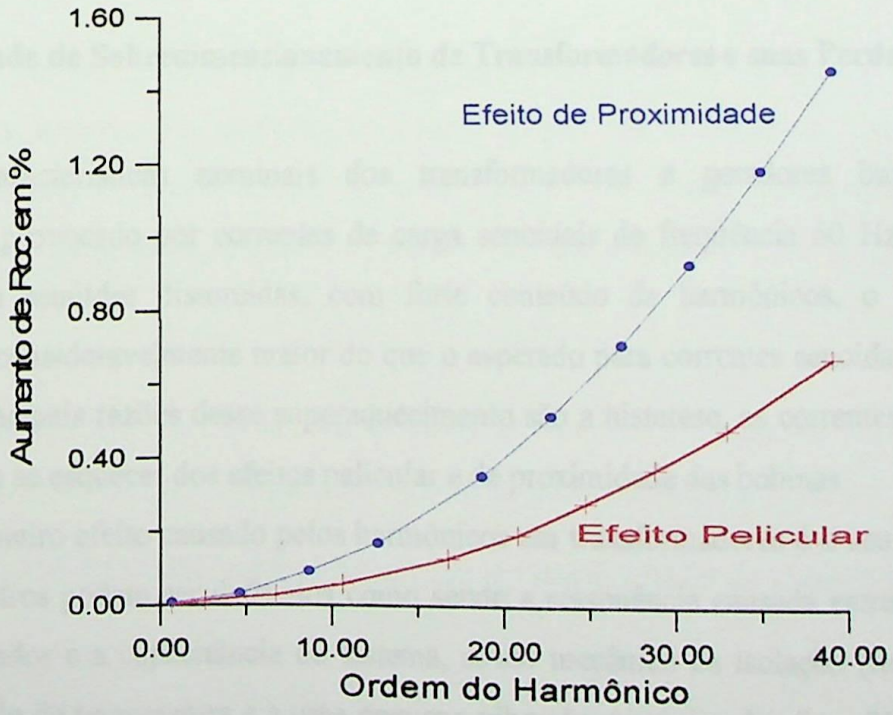


Figura 2.22 - Efeito pelicular (Y_S) e efeito de proximidade (Y_P) para o cabo AWG #12.

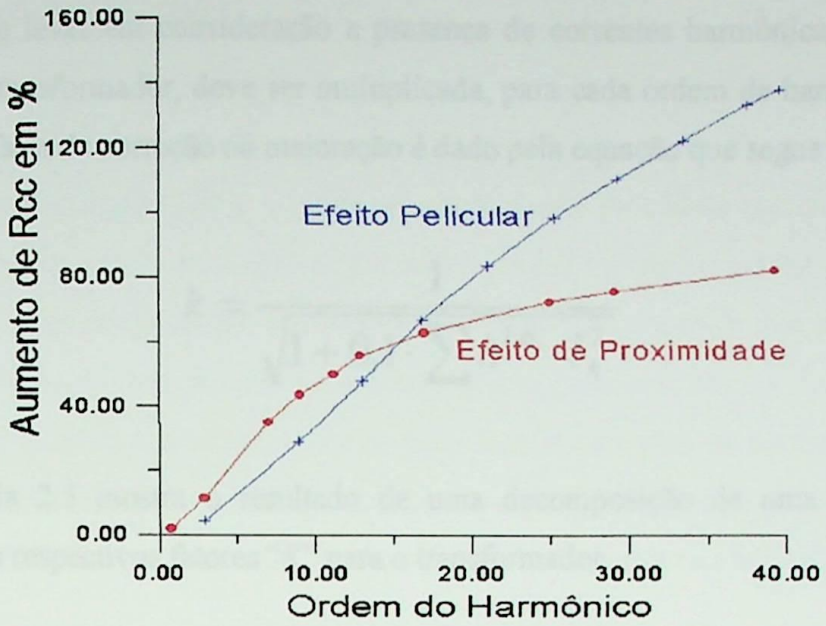


Figura 2.23 - Efeito pelicular (Y_S) e efeito de proximidade (Y_P) para o cabo AWG 4/0.

H. Redução da Vida Útil de Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes têm uma perda de vida útil definida quando operam com tensões distorcidas. Isto porque elas são sensíveis às variações de tensão. Se a tensão rms de operação da lâmpada está acima da sua nominal, devido aos harmônicos (por exemplo), a elevação da temperatura do seu filamento reduzirá a vida da lâmpada. Demonstra-se que uma operação contínua com 105% da tensão nominal implica numa redução de 47% da vida útil da lâmpada. (Kaufman, 1981).

I. Necessidade de Sobredimensionamento de Transformadores e suas Perdas

As características nominais dos transformadores e geradores baseiam-se no aquecimento provocado por correntes de carga senoidais de freqüência 60 Hz. Quando as correntes são senóides distorcidas, com forte conteúdo de harmônicos, o aquecimento provocado é consideravelmente maior do que o esperado para correntes senoidais do mesmo valor. As principais razões desse superaquecimento são a histerese, as correntes parasitas de Foucault, sem se esquecer dos efeitos pelicular e de proximidade das bobinas.

O primeiro efeito causado pelos harmônicos em transformadores é o seu aquecimento adicional. Outros podem ser definidos como sendo a ressonância causada entre a indutância do transformador e a capacitância do sistema, *stress* mecânico da isolação (fios e lâminas) devido ao ciclo de temperatura e a uma pequena vibração mecânica dos fios. (Wagner, V. E., 1993).

A fim de levar em consideração a presença de correntes harmônicas, a corrente de projeto de um transformador, deve ser multiplicada, para cada ordem de harmônico, por um fator "*K*". Este fator de correção ou majoração é dado pela equação que segue:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0{,}1 \cdot \sum h^{1,6} \cdot I_h^2}} \tag{2.44}$$

A Tabela 2.5 mostra o resultado de uma decomposição de uma onda contendo harmônicos e os respectivos fatores "*K*" para o transformador.

Tabela 2.5 - Fatores de correção (*K*) para um transformador sujeito a harmônicos.

Ordem do Harmônico (h)	**Intensidade da Corrente (A) (Valor Eficaz)**	**Nível do Harmônico I_h (%)**	**Fator *K***
1 (fundamental)	104	100	----
3	84	81	0,851
5	64	61	0,820
7	40	38	0,870
9	16	15	0,960
Valores Globais	157	113	0,690

FONTE: [Revista Eletricidade Moderna, Janeiro de 1997].

Nesta Tabela, verifica-se que o valor global do fator "*K*" é igual a 0,69. O que representa um aumento de potência de 45,6% devido aos harmônicos. Ou seja, nestas condições um transformador é capaz de fornecer apenas 69% de sua potência nominal. Para se obter a potência necessária, é preciso escolher um transformador com potência nominal majorada de 45,6%.

Por exemplo, se a potência correspondente à corrente de projeto de uma instalação é de 630kVA, deve-se escolher um transformador com potência nominal igual a :

$\frac{630}{0{,}69} = 630 \times 1{,}456 = 917 kVA$, ou seja, na prática, um transformador de 1000kVA.

As Perdas em Transformadores (Key, 1996), (Emanuel, 1985).

As perdas nos transformadores incluem as perdas em vazio (P_{NL}) e em carga (P_{LL}) como mostrado na equação (2.45). A perda em carga é uma função da corrente de carga, que pode ser dividida em perda de potência (por efeito Joule) I^2R (P_R) e perdas parasitas (ou de dispersão). As perdas parasitas são causadas por correntes de Foucault que produzem fluxos parasitas em bobinas, núcleo, paredes do tanque e outras partes estruturais. As perdas devidas às correntes de Foucault, nas bobinas, são as mais dominantes para as correntes harmônicas. Estas perdas são representadas por P_{EC}. As outras perdas parasitas das partes estruturais do transformador são definidas como P_{ST}. A equação (2.46) relaciona tais perdas.

$$P_{Loss} = P_{NL} + P_{LL} \tag{2.45}$$

onde

$$P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST} \tag{2.46}$$

Para correntes de cargas não-senoidais, a corrente total (I_{rms}) pode ser obtida conforme equação (2.34), e a perda de potência devida à esta corrente pode ser obtida através da equação (2.47):

$$P_R = \sum_{h=1}^{hmáx} I_h^2 R_h \tag{2.47}$$

As perdas devidas às correntes de Foucault nas bobinas aumentam proporcionalmente com o quadrado do produto entre as correntes harmônicas (I_h) e suas respectivas ordens de freqüências (h). Dado a perda devida à corrente de Foucault na freqüência fundamental ($P_{EC\text{-}1}$), a perda total incluindo as devidas às componentes harmônicas pode ser calculada conforme a equação (2.48):

$$P_{EC} = P_{EC-1} \cdot \sum_{h=1}^{h\max} I_h^2 h^2 \tag{2.48}$$

Esta relação tem sido precisa para harmônicas de baixa ordem (3ª, 5ª, 7ª) e estimada para harmônicas de ordem superior (9ª, 11ª, 13ª e assim por diante) particularmente para diâmetros grandes das bobinas e para transformadores de grande capacidade.

Obs. A perda por correntes parasitas de Foucault, sob condições nominais ($P_{EC\text{-}1}$), pode ser obtida através de ensaio a vazio ou diretamente com o fabricante.

2.5.6 – NORMALIZAÇÃO HARMÔNICA

No contexto internacional existem normas relativas ao monitoramento da QEE (IEEE-1159,1995) e outras normas que estabelecem limites harmônicos para sistemas elétricos de energia em altas tensões (IEEE-519, 1992), e em sistemas a níveis de tensões de distribuição (IEC-1000, 1990).

O aspecto fundamental e inovador da norma IEEE 519, 1992, é a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. Neste caso, os limites de distorções de tensão no ponto de ligação são de responsabilidade da concessionária, e os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores (Tabelas 2.6 e 2.8).

A recomendação brasileira (ELETROBRÁS, 1993) sugere limites harmônicos (globais e por consumidor) para sistemas de tensões inferiores e superiores a 69KV (Tabelas 2.7 e 2.9).

Já a norma européia IEC1000, referência mundial para as medições dos níveis harmônicos em sistemas de distribuição, fornece as principais características da tensão, no ponto de entrega ao consumidor, em baixa e média tensão, sob condições normais de operação (Tabela 2.10).

Tabela 2.6 - Limites de distorção de tensão – IEEE 519

Tensão no PAC[9]	**Distorção de tensão:** $THD_V = \sqrt{\sum_{h=2,n}^{n} (V_h/V_1)^2}$	
	Por Consumidor (%)	Total (%)
Abaixo de 69 kV	3,0	5,0
69 a 138 kV	1,5	2,5
138 kV e acima	1,0	1,5

Tabela 2.7 - Limites de tensão por consumidor expressos em % da tensão fundamental – ELETROBRÁS, 1993

V < 69 kV				**V ≥ 69 kV**			
Ímpares		**Pares**		**Ímpares**		**Pares**	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25 ≥ 27	1,5 % 0,7 %	Todos	0,6 %	3 a 25 ≥ 27	0,6 % 0,4 %	Todos	0,3 %
THD_V = 3 %				THD_V = 1,5 %			

[9] PAC é o Ponto de Acoplamento Comum entre a concessionária e a entrada do consumidor.

Tabela 2.8 - Limites de distorção da Corrente (120 V a 69 kV) – IEEE 519

Corrente harmônica máxima em % da fundamental						
Ordem das harmônicas (harmônicas ímpares[10])						
Isc/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD_I
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 2.9 - Limites globais de tensão expressos em % da tensão fundamental – ELETROBRÁS, 1993

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7,	5 %	2, 4, 6	2 %	3, 5, 7,	2%	2, 4, 6	1 %
9, 11, 13,	3%			9, 11, 13,	1,5%		
15 a 25	2%	≥ 8	1 %	15 a 25	1%	≥ 8	0,5%
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
THDv = 6 %				THDv = 3 %			

Tabela 2.10 - Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa tensão - IEC 1000-2-2.

Harmônicos ímpares não múltiplos de 3		Harmônicos ímpares Múltiplos de 3		Harmônicos pares	
Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %	Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %	Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2+0,5*25/h				

[10] As harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores indicados acima para as harmônicas ímpares.

THD_I = Distorção de Corrente = THD_I = $THD_I = \sqrt{\sum_{h=2,n}^{n} (I_h / I_1)^2}$ em % da corrente correspondente à demanda máxima (período de 15 ou 30 minutos).

Isc é a corrente de curto-circuito máxima no Ponto de Acoplamento Comum.

I_L é a corrente média (período de 12 meses) correspondente à demanda máxima da carga.

A recomendação da norma IEEE 519 limita a distorção dos harmônicos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC – Ponto físico que liga a concessionária e o consumidor), sem levar em consideração cada consumidor individualmente. Recomendações desta natureza dão ao primeiro consumidor uma grande vantagem com relação aos demais, já que o limite admissível de distorção que este pode proporcionar ao PAC, é maior que os outros.

De uma forma geral, as normas atualmente existentes não abordam um número suficiente de distúrbios relacionados com a QEE. Torna-se extremamente importante que as empresas de energia, o governo, os consumidores e os fabricantes, juntamente com os órgãos de pesquisa tomem iniciativas de se determinar, regulamentar e normalizar os níveis adequados das distorções voltados à QEE.

2.6 – ALGUMAS MEDIDAS TÉCNICAS E OPERACIONAIS DE MITIGAÇÃO/ELIMINAÇÃO DE ALGUNS DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.

1. *Utilização de No-Breaks nos sistemas ou em equipamentos específicos:* Esta solução permite que o equipamento protegido não "perceba" os distúrbios elétricos. Pode ser considerada uma solução egoísta, pois proporciona proteção individual, sem resolver a origem do problema.

2. *Utilização de Filtros Harmônicos:* São elementos incorporados no sistema para a redução dos harmônicos ou redução do fator de potência de uma forma geral. Podem ser passivos, ativos, eletrônicos e de reator de linha. *Retificadores PWM, Conversores BOOST, também são usados para estas finalidades.* Muitas vezes apresentam como co-efeito destas duas ações principais, outras secundárias como: Redução da corrente de neutro em sistemas trifásico; minimização do impacto (menores perdas) sobre os transformadores de distribuição; efeito isolante para outras fontes harmônicas (oriundas de outros sistemas); eliminação de possíveis ressonâncias com banco de capacitores utilizados para a correção do fator de potência; mitigação de problemas como interferência em sistemas de comunicação; aumento indireto da eficiência de motores e liberação da capacidade de distribuição para a concessionária. (TOM, 1998).
3. *Utilização de Condicionadores de Potência (Power Conditioners):* No caso de distúrbios como a depressão de tensão, estes equipamentos são capazes de fornecer altas potências em pequenos intervalos de tempo. Um exemplo real é o "SMES - Superconductor Magnetic Energy Storage", projetado por BABCOCK & WILCOX para o sistema isolado do ALASCA (600MW) e capaz de fornecer 30MW durante um período superior a 20 segundos. Garantindo desta maneira a forma original da onda do sinal elétrico.(HEI, 1998).

4. *Mudanças no Sistema de Distribuição:* Com mudanças na forma de ligação dos transformadores dos sistemas de Distribuição, torna-se muitas vezes possível a isolação de determinadas freqüências harmônicas do restante do sistema ou a disseminação de outros distúrbios.

5. *Utilização de equipamentos não geradores de distúrbios:* Alguns equipamentos utilizados no sistema são geradores de distorções, como por exemplo as cargas não lineares. A substituição dos mesmos por outros não tão poluidores ajudaria a resolver o problema.

2.7 – NOVA DEFINIÇÃO DE POTÊNCIA

(WATANABE, 1993; EMANUEL, 1998; ARANGO, 1997; MIELCZARSKI, 1998)

Nos sistemas elétricos a potência fornecida se dá através de potência ativa (P) e de não-ativas. Em condições normais[11] (sem distorções), a potência ativa é a responsável pelo trabalho executado pelos equipamentos. Já, o único fenômeno capaz de produzir energia não ativa é a armazenagem da mesma em campos magnéticos (motores elétricos) e em campos elétricos (banco de capacitores). Esta energia não ativa é necessária para dar condições de funcionamento, por exemplo, aos motores e transformadores (magnetização de seu núcleo), e é bem conhecida como energia reativa (Q).

A circulação da potência reativa pelo condutor (fio ou linha) do sistema elétrico, produz perdas "ΔP". As perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total ($I^2 = I_P^2 + I_Q^2$) pela resistência do fio ou linha (R). Como essa corrente cresce com o excesso de energia reativa, estabelece-se uma relação direta entre o incremento das perdas e o baixo fator de potência, provocando o aumento do aquecimento dos condutores e equipamentos.

$$\Delta P = R\left(I_P^{\,2} + I_Q^{\,2}\right) \tag{2.49}$$

Se a linha com determinada perda "ΔP" estiver no seu limite de carregamento[12], a eliminação de "Q" permitiria levar a potência ativa (P) a um valor máximo chamado de *Potência Aparente (S).* Sendo a relação:

$$S = \sqrt{P^{\,2} + Q^{\,2}} \tag{2.50}$$

assim haveria uma potência liberada (P_{LIB}) no sistema, dada por:

---

[11] Em condições normais a corrente e tensão fornecidas apresentam forma de onda senoidal e simétrica, igualmente distribuída, por exemplo, nas três fases do sistema elétrico.

[12] Quantidade de potência que o fio permite transmitir.

$$P_{LIB} = S - P = \left(\frac{1}{FP} - 1\right) \cdot P \tag{2.51}$$

onde FP é o *Fator de Potência* da carga, cujo valor é dado por:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \varphi \tag{2.52}$$

Isto tudo é verdade nos sistemas ditos normais.

Nos sistemas distorcidos, existem além de "Q", existem outras potências não ativas:

1. Potência de Assimetria - A;
2. Potência Harmônica – H;

Deste modo, as perdas aumentariam substancialmente:

$$\Delta P = R\left(I_P{}^2 + I_Q{}^2 + I_A{}^2 + I_H{}^2\right) \tag{2.53}$$

E a potência Aparente tomaria a forma:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + A^2 + H^2} \tag{2.54}$$

Apresentando deste modo um novo fator de potência, dado por:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + A^2 + H^2}} = \cos \theta < \cos \varphi \tag{2.55}$$

Seja a potência aparente (S) de um sistema trifásico dada por:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \tag{2.56}$$

E a potência Ativa (P) dada por:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \tag{2.57}$$

sendo o índice "1" relacionado com a freqüência fundamental.

Assim, o fator de potência real "FP" será dado por:

$$FP = P / S \tag{2.58}$$

Como I é dada pela equação (2.34), (Assumindo-se que $V \cong V_1$), então, o fator de potência fica:

$$FP = \frac{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cos\varphi_1}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I} = \frac{I_1 \cos\varphi_1}{I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos\varphi_1 \tag{2.59}$$

$$FP = K_I \cdot \cos\varphi_1 \tag{2.60}$$

e é chamado de Fator de Potência Real, sendo K_I o fator de distorção dado por:

$$K_I = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} I_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \tag{2.61}$$

onde

$\cos\varphi_1$ é o fator de deslocamento entre as formas de onda de corrente e tensão fundamentais

Torna-se importante observar que na presença de harmônicos, o fator de potência real é menor do que o fator de potência de deslocamento.

2.8 – NOVA PROPOSTA TARIFÁRIA PARA AMBIENTES DISTORCIDOS (ARANGO, 1997)

A EXTENSÃO DA TARIFA A OUTROS VALORES NÃO ATIVOS

Quando a transmissão de energia se aparta do padrão ideal (senoidal e simétrico), a conseqüência principal no que se refere à filosofia tarifária atualmente em vigor, é a aparição de novas energias e demandas não ativas. Em outras palavras, os valores aparentes são formados não apenas pela soma geométrica de componentes ativos e reativos. Agregam-se a estes, energias e demandas que, não sendo ativas nem reativas, resultam da existência de desequilíbrios e harmônicos.

A presença destas novas energias e demandas traz por resultado um aumento da ocupação do sistema para transferir a componente ativa (a única aproveitada na utilização).

Sendo assim, entre dois clientes que absorvem o mesmo valor ativo e o mesmo reativo, sendo que o primeiro o faz em condições ideais e o segundo com desequilíbrios e harmônicos, este último "ocupa mais sistema" que o outro e, portanto, demanda maiores custos para seu atendimento.

A situação é, na verdade, semelhante a de dois clientes com o mesmo consumo ativo; o primeiro não absorve reativo em quanto o segundo tem um certo consumo reativo. Obviamente o segundo demanda mais do sistema e por este motivo, a tarifa brasileira tende a onerá-lo mais, no intuito de preservar uma equanimidade tarifária que leve em conta os maiores investimentos requeridos pelo segundo cliente.

FATOR DE POTÊNCIA SOB CONDIÇÕES DISTORCIDAS

O fator de potência foi originalmente definido para sistemas trifásicos simétricos e senoidais. Quando estas condições operacionais não podem ser mantidas, faz-se necessário recorrer a uma definição deste Fator que seja de caráter geral, isto é, independente do regime - distorcido ou não - com que a energia esteja sendo transportada.

Para isto, é conveniente observar que o fornecimento de uma mesma potência ativa P a duas cargas simétricas, (2.62) uma puramente resistiva e (2.63) outra com componente reativa, dará origem, na linha de transmissão, a perdas:

$$W_1 = 3RI_1^{\ 2} = 3R\frac{P^2}{V^2} \tag{2.62}$$

$$W_2 = 3RI_2^{\ 2} = 3R\frac{P^2}{V^2\cos^2\varphi} \tag{2.63}$$

portanto

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{W_1}{W_2}} \tag{2.64}$$

ou seja, o fator de potência de uma carga simétrica linear é a raiz quadrada da relação entre as perdas de transmissão requeridas para atender a carga simétrica resistiva linear que consome a mesma potência ativa, e as perdas para atender a própria carga considerada.

Esta relação entre fator de potência e eficiência da carga enquanto as perdas incorridas para fazer-lhe chegar energia, representa, uma das interpretações mais úteis do fator de potência enquanto conceito. Parece correto, então utilizá-la como uma definição do fator de potência FP (que se reduz a cosφ no caso ideal tão somente).

Usando o caminho inverso, resulta possível calcular o FP de uma carga que contém assimetria e não-linearidade.

Com efeito, seja uma carga que, quando submetida a uma tensão contendo:

1. Fundamental Simétrica V_{1B}
2. Fundamental não Simétrica V_{1A}
3. Harmônica total V_H

absorve corrente contendo analogamente I_{1B}, I_{1A}, I_H.

A tensão fundamental completa escrever-se- á

$$V_1^2 = V_{1B}^2 + V_{1A}^2 \tag{2.65}$$

E a tensão total

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \tag{2.66}$$

Em tais condições, pode-se escrever

$$FP = (\cos\varphi_\beta)\cdot(aFP)\cdot(hFP) \tag{2.67}$$

onde

$$\cos\varphi_\beta = dFP = \frac{P_{1B}}{V_{1B}\cdot I_{1B}} \tag{2.68}$$

$$aFP = \frac{V_{1B} I_{1B}}{V_1 I_1} \tag{2.69}$$

$$hFP = \frac{V_1 I_1}{V\ I} \tag{2.70}$$

Note-se que o primeiro fator do 2° membro $\cos\varphi_B$, da equação 2.67, representa o efeito da defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente, sendo que na condição ideal coincide com o próprio fator de potência. Já os outros fatores levam em consideração os efeitos da assimetria (aFP) e não linearidade da carga (hFP).

A PROPOSTA DE TARIFAÇÃO DA ASSIMETRIA E DO CONTEÚDO HARMÔNICO

Com base na análise anterior, é possível estender a filosofia tarifária da Portaria 1569 aos outros componentes não ativos do consumo de maneira em um todo semelhante ao caso do reativo.

Considerando agora a existência de três componentes do fator de potência total, dados pelas (2.68, 2.69, 2.70), basta aplicar a cada um o conceito de excedente.

Poderá haver, assim; três excedentes. O primeiro é aquele já levado em conta pela Portaria, isto é, o excedente reativo

$$\left(\frac{dFR}{dFP} - 1\right) \cdot \text{Medição Ativa} \tag{2.71}$$

a única diferença com a (2.68) se refere à terminologia usada. DFR é o fator de referência, que hoje é fixado no valor 0,92.

Os outros excedentes teriam um formato análogo:

- Devido à Assimetria:

$$\left(\frac{aFR}{aFP} - 1\right) \cdot \text{Medição Ativa} \tag{2.72}$$

- Devido aos Harmônicos

$$\left(\frac{hFR}{hFP} - 1\right) \cdot \text{Medição Ativa} \tag{2.73}$$

Vale notar que a soma da parcela convencional da fatura destes três excedentes representa um valor aproximadamente proporcional aos consumos aparentes da carga, ou seja, aqueles gerados pela expressão "VI" produto dos valores eficazes de tensão e a corrente, e que corresponde a definição moderna de potência aparente em sistemas de três fios.

Estes fatores de referência podem operar como "divisores d'água" para discriminar entre clientes que efetivamente geram harmônicos pela natureza de suas cargas, e aqueles que absorvem harmônicos devido a existência da distorção na tensão criada por outros clientes.

A Figura 2.24 mostra o triângulo de potências para ambientes distorcidos.

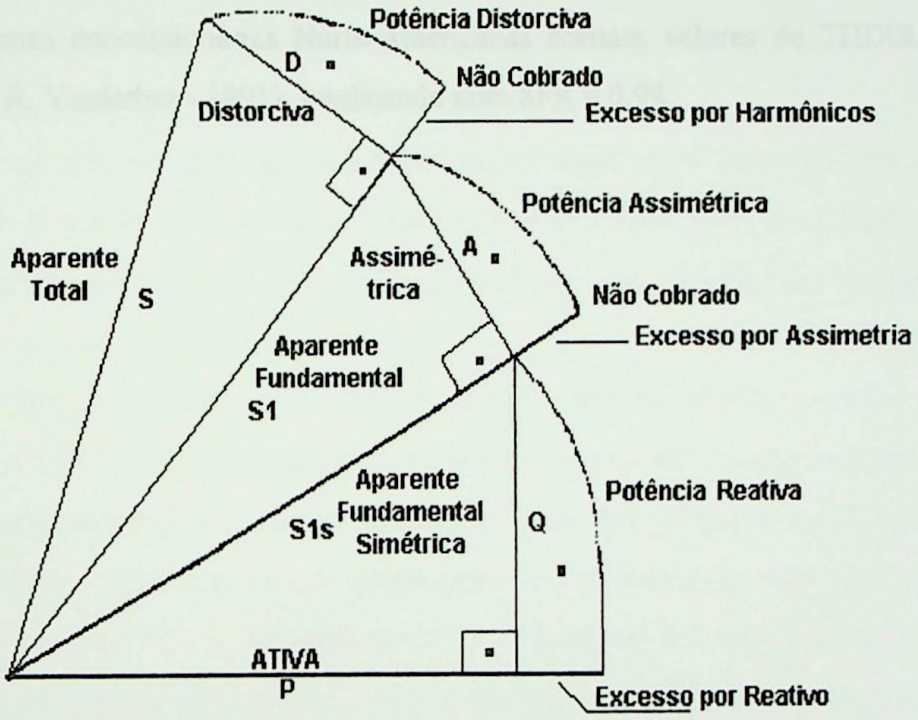


Figura 2.24 - Triângulo de Potências para Ambientes Distorcidos.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS FATORES DE REFERÊNCIA (CED, 1998)

Para o fator de referência reativo, dFR a norma brasileira estipula o seu valor em 0,92. Já para os valores de referência distorcivos e assimétricos existe a necessidade de determiná-los.

O mais relevante fenômeno de distorção é a presença de harmônicos. Assim, o fator distorcivo pode estar relacionado ao conteúdo harmônico total da onda de corrente, o THDi.

$$hFP = \sqrt{\frac{1}{1+THD_I^{\,2}}} \tag{2.74}$$

assim, hFR fica:

$$hFR = \sqrt{\frac{1}{1+THD_I R^2}} \tag{2.75}$$

sendo THDiR o conteúdo total harmônico de corrente de referência.

Algumas concessionárias Norte-Americanas aceitam valores de THDiR = 20% no máximo (R. R. Verderber - 1991). Implicando num hFR = 0,98.

CAPÍTULO 3

A RELAÇÃO ENTRE A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

3 - INTRODUÇÃO

Com as medidas de conservação de energia relacionadas com a qualidade da energia elétrica (assim como seus distúrbios) definida, torna-se possível a comparação entre estas duas vertentes (conservação e qualidade) da energia.

São relacionadas algumas medidas da conservação assim como os seus benefícios e efeitos sobre a qualidade da energia. É discutida a importância da localização da medição harmônica, como sendo um fator determinante para uma boa avaliação das perdas e avaliação da ocupação do sistema elétrico.

Realiza-se um esforço preliminar de quantificação dos efeitos causados por algumas medidas de conservação sobre a qualidade da energia, tanto física como economicamente.

Na parte econômica é onde se desenvolve a metodologia para a verificação da relação de compromisso entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica. Esta nova metodologia foi dividida em três procedimentos. O primeiro deles compara os custos devido ao consumo de energia elétrica com e sem a questão da qualidade da energia envolvida. O segundo procedimento quantifica e contabiliza as perdas e a ocupação do sistema elétrico que a medida de conservação de energia causa. O terceiro procedimento quantifica o custo de algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios, causados por medidas de conservação.

Com esta metodologia, introduz-se então uma ferramenta de análise da relação de compromisso entre a qualidade e a conservação de energia.

No próximo capítulo é feito um estudo de casos para a aplicação desta metodologia desenvolvida.

3.1 A RELAÇÃO ENTRE A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Algumas medidas adotadas nos programas de conservação de energia elétrica implicam em diminuição dos níveis de qualidade da energia. Cabe portanto, determinar a melhor relação de compromisso entre os ganhos advindos da conservação e os problemas ocasionados na qualidade.

Dentre as medidas tomadas através da gerência pelo lado da demanda e a atuação no uso final, merecem destaque o uso de alguns equipamentos / componentes, tais como:

- Controladores de velocidade variável para motores;
- Lâmpadas fluorescentes compactas;
- Controle de iluminação através de *Dimmers;*
- Compensação de potência reativa através de bancos de capacitores.

Estas medidas resultam em alguns efeitos sobre o sistema elétrico. Pode-se, vincular perda de qualidade da energia elétrica a algumas medidas adotadas nos programas de conservação de energia, como pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Benefícios e Efeitos da Conservação sobre a Qualidade da Energia Elétrica

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA		**QUALIDADE DA ENERGIA**
Ação	**Benefício**	**Efeitos**
Instalação de Controladores de Velocidade Variável	Economia de energia e possibilidade de gerência do controle dos fluxos	▪ Geração de Harmônicos ▪ Eliminação da Depressão de Tensão durante a partida de motores
Instalação de Lâmpadas Fluorescentes Compactas	Economia de energia	▪ Geração de Harmônicos ▪ Susceptibilidade ao *Flicker* ▪ Redução do Fator de Potência da Instalação
Instalação de Banco de Capacitores	Melhoria do Fator de Potência	▪ Geração de Transitórios ▪ Amplificação de Harmônicos
Controle da Iluminação através de *Dimmers*	Melhoria do fator de Carga	▪ Redução no Fator de potência ▪ Geração de Harmônicos ▪ Melhoria de tensão de regime permanente

FONTE: (Abreu - 1997 – 2), adaptado.

A Tabela 3.1 mostra que o principal distúrbio causado por estes equipamentos é a emissão harmônica, implicando numa redução do fator de potência, entre outros problemas já comentados no capítulo anterior.

A Tabela 3.2 e as Figuras 3.1 e 3.2 mostram o acréscimo de corrente devido às distorções harmônicas de corrente (THDi) causadas por cargas não lineares, e a variação no fator de potência. Tomou-se como base uma corrente (fundamental) de 1 Ampère.

Tabela 3.2 - Influência dos Harmônicos no Acréscimo de Corrente e na Redução do Fator de Potência.

Distorção na Corrente THDi - %	Acréscimo de corrente %	Fator de Potência total
0	*0,00*	*1*
5	*0,125*	*0,999*
10	*0,50*	*0,995*
30	*4,40*	*0,958*
50	*11,80*	*0,894*
70	*22,07*	*0,819*
90	*34,54*	*0,743*
100	*41,42*	*0,707*
120	*56,20*	*0,640*
130	*64,01*	*0,610*
150	*80,28*	*0,555*
170	*97,23*	*0,507*
200	*123,61*	*0,447*

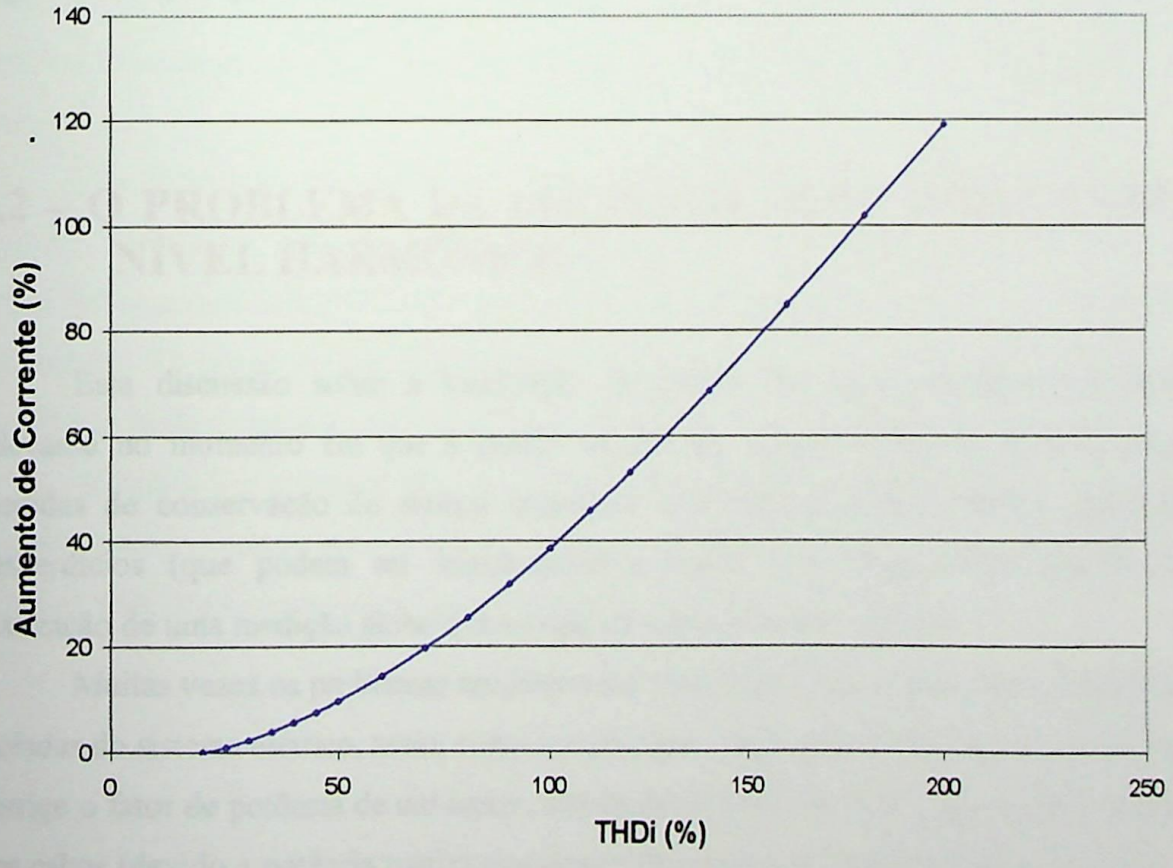


Figura 3.1 – Acréscimo de Corrente devido à distorção harmônica.

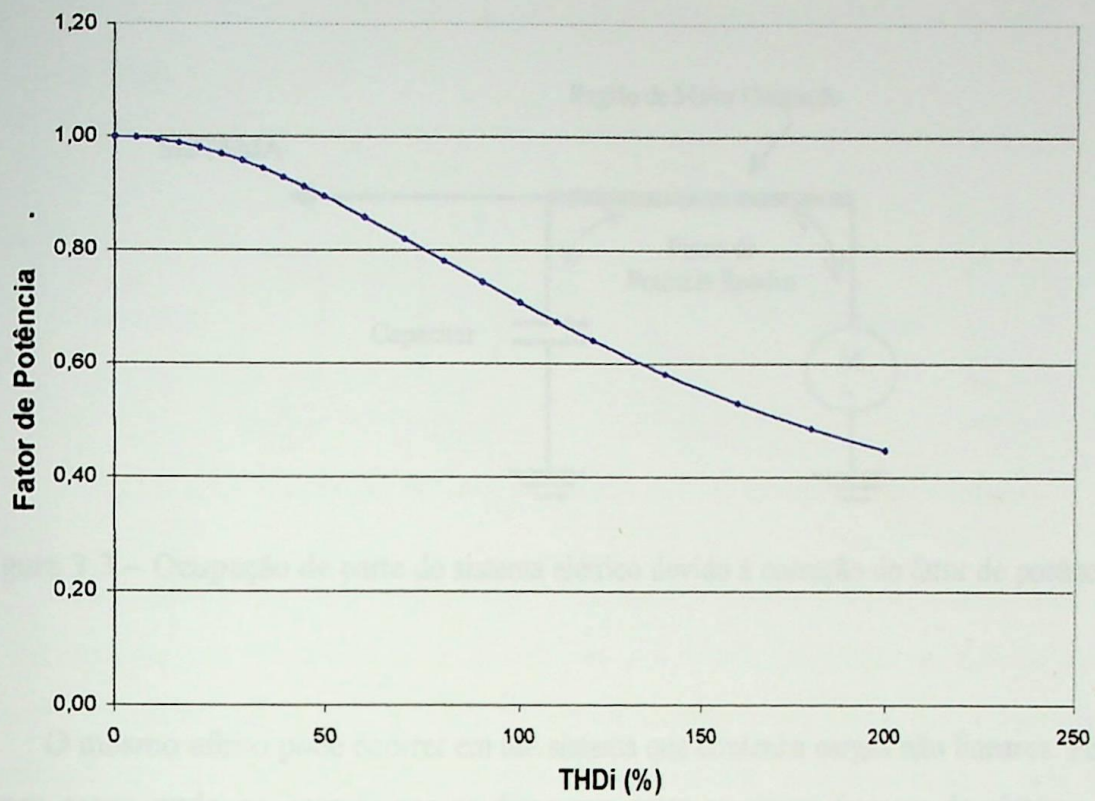


Figura 3.2 – Redução no Fator de Potência Total devido à distorção harmônica de corrente.

Deste modo, deve-se atentar para estas medidas de conservação que tenham efeitos negativos sobre a qualidade.

3.2 – O PROBLEMA DA LOCALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DO NÍVEL HARMÔNICO.

Esta discussão sobre a localização da medição dos níveis harmônicos torna-se relevante no momento em que a grande maioria das cargas não-lineares adotadas pelas medidas de conservação de energia interferem localmente no sistema elétrico, causando desperdícios (que podem ser minimizados) e muitas vezes despercebidos quando da realização de uma medição global (na entrada do consumidor, por exemplo).

Muitas vezes os problemas resultantes das medidas de conservação ocorrem em partes isoladas do sistema elétrico, assim como acontece com o fator de potência. Ou seja, quando se corrige o fator de potência de um motor, através de um banco de capacitores, ocorrem perdas nos cabos (devido à potência reativa que circula pelo mesmo) e consequentemente uma maior ocupação do sistema neste trecho Banco-Motor. Isto está representado na Figura 3.3

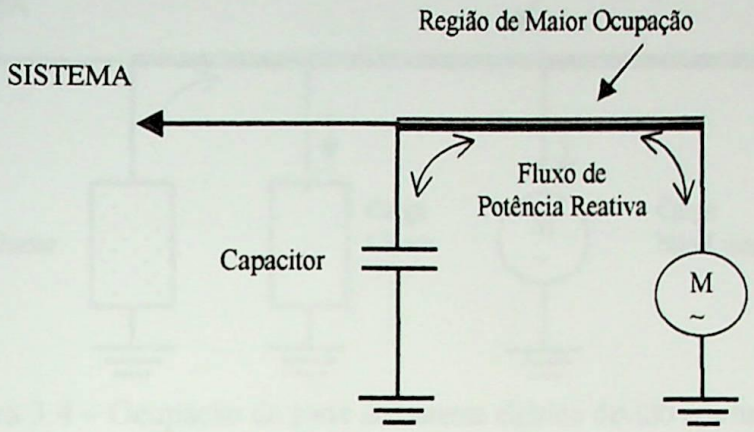


Figura 3.3 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido à correção do fator de potência.

O mesmo efeito pode ocorrer em um sistema que contenha cargas não lineares. Podem ocorrer casos onde os harmônicos se dispersem entre as cargas lineares do sistema, não chegando ao circuito de entrada do mesmo. Isto faz com que ocorram os efeitos, devidos aos harmônicos, somente nos trechos onde estes circulem, sem atingir portanto o circuito principal. Assim, as perdas e a maior ocupação do sistema se dará nos ramais *Carga Não Linear – Cargas Lineares* ou *Carga Não Linear- Carga Não Linear* do circuito. Pode ocorrer também cancelamento de harmônicos entre cargas não lineares, devido aos seus ângulos de fase.

Tendo em vista estes cancelamentos e dispersões, não se torna consistente realizar uma medição harmônica somente na entrada principal de um sistema elétrico. Deve-se realizá-la em circuitos específicos das cargas geradoras de harmônicos ou em circuitos menores que as contenham. O ponto de medição que deve ser observado é aquele no qual a distorção harmônica pode ocasionar problemas, como os citados no capítulo anterior.

A figura 3.4 exemplifica a ocupação de parte do sistema, devido aos harmônicos. É suposto neste exemplo que existe um cancelamento dos harmônicos entre as cargas não lineares, resultando numa ausência de harmônicos em direção ao sistema.

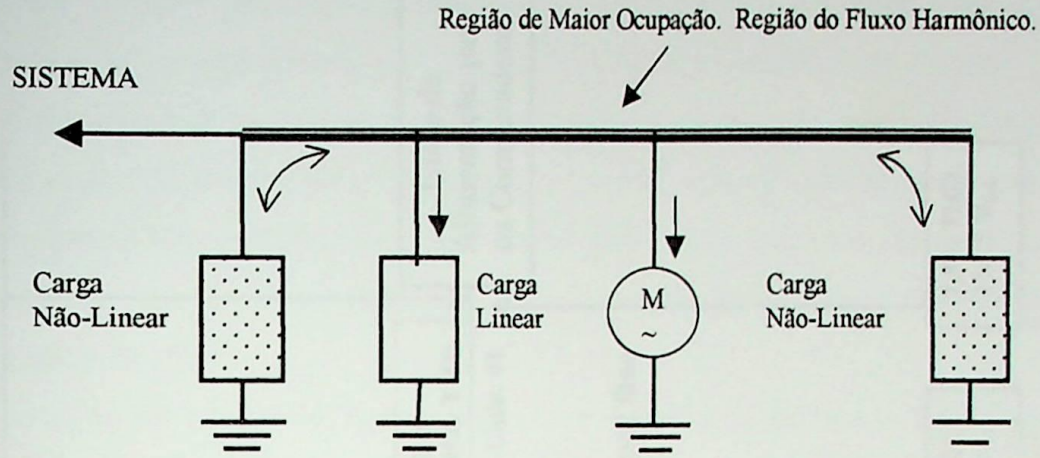


Figura 3.4 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos.

Mas é sabido que nem sempre se torna possível o cancelamento ou a eliminação total dos harmônicos em um sistema. Com isto, as perdas e a ocupação no sistema estarão presentes e maiores serão quanto maior for o nível harmônico associado. Para exemplificar a necessidade da medição nos vários pontos de um sistema, contrapondo-se a uma única medição na entrada do mesmo, a Figura 3.5 mostra o sistema elétrico de um estabelecimento comercial [Lai, 1997], que possui cargas elétricas lineares e não-lineares, onde cada transformador está com 50% de sua capacidade.

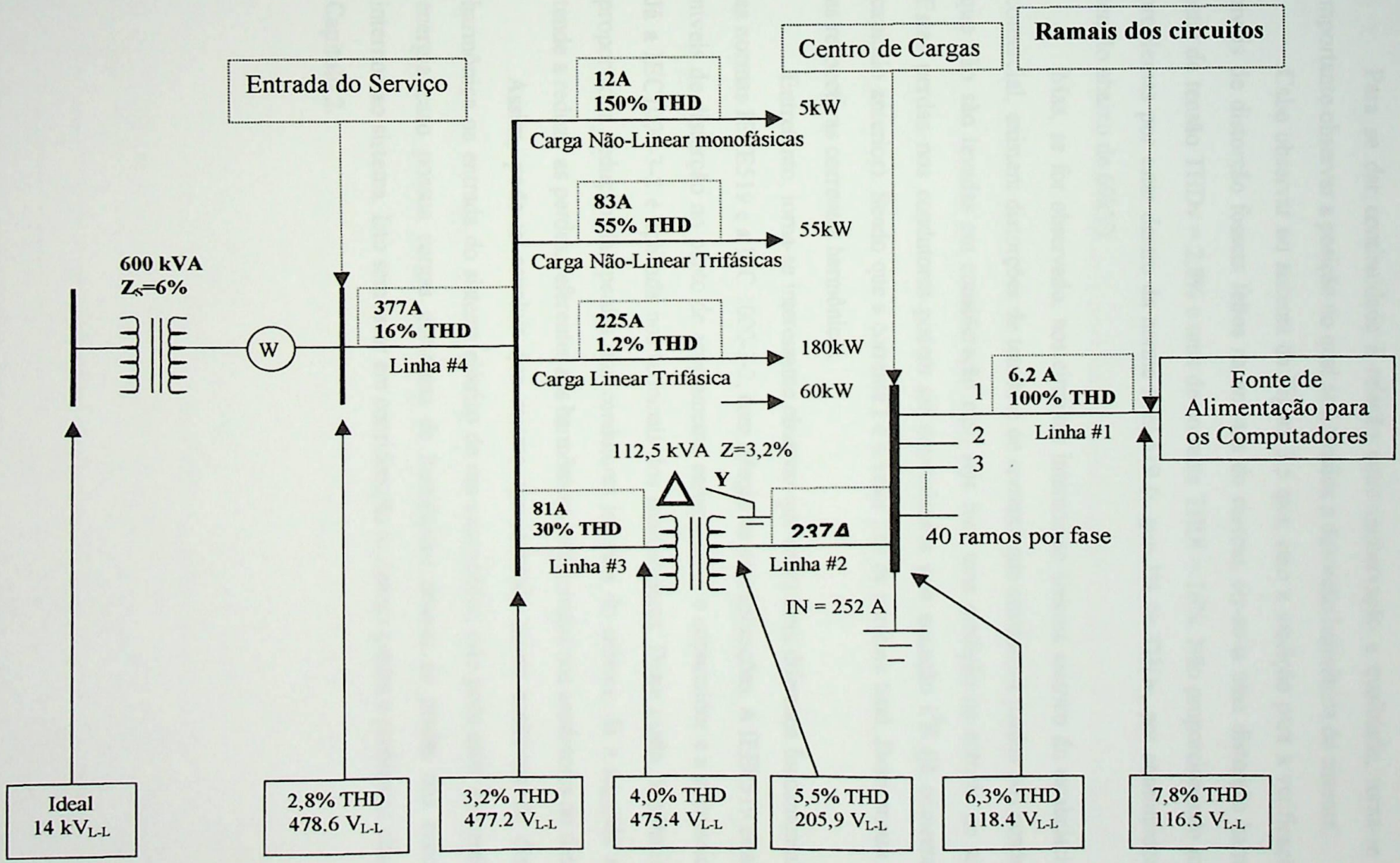


Figura 3.5 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos.

Para se dar continuidade à relação entre conservação e qualidade, torna-se muito importante observar a posição no qual será medida a distorção harmônica do sistema.

Cabe observar no sistema da Figura 3.5 que, caso a medição para a verificação dos níveis de distorção fossem feitos na entrada do mesmo, ter-se-ia uma distorção harmônica total de tensão THDv = 2,8% e uma de corrente THDi = 16%. Não proporcionando maiores problemas por estar dentro da norma IEEE519 (< que 3% de THDv, por consumidor, com tensão abaixo de 69kV).

Mas, se for observado, nos circuitos internos ao sistema elétrico do estabelecimento comercial, existem distorções de tensão e de corrente que ocasionam perdas nos condutores, que não são levadas em consideração caso seja feita uma medição na entrada do sistema. Estas perdas nos condutores podem ser determinadas pela equação I^2R (já comentada no capítulo anterior). Sendo que a corrente I é o valor rms da corrente total. Deste modo, inclui as respectivas correntes harmônicas.

Entretanto, torna-se interessante observar que existe uma diferença fundamental entre as normas IEEE519 e a IEC 1000-3-2, com relação às suas aplicações. A IEEE519 estabelece níveis de distorção no ponto de acoplamento comum entre o consumidor e a concessionária. Já a IEC1000-3-2 é aplicada nos terminais dos equipamentos. Deste modo, a primeira não proporciona redução das perdas nos condutores internos do sistema. Já a segunda norma, tende a reduzir as perdas, referentes aos harmônicos, ocasionadas nos condutores do sistema.

Assim, pode-se concluir que mesmo apresentando níveis aceitáveis de distorção harmônica na entrada do sistema elétrico de um consumidor, este pode estar desperdiçando energia caso possua cargas geradoras de harmônicos através de perdas nos condutores internos ao sistema. Isto sem levar em consideração as demais perdas e problemas citados no Capítulo 2.

3.3 – QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS POR ALGUMAS MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA.

3.3.1 - QUANTIDADES FÍSICAS

3.3.1.1 - Controladores de Velocidade Variável - (ASD – Adjustable Speed Drive)

Trabalhos recentes (Strangas, 1996) mostram que os controladores estão relacionados a três características da qualidade da energia: Os transitórios devido ao chaveamento dos bancos de capacitores; as depressões de tensão e os harmônicos. Naquele trabalho, 13 (treze) controladores de marcas variadas, sendo sete deles de 20HP e o restante de 3HP, foram submetidos a três testes:

- **O primeiro teste para verificar a operação do ASD sob condições de transitório ocasionado pelo chaveamento do banco de capacitor;**

  Como resultado deste teste, todos os ASD's se mostraram imunes a tal distúrbio.

- **O segundo teste objetivou determinar a influência (e consequentemente a susceptibilidade dos ASD's) durante as Depressões de Tensão;**

Para este teste foram adotados os valores, mostrados na Tabela 3.3, para a depressão de tensão:

Tabela 3.3 - Duração e Intensidade das Depressões de Tensão.

Tipo de Depressão	Tensão (% da Nominal)	Duração da Depressão
1	100%	1/30 s
2	50%	1/10 s
3	30%	1.0 s

Com isto, foram avaliados 13 ASD's nomeados de **G, H, I, J, K, L** e **M**, para os de 20HP e de **h, i, j, k, l** e **m** para os de 3HP. A avaliação feita constou das categorias apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Categorização do Desempenho dos ASD's durante as Depressões de Tensão.

A	A velocidade do motor decresceu momentaneamente.
B	A velocidade do motor decresceu até zero ou inverteu de rotação, mas o sistema se recuperou e retornou à sua operação.
C	A velocidade do motor tornou-se negativa e o ASD ficou inabilitado a restabelecer a operação. Depois da carga ser removida, o motor voltou a acelerar até a sua velocidade original.
D	A energia para o motor foi interrompida, e o ASD não recuperou a sua operação após a carga ter sido removida.

Obtendo-se como resultado dos testes o apresentado na Tabela 3.5 para os ASD's de 20HP e na Tabela 3.6 para os ASD's de 3HP. Nestas tabelas, variou-se o torque da carga em três faixas, 0% (sem carga), 50% (a meia carga) e 100% (a plena carga). As letras A, B, C e D, referem-se à categorização da tabela anterior.

Tabela 3.5 - Desempenho dos ASD's de 20HP, durante as Depressões de Tensão.

Tipo da Depressão	**Torque da Carga (%)**	**G**	**H**	**I**	**J**	**L**	**M**
1	0	A	A	A	A	A	A
1	50	A	A	A	A	A	A
1	100	A	C	A	C	A	A
2	0	A	A	A	A	D	A
2	50	A	C	A	C	D	C
2	100	B	C	A	C	D	C
3	0	A	C	A	A	D	A
3	50	C	C	C	A	D	C
3	100	C	C	C	C	D	C

Tabela 3.6 - Desempenho dos ASD's de 3HP, durante as Depressões de Tensão.

Tipo da Depressão	**Torque da Carga**	**h**	**i**	**j**	**k**	**l**
1	0 %	A	A	A	A	A
1	50 %	A	A	A	A	A
1	100 %	A	A	B	A	A
2	0 %	A	A	A	A	A
2	50 %	A	A	A	A	A
2	100 %	A	A	A	B	A
3	0 %	A	A	A	B	A
3	50 %	A	A	C	B	A
3	100 %	B	A	C	B	A

- **O terceiro e último teste, objetivou determinar o nível harmônico gerado por estes equipamentos assim como as suas eficiências.**

Os resultados estão mostrados nas tabelas 3.7 a 3.10.

Tabela 3.7 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 20HP, THDi em %.

Freqüência (Hz)	Torque (%)	G	H	I	J	K	L	M
60	25	95	143	153	86	83	<1	19
60	50	79	125	127	60	73	<1	14
60	75	65	123	119	45	60	<1	12
60	100	54	112	110	39	49	<1	11
45	25	110	144	151	92	88	<1	15
45	50	85	130	137	73	77	<1	13
45	75	76	121	135	53	69	<1	11
45	100	65	115	116	48	57	<1	11
30	25	108	155	152	98	98	<1	14
30	50	93	143	148	82	85	<1	11
30	75	86	135	133	72	78	<1	10
30	100	80	127	130	59	71	<1	11

Tabela 3.8 - Eficiência dos ASD's de 20HP em %.

Freqüência (Hz)	Torque (%)	G	H, K	I	J	L	M
60	25	71.51	77.77	75.09	79.23	69.39	60.70
60	50	84.44	83.54	83.06	87.18	78.23	75.50
60	75	87.34	86.16	86.24	88.23	81.14	79.31
60	100	88.39	86.41	85.84	88.66	83.35	80.53
45	25	68.49	78.87	71.26	78.65	75.52	65.78
45	50	83.42	83.49	82.94	85.80	77.93	80.03
45	75	86.69	83.48	85.01	87.91	80.44	82.77
45	100	86.59	85.73	87.11	87.44	82.03	84.18
30	25	68.96	74.19	76.83	79.69	61.68	67.82
30	50	82.32	82.26	83.91	87.73	75.06	81.79
30	75	84.69	82.54	85.00	87.42	77.30	85.04
30	100	84.85	82.40	85.44	85.76	77.50	85.70

Tabela 3.9 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 3HP, THDi em %.

Freqüência (Hz)	Torque (%)	h	i	j	k	l	m
60	25	200	106	169	178	88	89
60	50	179	80	163	173	63	84
60	75	171	74	130	164	52	76
60	100	169	58	155	159	43	72
45	25	190	90	181	198	86	105
45	50	190	90	163	181	74	93
45	75	174	78	163	171	62	85
45	100	173	74	159	166	52	79
30	25	197	108	176	180	99	108
30	50	176	94	169	178	83	93
30	75	176	91	165	178	76	88
30	100	179	83	161	172	63	84

Tabela 3.10 - Eficiência dos ASD's de 3HP em %.

Freqüência (Hz)	Torque (%)	h	i	j	k, m	l
60	25	54.30	49.60	27.19	48.97	40.08
60	50	72.08	79.40	60.01	74.20	64.03
60	75	77.19	80.86	69.01	77.69	70.92
60	100	79.44	80.84	74.72	79.89	74.17
45	25	50.16	67.72	11.37	43.77	45.21
45	50	72.24	72.63	53.90	69.10	72.70
45	75	76.01	80.61	64.53	74.80	75.77
45	100	80.33	77.18	79.96	78.60	75.97
30	25	36.90	24.68	9.32	27.06	46.50
30	50	70.37	63.60	53.23	60.90	72.05
30	75	71.92	71.88	60.87	69.36	75.29
30	100	73.96	76.08	68.33	72.33	75.64

Pode-se portanto, relacionar perda de qualidade da energia devido à utilização destes equipamentos amplamente usados em medidas de conservação de energia.

Cada controlador pode ter um nível diferente de distorção harmônica. Mas todos eles (por trabalharem com a eletrônica) distorcem a forma de onda de corrente, implicando em emissões de correntes harmônicas.

A referência (KARL - 1991) mostra um exemplo do nível desta distorção deste equipamento, atingindo correntes harmônicas de 51,1% do valor da sua fundamental. Fazendo com que a corrente do circuito passasse de 6,6 (A) para 9,97 (A). Apresentando uma distorção total de corrente de THDi = 113,3%.

Como as perdas são proporcionais à corrente que circula no circuito de forma quadrática (Perda = Resistência x Corrente^2), tem-se um aumento de 128 % nestas perdas para este caso em análise.

3.3.1.2 - Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas

A substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas, injeta níveis substanciais de harmônicos no sistema de distribuição secundária (220/127 V), (devido ao reator das mesmas), principalmente se for considerada a adoção disseminada desta prática por parte dos consumidores, implicando também na redução do fator de potência.

A tabela 3.11 mostra o grau desta distorção harmônica e a redução no fator de potência para um *retrofitting* de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas em um edifício com carga total de 100kVA, conforme (R. R. Verderber, 1991). As lâmpadas possuíam THD_i=115%.

Devido ao *retrofitting*, houve um aumento na distorção harmônica total de corrente de 0% (com incandescentes) para 23,5% com todas as lâmpadas sendo substituídas por fluorescentes. E o fator de potência, inicialmente em 0,85 (com as incandescentes) diminuiu para 0,65 na situação final.

Tabela 3.11 - Efeitos do *Retrofitting* de lâmpadas na Qualidade da Energia Elétrica

	Percentagem do *Retrofitting* com lâmpadas fluorescentes compactas			
	10	**25**	**50**	**100**
Distorção Harmônica Total de Corrente (%)	1,7	4,5	9,8	23,5
Fator de Potência Total	0,84	0,82	0,78	0,65

FONTE: (R. R. Verderber, 1991)

Outra característica das lâmpadas fluorescentes, é a sua sensibilidade (ou melhor, susceptibilidade) à Cintilação ("*Flicker*" - perturbação já comentada), podendo ser contribuidora para as dores de cabeça e outros problemas fisiológicos, conforme (Wilkins - 1988), prejudicando deste modo a qualidade do ambiente de trabalho.

No Anexo C encontram-se os níveis de distorção harmônica para algumas lâmpadas fluorescentes compactas atualmente utilizadas pelos programas de conservação.

3.3.1.3 - Instalação de Banco de Capacitores

A instalação de banco de capacitores é a forma mais utilizada, pela indústria, para realizar a compensação de potência reativa.

Esta instalação, se não for bem executada, todos os benefícios que traria (como liberação do sistema para transmitir potência ativa, sem novos investimentos, além de facilitar o controle de tensão) serão anulados em função dos problemas de qualidade de energia que poderão surgir, tais como:

- ressonância do conteúdo harmônico presente no sistema, bem como seus malefícios sobre os diversos equipamentos;
- estabelecimento de condições de ressonância com conseqüentes sobretensões harmônicas;
- queima prematura dos bancos de capacitores devido ao aquecimento das unidades capacitivas sob condições harmônicas;
- introdução de transitórios de chaveamento, principalmente devido à necessidade de controle do fator de potência, segundo a média horária, podendo desligar processos industriais.

3.3.1.4 - Controladores de Intensidade Luminosa ("Dimmers")

A referência (SAMIR - 1991) analisa a influência deste dispositivo verificando o fator de potência e a distorção harmônica como principais distúrbios desta medida de conservação.

Como resultados da referência, cita-se a redução do fator de potência de 0,99 para 0,31 com 100% do controle de iluminação (menor intensidade de luz), com uma distorção harmônica de corrente variando de 3,9% para 87,1% nesta última condição. E o aumento da 3ª harmônica de corrente, tomada para o autor como a mais significativa.

A Tabela 3.12 mostra a variação do fator de potência e a distorção da 3ª harmônica de corrente.

Tabela 3.12 - Níveis de fator de potência e de Distorção da 3ª Harmônica de corrente para uma lâmpada incandescente com Controlador de intensidade luminosa *(dimmer)*.

Controle da Intensidade (%)	Tensão fornecida à lâmpada (V)	Corrente na lâmpada (A)	Potência fornecida à lâmpada (W)	Fator de Potência (FP)	Distorção referente a 3ª Harmônica de corrente (%)
26,7	123,5	0,86	105,5	**0,99**	**3,9**
44,0	123,8	0,79	90,0	**0,92**	**---**
57,9	123,8	0,70	70,0	**0,81**	**41,9**
69,8	124,0	0,59	50,4	**0,69**	**---**
82,4	124,0	0,46	30,3	**0,53**	**---**
100,0	124,0	0,26	9,9	**0,31**	**87,1**

FONTE: (SAMIR - 1991)

3.3.2 - QUANTIDADES ECONÔMICAS

Três procedimentos diferentes podem ser adotados para se verificar a relação de compromisso entre a conservação de energia gerada por algumas de suas medidas e a influência destas na qualidade da energia elétrica.

O primeiro procedimento seria comparar os custos, devido ao consumo de energia, cuja tarifação está em vigor no país (considerando o excedente reativo), com os custos devidos aos excedentes reativo mais o distorcivo (harmônico) e assimétrico (desequilíbrio).

O segundo procedimento seria quantificar e contabilizar a ocupação do sistema elétrico do consumidor, que se beneficia de algumas medidas de conservação de energia, mas que não interferem diretamente sobre a sua conta de energia (ocupação interna do sistema elétrico do consumidor).

O terceiro deles seria quantificar os custos de algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios causados por medidas de conservação, tais como filtros harmônicos, mudança no sistema elétrico, transformadores especiais para conversores, etc., incorporando-os às análises de viabilidade econômica dos projetos de conservação.

Para a realização destas comparações dentro desta dissertação, considerou-se que os sistemas ou equipamentos analisados estivessem equilibrados.

3.3.2.1 – PROCEDIMENTO 1: Comparação dos custos, devido ao Consumo de Energia, considerando-se a Nova Proposta Tarifária apresentada no Capítulo 2, item 2.5.4.5:

Através da equação (3.1), calcula-se o custo de fornecimento de energia elétrica de qualquer empresa sob condições não distorcivas (sem harmônicos e equilibrado).

$$Custo\ \text{de Fornecimento} = (kW \cdot TD + kWh \cdot TC) + (kW \cdot TD + kWh \cdot TC) \cdot \left(\frac{0{,}92}{FP} - 1\right) \qquad (3.1)$$

sendo

kW = Demanda contratada ou demanda medida caso esta ultrapasse a contratada.

TD = Tarifa de demanda – R$/kW

kWh = Consumo de energia no mês.

TC = Tarifa de consumo de energia elétrica - R$/kWh

FP = Fator de potência calculado (FP = kWh/(kWh + kVAr)).

Observa-se que a 2ª parcela da equação anterior eqüivale ao ajuste no custo de fornecimento, devido ao excedente de reativo. Desta forma, a 2ª parcela só será aplicada, caso o fator de potência (FP) calculado seja menor que o seu valor de referência adotado na legislação atual em 0,92.

Para o caso distorcivo, supôs-se apenas a distorção devida aos harmônicos, tendo em vista que esta distorção é a que mais está presente em medidas de conservação de energia, conforme item 3.1 do Capítulo 3.

Levando-se em conta esta distorção harmônica, o custo de fornecimento de energia toma a forma:

$$Custo\ \text{de Fornecimento} = (kW \cdot TD + kWh \cdot TC) + (kW \cdot TD + kWh \cdot TC) \cdot \left(\frac{0{,}92}{FP} - 1\right) + (kW \cdot TD + kWh \cdot TC) \cdot \left(\frac{hFR}{hFP} - 1\right) \qquad (3.2)$$

sendo

hFR = Fator de referência harmônico (conforme item 2.8 do Capítulo 2)

hFP = Fator de distorção harmônico (conforme item 2.8 do Capítulo 2)

Chamando-se o 1° termo da equação (3.2) de "A", vem:

$$\text{Custo de Fornecimento} = A \cdot \left(1 + \left(\frac{0{,}92}{FP} - 1\right) + \left(\frac{hFR}{hFP} - 1\right)\right) \tag{3.3}$$

E sendo a relação entre hFP e THDi dada pela equação (2.74), vem:

$$\text{Custo de Fornecimento} = A \cdot \left(1 + \left(\frac{0{,}92}{FP} - 1\right) + \left(\sqrt{\frac{1 + THD_i^{\,2}}{1 + THD_i R^2}} - 1\right)\right) \tag{3.4}$$

Deste modo, comparou-se o custo de fornecimento de energia sem e com a distorção harmônica. Esta comparação pode ser verificada através da Tabela 3.13 onde verifica-se o aumento neste custo devido à distorção. Nesta tabela ainda estão representados alguns valores de referência para a distorção harmônica – hFR. Algumas concessionárias norte americanas incentivam a utilização de equipamentos que possuam no máximo THDi = 20%. No Brasil este valor de referência ainda não é consenso entre os especialistas. Para efeito dos cálculos da Tabela 3.13, adotou-se como referência alguns valores de hFR, correspondentes aos valores de THDi variando de 20 em 20% até 100%.

Outra condição adotada foi a do fator de potência de deslocamento, adotado em 0,92. Com isto, a influência no aumento do custo de fornecimento se deve somente à distorção harmônica.

As Figuras 3.6 e 3.7 dão uma idéia precisa do aumento deste custo com valores de THDi igual a 20% e de 20 a 100%, respectivamente.

Observa-se portanto que, caso a distorção harmônica causada por uma medida de conservação for levada em consideração em sua análise de viabilidade econômica, e sendo a legislação tarifária adaptada para ambientes distorcivos, o aumento no custo de fornecimento pode chegar a valores significativos. Podendo talvez em alguns casos inviabilizar alguma medida de conservação antes viável no sistema tarifário vigente.

Com a Tabela 3.13, verifica-se que caso não sejam tomadas providências no sentido de prevenir, mitigar ou eliminar as distorções harmônicas de corrente, estas poderão gerar perdas para a sociedade como um todo. Pois, atualmente elas não são cobradas dos seus respectivos poluidores, implicando em perdas (técnicas) que são incorporadas na tarifa de energia elétrica, fazendo com que toda a sociedade pague por problemas, muitas vezes, devido a alguns consumidores somente.

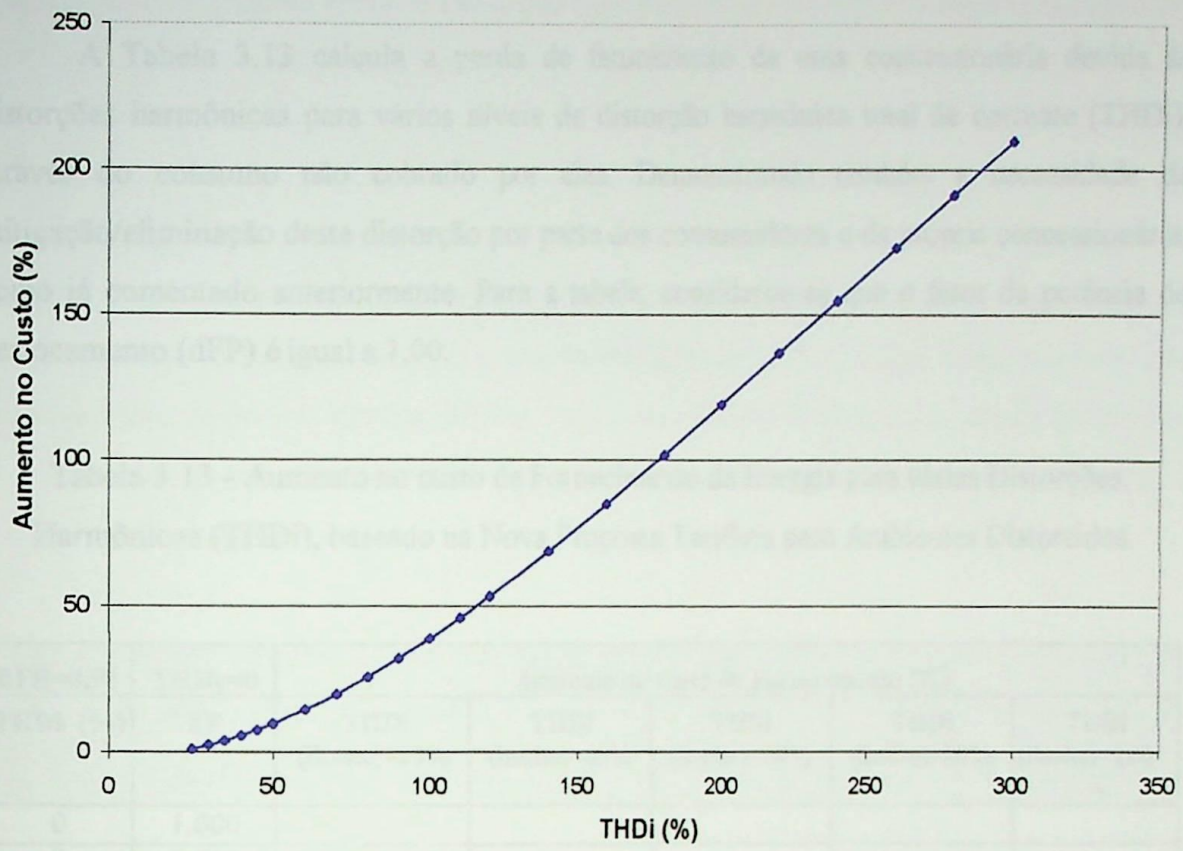


Figura 3.6 – Aumento no custo de Consumo devido a Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).

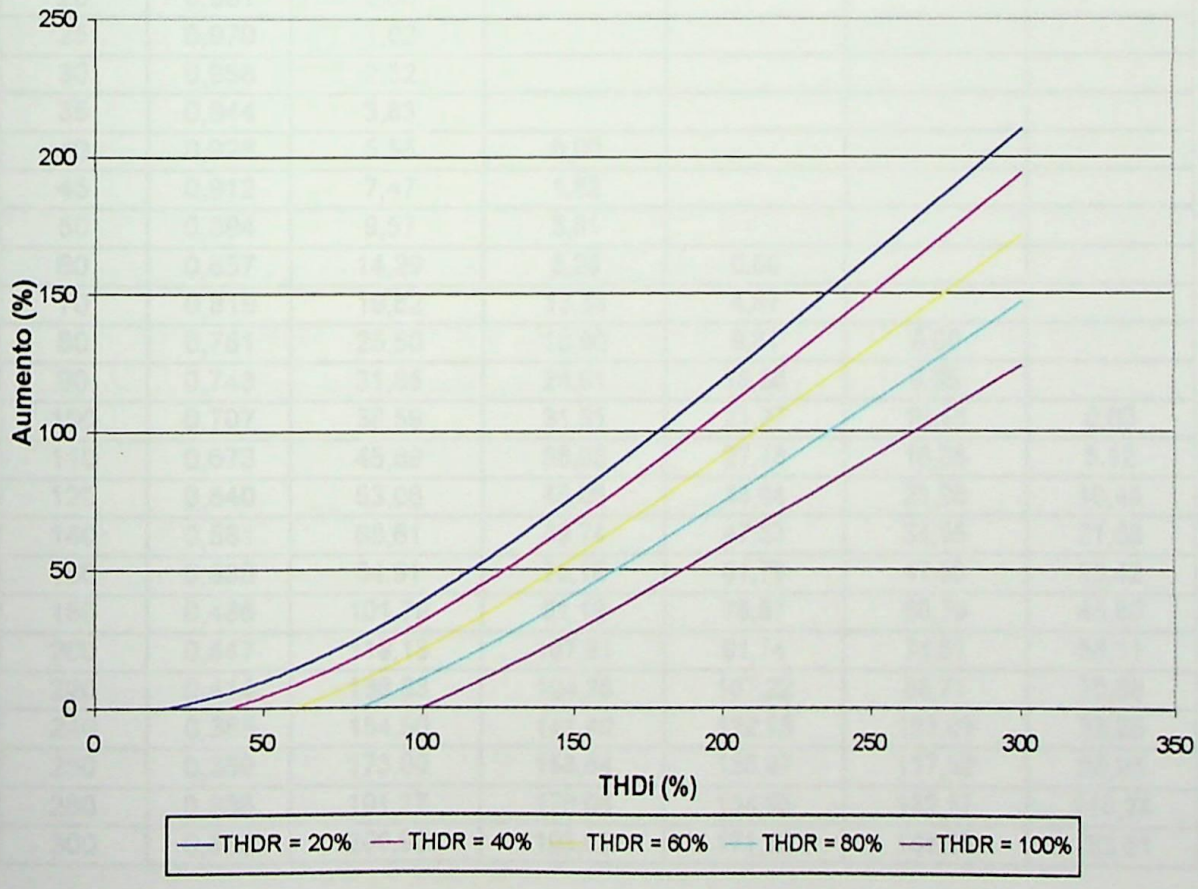


Figura 3.7 – Aumento no custo de Consumo devido a Vários Valores de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).

A Tabela 3.13 calcula a perda de faturamento de uma concessionária devida às distorções harmônicas para vários níveis de distorção harmônica total de corrente (THDi), através do consumo não cobrado por elas. Demonstrando também a necessidade de mitigação/eliminação desta distorção por parte dos consumidores e da própria concessionária, como já comentado anteriormente. Para a tabela, considerou-se que o fator de potência de deslocamento (dFP) é igual a 1,00.

Tabela 3.13 - Aumento no custo de Fornecimento de Energia para várias Distorções Harmônicas (THDi), baseado na Nova Proposta Tarifária para Ambientes Distorcidos.

hFR=0,98	**THDv=0**	**Aumento no custo de Fornecimento (%)**				
THDi (%)	**FP**	**THDi (limite)=20%**	**THDi (limite)=40%**	**THDi (limite)=60%**	**THDi (limite)=80%**	**THDi (limite)=100 %**
0	1,000					
5	0,999					
10	0,995					
15	0,989					
20	0,981	0,00				
25	0,970	1,02				
30	0,958	2,32				
35	0,944	3,83				
40	0,928	5,55	0,00			
45	0,912	7,47	1,82			
50	0,894	9,57	3,81			
60	0,857	14,29	8,28	0,00		
70	0,819	19,62	13,34	4,67		
80	0,781	25,50	18,90	9,81	0,00	
90	0,743	31,85	24,91	15,36	5,06	
100	0,707	38,59	31,31	21,27	10,43	0,00
110	0,673	45,69	38,03	27,48	16,08	5,12
120	0,640	53,08	45,03	33,94	21,98	10,45
140	0,581	68,61	59,74	47,53	34,35	21,66
160	0,530	84,91	75,18	61,79	47,33	33,42
180	0,486	101,79	91,19	76,57	60,79	45,60
200	0,447	119,13	107,61	91,74	74,61	58,11
220	0,414	136,83	124,38	107,22	88,71	70,88
240	0,385	154,80	141,40	122,95	103,03	83,85
260	0,359	173,00	158,64	138,87	117,52	96,98
280	0,336	191,37	176,06	154,95	132,17	110,24
300	0,316	209,90	193,61	171,16	146,93	123,61

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ EIM

3.3.2.2 – PROCEDIMENTO 2: Quantificação e Contabilização da Ocupação do Sistema Elétrico e de suas perdas.

Suponha um consumidor que se beneficia de algumas medidas de conservação de energia. E que estas medidas não implicam em um aumento no custo de fornecimento, por não distorcer a onda de corrente no ponto de medição da concessionária. Mas, ocasiona uma ocupação interna do seu sistema elétrico, implicando em perda de ampacidade de condutores e capacidade de transformadores. E também fazendo com que as perdas em condutores e transformadores aumentem.

Este procedimento de se verificar a relação de compromisso entre as medidas de conservação de energia e a qualidade da energia elétrica está relacionada com a nova definição de potência, apresentada no Capítulo 2, item 2.7. Com ela, pode-se verificar o quanto um sistema elétrico está sendo ocupado devido às distorções harmônicas, à assimetria, e também ao fator de deslocamento (dFP), relativo à utilização de potência reativa.

Uma maior ocupação do sistema elétrico por parte de potências distorcivas, ditas não ativas, como às devidas aos harmônicos e à assimetria, leva a condições desfavoráveis para o mesmo, pois um sistema que se apresente desta forma terá menores condições de transporte de energia ativa (a que realmente realiza trabalho). Assim, este sistema elétrico terá que ser substituído ou incorporar novos equipamentos para suprir a necessidade de novas cargas (algumas vezes) muito antes de atingir a sua capacidade nominal.

A maneira de se quantificar a ocupação de um sistema elétrico pode ser feita através do cálculo ou medição da potência aparente total, comparando esta potência com a aparente (fundamental – S_1) sem distorções harmônicas.

A Figura 3.8 mostra um exemplo de um sistema com cargas não-lineares alimentadas por uma fonte perfeitamente senoidal através de um transformador T. Logo, a potência que a carga exige pode ser dada pela equação (2.50). Esta carga está ocupando do sistema elétrico uma potência aparente total S_T.

Para a execução do seu trabalho, a carga necessita mais do que simplesmente das potências ativa e reativa. Necessita também de outras potências ditas não-ativas, em específico a potência distorciva devido aos harmônicos, chamada de "H".

Cada carga apresenta as características mostradas na Figuras 3.9 e na Tabela 3.14 (Guimarães, 1996).

Foi escolhido este tipo de carga, pelo fato de que suas formas de onda (tanto de corrente quanto de tensão) apresentam-se semelhantes a várias cargas não–lineares usualmente encontradas em medidas de conservação, tais como: lâmpadas fluorescentes compactas, lâmpadas de vapor de sódio, ASD's e também em uma grande parte de equipamentos que se utilizam de um sistema de retificação de tensão com um capacitor de alisamento de tensão.

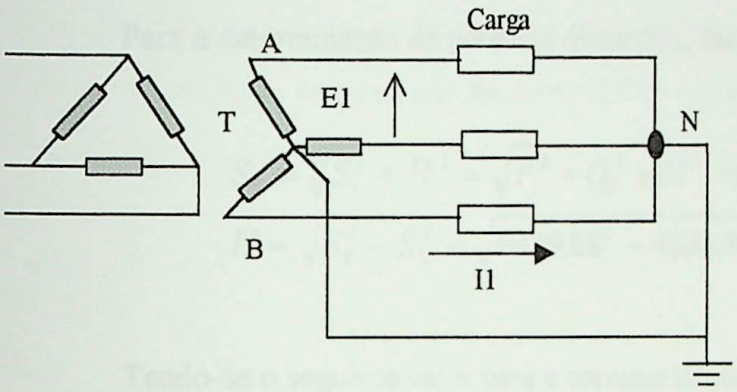


Figura 3.8 – Exemplo de Circuito com Cargas Lineares

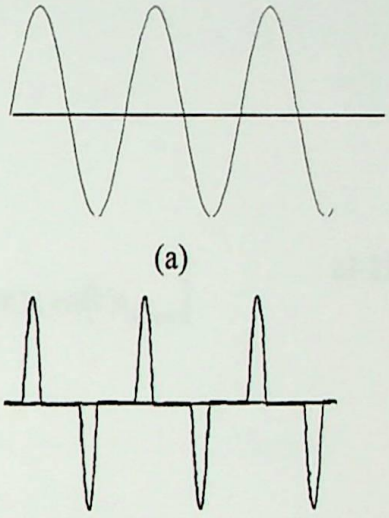


Figura 3.9 – Formas de Onda da Tensão (a) e da Corrente na Carga (b).

$E_1 = 112$ (V) $\quad I_1 = 24{,}96$ (A) $= 1$ (pu) $\quad THDi = I_h/I_1 = 99{,}55\%$

Tabela 3.14 – Características das Correntes Harmônicas.

Característica dos Harmônicos de Corrente da Carga														
Ordem	I_1	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	I_{15}	I_{17}	I_{19}	I_{21}	I_{23}	I_{25}	I_{27}
% de I_1	100	81	52	23	3	8	7	2	3	4	2	1	2	1
Fase (°)	-2	-11	-19	-31	-91	+155	+138	+102	-29	+50	-70	+138	+115	+100

Desta forma, realizou-se os cálculos necessários para a determinação da ocupação do sistema devido a esta carga.

$$I_{T(pu)} = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{1 + 0{,}9955} = 1{,}4126(pu) \qquad (3.5)$$

$$I_{T(A)} = 1{,}4126 \times 24{,}96 = 35{,}259\ (A) \qquad (3.6)$$

$$P_1 = \sqrt{3}E_1 I_1 \cos(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24{,}96 \cdot \cos(-2) = 4.839{,}03[W] \tag{3.7}$$

$$Q_1 = \sqrt{3}E_1 I_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24{,}96 \cdot \operatorname{sen}(-2) = -168{,}98[\text{VAr}] \tag{3.8}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1 + Q_1} = \sqrt{3} \cdot E_1 I_1 = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24{,}96 = 4.841{,}98[\text{VA}] \tag{3.9}$$

$$S_T = \sqrt{3} \cdot E \cdot I_T = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 35{,}259 = 6.839{,}88[\text{VA}] \tag{3.10}$$

Para a determinação da potência distorciva, faz-se:

$$\begin{aligned} &S_T = \sqrt{S_1^2 + H^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + H^2} \Rightarrow \\ &H = \sqrt{S_T^2 - S_1^2} = \sqrt{6839{,}88^2 - 4841{,}98^2} = 4831{,}06[VA_{Harm}] \end{aligned} \tag{3.11}$$

Tendo-se o seguinte valor para a corrente de neutro.

$$\begin{aligned} &I_N(\text{pu}) = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2} = 3 \cdot \sqrt{0{,}6579} = 2{,}43(\text{pu}) \\ &I_N(\text{A}) = 2{,}43 \cdot 24{,}96 = 60{,}65(\text{A}) \end{aligned} \tag{3.12}$$

Não foi levada em consideração a assimetria neste exemplo, por não existir.

3.3.2.2.1 – Custo de Ocupação do Transformador (COTraf).

No exemplo mostrado, a carga possui fator de deslocamento praticamente unitário $\cos\psi_1 = 0{,}9955$. A potência necessária ao transformador T para suprir uma carga linear com este fator de potência, seria praticamente de $S_1 \cong P_1 = 4{,}84$ [kVA].

Mas, como a carga em análise é não-linear, apresentando uma distorção harmônica $THD_i \cong 100\%$, o transformador deve ser sobredimensionado. Desta forma, o transformador deve ser de, no mínimo, 6,84 [kVA], obtendo-se desta forma um sobredimensionamento de 41,3%.

Este resultado pode ser também obtido, de forma aproximada, pela equação (2.44), apresentando um acréscimo de 40,06% sobre a potência em condições senoidais.

Para contabilizar este aumento de potência, basta saber o preço do kVA do transformador e com ele contabilizar o custo adicional devido à carga não-linear inserida no sistema.

Custo de Ocupação no Transformador

COTraf = Acréscimo de potência devido à distorção x S_1 x \$kVA + Acréscimo devido ao fator K = COTraf = ($S_T - S_1$) x (\$kVA) (3.13)

ou

COTraf = (\$kVA x Novo Trafo) – (\$kVA x Trafo sem distorção) (3.14)

(Caso haja necessidade de substituição do transformador)

3.3.2.2.2 – Custo de Ocupação dos Condutores (ou Cabos) (COCond).

Outro fato relevante visto através deste exemplo é a necessidade de sobredimensionamento do condutor de neutro e dos condutores de fase.

Conforme a NBR5410, caso a distorção harmônica de 3ª ordem seja maior do que 45%, o dimensionamento (dos condutores de fase) deve ser feito pela corrente de neutro, utilizando-se um fator de redução (conforme Tabela 2.4) igual a 1,00.

No exemplo anterior, caso não houvesse harmônicos, o condutor de neutro deveria ser dimensionado para a corrente de fase igual a 25 [A], implicando numa seção de 4mm^2.

Mas, com uma distorção de corrente harmônica de 3ª ordem igual a 81% (maior do que 45%) a norma estabelece que o dimensionamento do condutor deva ser feito através do condutor de neutro. Assim a corrente de neutro fica: $I_N = I_B.I_3.3 = 25.0,81.3 = 60,75$ [A]. Com o fator de redução fr = 1,00, vem que a corrente de projeto deva ser $I_B = I_N / 1,00 = 60,75$ [A].

Com isto, os condutores deverão ter uma capacidade de corrente de 60,75 [A], tendo portanto uma seção mínima de 16mm^2 e não mais de 4mm^2 quando sob condições não-distorcivas.

Para contabilizar esta ocupação do sistema devida ao sobredimensionamento dos condutores, duas análises podem ser adotadas:

1. A primeira pode ser feita verificado-se o custo adicional devido à substituição do condutor original (4mm^2) pelo de seção maior (16mm^2):

COCond$_N$ = custo adicional *= (\$/metro do condutor de 16mm^2) x comprimento do condutor de 16mm^2, subtraído do (\$/metro do condutor de 4mm^2) x comprimento do condutor de 4mm^2, para o condutor neutro.* *(3.15)*

COCond$_F$ = custo adicional *= (\$/metro do condutor de 16mm^2) x comprimento do condutor de 16mm^2, subtraído do (\$/metro do condutor de 4mm^2) x comprimento do condutor de 4mm^2, para o condutor de fase.* *(3.16)*

Os condutores de fase e neutro podem não ter a mesma seção, por isso o cálculo foi feito em separado.

2. A segunda seria determinar a perda de ampacidade[1] do condutor associando-a com um valor que representaria a compra de um condutor virtual de capacidade igual à da perda.

Para a determinação desta perda de ampacidade, utiliza-se o "Fator de potência equivalente de uma carga linear", visto a seguir.

"Fator de potência equivalente de uma carga linear" (Key, 1996): Representa a ocupação do sistema elétrico, considerando-se que a potência de uma carga não-linear, devida à distorção harmônica, pode ser representada pela necessidade de reativo para uma carga linear.

Assim, seja P_1=1(pu) a potência de uma carga linear ausente de reativo. Desta forma, $S_1=P_1=1(pu) \Rightarrow dFP = 1$.

Seja agora, a carga não-linear do exemplo, que apresenta 29,21% a mais de potência aparente devido à distorção harmônica. Assim, $S_2=1{,}2921S_1$. Considera-se que o aumento de 29,21% seja repassado para a potência aparente (da carga linear), implicando numa necessidade de reativo para o sistema e numa diminuição da capacidade do condutor em transmitir potência ativa.

Com isso, o fator de potência na primeira condição que era igual a 1, passa para a segunda condição (29,21% a mais de S) com:

Cos $\psi_2 = P_2 / S_2 = P_1/1{,}2921S_1 = 0{,}7739$, implicando numa perda de ampacidade do condutor de (1-0,7739): **22,6%**.

[1] Ampacidade é a capacidade de condução de corrente do condutor.

Desta forma, contabiliza-se o custo de um condutor (virtual) que possua, no mínimo, 22,6% a mais da ampacidade do condutor analisado. Neste caso, utilizar-se-ia um condutor de 1,5mm^2.

$\mathbf{COCond_V}$ = (\$/metro do condutor de 1,5 mm^2) x (comprimento deste condutor) (3.17)

Na maioria das vezes os sistemas já estão sendo utilizados. Desta forma, deve-se verificar a ampacidade de condução dos condutores existentes e compará-la com a ampacidade necessária sob as novas condições com distorção. Com isso, pode-se verificar a necessidade de substituição, ou não, dos condutores existentes pelos dimensionados sob condições distorcivas e, quantificar os custos necessários para tal substituição.

3.3.2.2.3 – Custo de Ocupação devido às perdas (COPe).

Esta consideração está relacionada com as perdas nos condutores e nos transformadores. Estas perdas consideram somente as distorções harmônicas e portanto, serão chamadas de perdas harmônicas.

As perdas harmônicas nos condutores ou cabos (P_{HC}) (Key, 1996): São calculadas pela equação (2.43). Com ela, pode-se determinar o custo relativo às perdas por efeito Joule, devido aos harmônicos, nos condutores.

Para o cálculo das perdas deve-se considerar o comprimento do cabo e a sua resistência total R_{CA}.

$$P_{HC} = \sum_{h=2}^{hmáx} I_h^2 \cdot R_h \tag{3.18}$$

Com estes dados e com o tempo de utilização do sistema, pode-se calcular o custo da perda harmônica nos condutores, dado também o preço do kWh da energia.

COPeC = P_{HC} x (tempo de utilização do sistema) x \$kWh (3.19)

A perda no condutor de neutro deve ser também levada em consideração. Para tanto, a equação que se segue relaciona esta perda com as correntes harmônicas:

$$P_{HN} = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2 + \ldots} \cdot R_N \tag{3.20}$$

onde

P_{HN} = perda harmônica trifásica para o condutor neutro;

$I_3, I_9, I_{15}, \ldots,$ = representam as harmônicas múltiplas de 3 e homopolares;

R_N = Resistência total de neutro = R_{CAN} = R_{CCN} + (acréscimo devido aos efeitos).

As perdas harmônicas nos transformadores (P_{HT}): Os transformadores apresentam perdas em vazio e em carga. As perdas aqui consideradas são devidas somente aos harmônicos. Para o cálculo desta perda, utiliza-se a equação (2.45 a 2.48).

Com a perda P_{HT} calculada, contabiliza-se o custo da energia correspondente a esta perda no período de operação do transformador e sob estas condições.

$$COPeT = P_{HT} \text{ x (tempo de operação nestas condições em horas) x (\$kWh)} \quad (3.21)$$

Desta forma, a ocupação do sistema do consumidor é refletida através das perdas nos transformadores e condutores e na necessidade de sobredimensionamento ou perda de capacidade e ampacidade respectivamente. No entanto, outras perdas podem surgir devido às condições distorcivas. Perdas em outros equipamentos, que podem ser afetados por harmônicos, como: aquecimento de motores, ressonância com banco de capacitores (usados para correção do fator de potência), atuação indevida de relés, entre outros já mencionados em capítulo anterior. Estes equipamentos podem sofrer aumento de perdas, redução de suas vidas úteis, potencial de ressonância, piora de desempenho, entre outros não contabilizados aqui.

Uma outra observação a ser feita com relação à medição do nível harmônico, é a necessidade de tratamento estatístico para se obter um valor de THDi que represente a condição média desta distorção ao longo do período de utilização do sistema. Com isto, não se incorre num erro comum de assumir uma única medida como sendo o valor presente em todas as condições de operação do sistema. Os harmônicos estão presentes nos sistemas que contenham cargas não-lineares e dependem do número de cargas ligadas ao mesmo tempo, da intensidade de corrente destas cargas, e de outros fatores já comentados no Capítulo 2. Para maiores informações sobre tratamento estatístico dos harmônicos ver (Oliveira, 1997).

3.3.2.3 – PROCEDIMENTO 3: Quantificação dos custos de algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios causados por medidas de conservação.

Quando estiver havendo algum problema no sistema elétrico de um consumidor, como: ressonância com banco de capacitores, ocasionando queima prematura dos mesmos; desligamento de processos industriais, resultando em danos e prejuízo; interferência eletromagnética em sistemas de comunicação; queima de transformadores ou condutores; entre outros, torna-se necessária a mitigação/eliminação dos distúrbios causadores destes problemas. Em específico para o exemplo anterior, a eliminação dos harmônicos existentes no sistema do consumidor. Para tanto, introduz-se o terceiro procedimento de se verificar a relação de compromisso entre a qualidade e a conservação.

Soluções de mitigação/eliminação dos distúrbios, como as apresentadas no item 2.6, podem ser adotadas. Torna-se importante comentar que estas medidas aplicam-se conforme a necessidade e característica de cada sistema e/ou tipo de distúrbio gerado. Um filtro harmônico deve ser usado quando o sistema estiver com problemas relacionados com a distorção harmônica. Já um condicionador de potência seria usado para casos onde a depressão de tensão esteja ocasionando danos ao sistema e/ou processo.

Para a implementação deste procedimento, vale ressaltar que a posição escolhida para a colocação dos filtros harmônicos é de fundamental importância, (assim como são para os bancos de capacitores para correção do fator de potência), pois reflete diretamente sobre o custo/benefício da medida.

A título de exemplo, um trabalho apresentado por Thomas Key (Key, 1996), mostrou que o potencial de economia de energia variou de US$10 a US$2101 devido à localização da medida de mitigação dos harmônicos existentes no sistema por ele analisado. A Figura 3.11 mostra o sistema estudado e a Tabela 3.15 resume estas economias para diferentes localizações dos filtros.

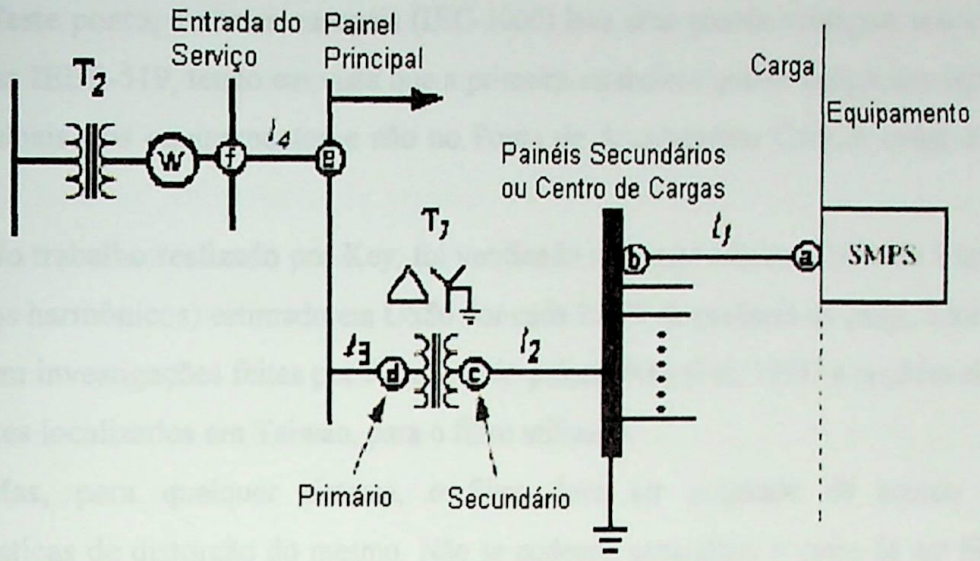


Figura 3.11 - Possíveis localizações para mitigação harmônica.

Tabela 3.15 - Potencial de energia economizada para diferentes localizações de colocação dos filtros.

Localização do Filtro	Ponto "d" Primário de T1	Ponto "c" Secundário de T1	Ponto "b" No centro de cargas	Ponto "a" Na carga
Perdas totais sem compensação (W)	8148	8148	8148	8148
Perdas totais com compensação (W)	8125	5378	4666	3346
Economia em L1 (W)	0	0	0	1320
Economia em L2 (W)	0	0	712	712
Economia em T1 (W)	0	2747	2747	2747
Economia em L3 (W)	23	23	23	23
Economia Total (W)	23	2770	3482	4802
Custo economizado por ano ($/ano)	**10**	**1213**	**1523**	**2101**

FONTE: [Key, 1996]

Verificou-se que, caso houvesse necessidade e/ou desejo de eliminação da distorção harmônica, a melhor opção de mitigação através de filtros, seria alocá-los próximo à carga (ponto **a**). Uma outra vantagem desta localização está na não ocupação do restante do sistema elétrico, diferentemente de uma localização geral, por exemplo, próximo ao transformador (pontos **c** ou **d**).

Neste ponto, a norma européia (IEC-1000) leva uma grande vantagem sobre a norma americana IEEE-519, tendo em vista que a primeira estabelece que as mitigações sejam feitas nos terminais dos equipamentos e não no Ponto de Acoplamento Comum como o caso da segunda.

No trabalho realizado por Key, foi verificado um custo adicional (devido à introdução dos filtros harmônicos) estimado em US$6 por cada 250W de potência de carga. Este custo se baseou em investigações feitas por J. Lai e pelo próprio Key (Lai, 1991) e também através de fabricantes localizados em Taiwan, para o filtro utilizado.

Mas, para qualquer sistema, o filtro deve ser projetado de acordo com as características de distorção do mesmo. Não se podendo generalizar o custo de um filtro para todas as condições. Mas sim, determinar o custo de cada um deles, incorporando-os nas análises de viabilidade das medidas de conservação e verificando-se a relação de compromisso entre a qualidade e a conservação.

Desta forma, consegue-se verificar a redução nas perdas harmônicas com a introdução dos filtros e consequentemente realizar uma análise real da redução de energia proveniente de uma medida de conservação causadora de distúrbios elétricos que possua uma medida de mitigação.

Dentre os três procedimentos de se verificar a relação de compromisso entre a qualidade da energia e a conservação de energia, o terceiro deles é a que apresenta maiores benefícios para o consumidor e atualmente também para o concessionário.

Isto porque com a mitigação do distúrbio, as perdas nos condutores e transformadores diminuirão, fazendo com que o segundo procedimento seja incorporado pelo terceiro, assim como também não existirão (ou ficarão dentro de limites estabelecidos por norma) os custos devidos aos excedentes distorcivos, comentados no primeiro procedimento.

Desta forma, o procedimento 3 incorpora os dois primeiros procedimentos. Entretanto, é o procedimento cujas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios se apresentam das mais variadas formas. Cabe portanto, realizar uma verificação dos possíveis problemas que poderão vir a existir quando da incorporação de medidas de conservação, através de medições e simulações em computador, antes que estas medidas de conservação sejam implementadas.

Ao final de cada procedimento deve-se realizar uma **ANÁLISE FINANCEIRA,** levando-se em conta a vida útil do equipamento e os custos associados sem e com a introdução do distúrbio. Esta análise financeira será exemplificada no estudo prático.

Um exemplo desta metodologia de simulação (Padaca, 1998) foi a verificação da possibilidade de ressonância harmônica em uma empresa de processamento de produtos florestais, quando ela se propôs a colocar controladores de velocidade variável (ASD's) para realizar o controle de motores de ventiladores de 100HP, em seus silos de secagem. A identificação do problema de ressonância com o banco de capacitores (usados para a correção do fator de potência) foi feita através de simulação via computador (HarmFlo, EMTP), e a solução encontrada foi a retirada do banco e a colocação de um filtro de 5° harmônico. Deste modo, a empresa obteve resultados satisfatórios com o ASD, expandindo a utilização de mais 16 ASD's em toda a empresa, de forma rápida e confiável.

A título de exemplo cita-se alguns custos devidos aos distúrbios da qualidade encontrados em algumas referências.

- Um caso real relatado na referência (JOSÉ BATISTA, 1998) mostra a perda de dois bancos de capacitores de 50 kVAr cada (representando cerca de R$15.000,00 no total, em valores de julho/95) em um prédio comercial devido aos problemas harmônicos. Cujas principais cargas eram: Lâmpadas fluorescentes; equipamentos de informática como computadores, estabilizadores de tensão, *no-breaks*; condicionadores de ar e inversores para controle da velocidade dos motores dos elevadores.
- Em um trabalho realizado por José C. Nonato (JOSÉ CÉSAR, 1998), na Região de Taguatinga (DF), se os condomínios residenciais fossem faturados pela energia reativa, o valor da fatura corresponderia a 40% do que é faturado para a energia ativa atualmente, representando uma quantia de R$20,2 mil (em valores de julho/95). E que se as unidades consumidoras corrigissem o fator de potência para 0,92, seriam liberados para o sistema 29% da potência necessária para atendê-las (cerca de 223kVA). Sendo o custo dos capacitores, necessários para tal correção, pagos com vantagem num tempo de retorno de quatro meses. As principais cargas do condomínio eram: motores de elevadores, bombas d'água e lâmpadas fluorescentes.

A tabela 3.16 mostra um resumo dos 3 PROCEDIMENTOS discutidos anteriormente, relacionando algumas vantagens e desvantagens para os mesmos.

Tabela 3.16 - Procedimentos para Avaliação da Relação de Compromisso entre a Conservação de Energia e a Qualidade de Energia Elétrica.

PROCEDIMENTOS	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS / DESVANTAGENS
1 - Custo de Fornecimento	Fornece uma base de comparação entre o custo de fornecimento atual (sem distorção) com o custo de fornecimento cobrando a distorção. Baseado na Nova definição de Potência e na Nova Proposta Tarifária.	**Vantagem:** Dá uma boa noção do aumento do custo de fornecimento devido às distorções. **Desvantagem:** Por ainda não existir legislação adequada para se cobrar tal excedente distorcivo, não ficam "obrigados" os consumidores a diminuírem tais distorções.
2 – Ocupação e Perdas do Sistema	Oferece uma possibilidade de se quantificar e contabilizar a perda de capacidade e ampacidade de transformadores e cabos, respectivamente, e também o aumento das perdas que surgem nos mesmos, devido à distorção (harmônica, no exemplo tratado).	**Vantagem:** O custo das perdas, devido às distorções, pode ser incorporado nas análises de investimento, para a determinação real do benefício de uma medida de conservação. **Desvantagem:** O custo (virtual) da ocupação do sistema, pode, ou não, ser introduzido na análise de investimento. Dependendo da condição de carregamento dos equipamentos (transformadores e condutores) ou da necessidade de ampliação de carga.
3 – Medidas de Mitigação e/ou Eliminação dos Distúrbios	Apresenta-se como solução para mitigar ou eliminar os distúrbios. Deve ser usada quando o sistema elétrico estiver com problemas de distorção (Harmônica ou Assimétrica). É o procedimento que engloba as vantagens dos dois procedimento anteriores.	**Vantagem:** Reduz os desperdícios oriundos das distorções. Diminui a ocupação de transformadores e condutores. Minimiza outras perdas envolvidas com as distorções. Os seus custo e consumo devem ser incorporados nas análises de viabilidade econômica das medidas de conservação. **Desvantagem:** Necessita de medição ou simulação anterior à implantação de medidas de conservação que tenham potencial de piorar a qualidade. Nem sempre são adotadas por consumidores, que, a princípio não estão tendo danos ou prejuízos. Depende de uma análise técnica mais detalhada do sistema para avaliar a possibilidade de maiores problemas, como: queima de bancos de capacitores, parada de processos, erros instrumentais, falhas em proteção, etc.

3.3.3 – SEQUÊNCIA DE PASSOS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este item resume de forma simplificada as seqüências de passos para aplicação da metodologia desenvolvida.

Anteriormente à aplicação da metodologia, deve-se realizar uma medição das grandezas elétricas do sistema em análise, atentando-se para o problema da localização da medição do conteúdo harmônico, discutida no item 3.2. Deve-se determinar as características físicas do sistema, entre outros dados, listados a seguir:

3.3.3.1 - Grandezas que devem ser medidas, calculadas ou adotadas para os pontos de análise:

Genéricas:

1. Freqüência de operação do sistema: f [Hz] (medida)
2. Tensão fundamental no ponto de medição: V_1 [Volts] (medida);
3. Corrente fundamental no ponto de medição: I_1 [A] (medida);
4. Espectro (ordem) e intensidade das correntes harmônicas I_h: [A] (medida);
5. Corrente rms total: I_T [A] (medida/calculada);
6. Corrente de neutro: I_N (calculada/medida);
7. Fator de deslocamento dFP entre a tensão e a corrente fundamentais (calculado);
8. Potências ativa, reativa e aparente fundamentais: P_1 [W], Q_1 [VAr], S_1 [VA];
9. Potência aparente total: S_T [VA]; (medida/calculada);
10. Potência de distorção harmônica: H [VAr_{Harm}] (calculada);
11. Fator de potência real FP (calculado/medido);
12. Distorção harmônica total de corrente: THDi [%] (calculada - IEEE);
13. Distorção harmônica total de corrente de referência: THDiR [%] (adotada por ainda não ser consenso entre especialistas);

Transformador:

14. Tipo de conexão do transformador: Estrela-Δ, Estrela-Estrela, Δ-Δ, Δ-Estrela, etc.
15. Potência total do transformador em análise: S [kVA ou MVA] (dado de placa);
16. Tensão e correntes nominais do transformador para ambos os lados: V [V], I [A] (dados de placa);
17. Material de que são feitos os condutores da bobina do transformador. cobre, outros (fabricante);
18. Bitola dos condutores das bobinas do transformador: B [mm^2] (fabricante);
19. Resistência da bobina do transformador a corrente contínua, secundário ou primário (depende do ponto de análise), R_{CCT} [Ω] (medido ou através do fabricante);
20. Perda por Foucault na freqüência de operação do sistema P_{EC-1} [W] (medido através de ensaio ou obtido através do fabricante);
21. Para se eliminar (14) e (15), pode-se estimar as perdas por efeito Joule em operação nas condições em análise: P_R [W] (estimada/medida/calculada);
22. Fator *K* do transformador: *K* [admensional] (calculado);
23. Perdas adicionais no transformador: P_{ST} [W] (estimada/medida/calculada);
24. Preço do kVA do transformador: [R$] (fabricante);

Cabos:

25. Material do cabo analisado: cobre, alumínio, outros;
26. Seção nominal do cabo analisado: [mm^2] (medido ou fabricante);
27. Diâmetro do cabo: [mm] (medido ou fabricante);
28. Resistência do cabo à corrente contínua a 20°C: R_{CC20} [Ω] (tabela do fabricante);
29. Coeficiente de temperatura do material do cabo a 20°C: α_{20} (fabricante);
30. Temperatura máxima de operação dos cabos: θ_C [°C] (tabela de fabricante);
31. Coeficientes K_S e K_P para os efeitos pelicular e proximidade: (fabricante);
32. Resistência elétrica do cabo nas mais variadas freqüências: R_h [Ω] (tabela do fabricante);
33. Capacidade de condução de corrente do cabo: [A] (tabela do fabricante);
34. Preço do metro do cabo em análise: [R$/m] (fabricante);

Outros:

35. Preço do kWh da energia: $kWh [R$];
36. Tempo de operação do sistema nas condições analisadas durante um ano: t [horas] (estimado/medido);
37. Quantidade de energia consumida no tempo de operação: [kWh];
38. Vida útil do equipamento utilizado na medida de conservação.

3.3.3.2 - PROCEDIMENTO 1: Aplicável em todos os casos em que houver distorção de corrente no ponto de análise.

Calcula-se o custo de fornecimento sem considerar a distorção harmônica e logo após, considerando-a.

3.3.3.3 - PROCEDIMENTO 2:

Calcula-se o acréscimo de potência necessária ao transformador devido ao fator K e à potência harmônica.

Calcula-se a perda de ampacidade dos cabos.

Calcula-se a perda Joule no transformador e no cabo.

Contabiliza-se esta ocupação e esta perda, tanto para o transformador como para o cabo.

3.3.3.4 - PROCEDIMENTO 3:

Determina-se o custo máximo de uma medida de mitigação. Neste procedimento, relaciona-se a medida de conservação com a qualidade da energia elétrica.

Por fim, compara-se os três procedimentos.

CAPÍTULO 4

ESTUDO PRÁTICO PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA

4 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo será analisado um exemplo para a verificação da relação de compromisso entre a conservação e a qualidade da energia elétrica.

O estudo mostra, através de uma medida de conservação, a aplicação da metodologia desenvolvida utilizando os seus três procedimentos.

O objetivo é demonstrar que a medida de conservação adotada pode implicar em perda de qualidade e redução na economia proposta para o consumidor, assim como também redução no faturamento da concessionária.

4.1 – Estudo Prático: Utilização de um Variador de Potência para Controlar a Temperatura da Água de um Chuveiro Elétrico.

A Tabela 1.1 (Capítulo 1) mostra que o uso final de eletricidade no setor residencial devido ao aquecimento de água é de 26%. De todos os usos, este é o que mais contribui para a ponta de carga residencial diária.

O PROCEL estima que, na média nacional, 67,6% das residências possuem chuveiros elétricos. Essa taxa varia na região sul (88%), sudeste (83%), centro-oeste (73%), nordeste (16%) e norte (8%).

A Companhia Energética de Minas Gerais S.A. [Cemig, 1993], calcula que a demanda média do chuveiro no horário de pico, entre as 18horas e 19horas, corresponde a 8,5% da demanda de ponta do sistema.

A conservação de energia no uso do chuveiro pode ser feita por um variador de potência (ver Anexo F), através de um sistema de disparo que controla o valor eficaz da tensão aplicada à sua resistência de dissipação, utilizando-se de conversores CA/CA. Desta forma aumenta-se a faixa de temperatura para o banho (além das duas atuais Verão e Inverno), possibilitando ainda um aumento do conforto para o usuário e também um consumo mais eficiente de energia, tendo em vista as variações de temperatura das mais diversas regiões do país. Assim, seriam necessários 2,8kW no Norte-Nordeste, 3,6kW no Centro-Oeste, 3,9kW no Sudeste e 4,9kW no Sul [Jardini, 1996]. Dessa forma, o usuário poderia escolher o nível de potência em função da vazão e da temperatura da água fria. Um estudo estima que, com essa medida, a demanda total do país poderia ser reduzida em até 20% [Geller et. Alli, 1996].

Outras vantagens do controlador seriam a economia de água, acréscimo na vida útil do chuveiro e eliminação de riscos de choques elétricos.

Assim, este estudo prático considera um chuveiro elétrico, disponível no comércio, munido de controle de temperatura através da variação do valor eficaz da tensão pela variação do ângulo de disparo de um TRIAC – *"TRIode AC swich"*[1].

Os lados do circuito em análise (lados A e B) representam as medições das grandezas elétricas, feitas pelo analisador de redes da marca Circutor, conforme demonstra a Figura 4.1.

---

[1] A variação da intensidade do valor rms da tensão na carga também é feito por *dimmers* para a variação da intensidade luminosa.

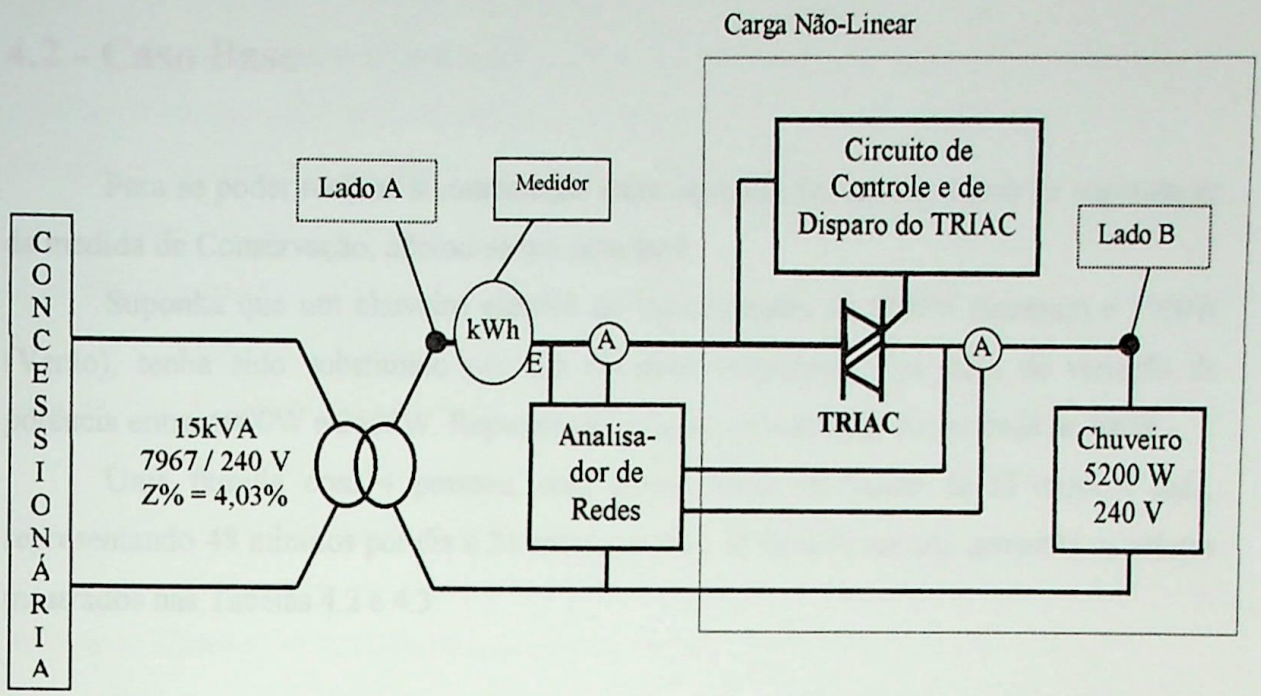


Figura 4.1 - Circuito de Teste para Verificação da Relação Conservação / Qualidade.

Para o teste, foram consideradas as potências na carga resistiva de 2,6kW, 2,8kW, 3,6kW, 3,9kW, 4,4kW e 4,9kW. Outros pontos foram medidos e podem ser encontrados no Anexo D.

Nestas condições, foram levantadas as grandezas elétricas e dados adicionais, indicados na Tabela 4.1, para posteriormente se aplicar os procedimentos da metodologia desenvolvida. O Anexo E mostra as formas de onda de tensão (do lado B) e corrente (lados A e B) na carga nas respectivas potências consideradas.

Tabela 4.1 – Alguns pontos retirados do Anexo D, representativos da medição realizada.

Potência (W) Lado B	**I_1 (A)**	**I_{rms} (A)**	**E_1 (V) Lado B**	**E_{rms} (V) Lado B**	**S_T (VA) Lado A**	**THD_I (%) IEEE**	**I_H (% de I_1) $= \sqrt{(\Sigma I_h^2)}$**
2623,00	13,323	15,615	143	168	3731,99	58,55	58,55
2892,00	14,32	16,47	151	175	3935,85	57,29	57,29
3565,00	16,93	18,26	181	195	4364,16	44,65	44,65
3901,00	17,24	19,03	185	204	4547,69	44,40	44,40
4389,00	19,14	20,24	205	217	4812,74	33,28	33,28
4877,00	20,64	21,16	222	229	5057,48	23,93	23,93

4.2 - Caso Base

Para se poder realizar a comparação entre os resultados antes e depois da implantação da medida de Conservação, adotou-se um caso base.

Suponha que um chuveiro elétrico de duas posições de 5200W (Inverno) e 2900W (Verão), tenha sido substituído por um chuveiro controlável com faixa de variação de potência entre 4900W e 2600W. Representando assim uma redução de demanda de 300W.

Uma família com 4 pessoas, com tempo médio de banho de 12 minutos cada, representando 48 minutos por dia e 24 horas por mês, ao final de um ano apresenta os valores mostrados nas Tabelas 4.2 e 4.3:

Tabela 4.2 - Condição de Consumo Antes da adoção da Medida de Conservação

Estação do Ano	Quantidade de meses no Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Consumo de Energia (kWh/ano)	Custo da Energia no período (R$)[2]
Verão	8	192	2900,00	556,8	105,79
Inverno	4	96	5200,00	499,2	94,85
Total	12	288	----	1056,0	200,64

Tabela 4.3 - Condição de Consumo Após a adoção da Medida de Conservação

Estação do Ano	Quantidade de meses no Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Consumo de Energia (kWh/ano)	Custo da Energia no período (R$)
Verão	8	192	2600	499,2	94,85
Inverno	4	96	4900	470,4	89,38
Total	12	288	----	969,6	184,23

Diferença entre as condições antes e depois da implantação da medida de conservação:

Tabela 4.4 - Resultados da Medida de Conservação.

	Para o consumidor	Para a concessionária
Economia no custo da Energia	R$ 16,41	----[3]
Liberação da capacidade do sistema ou redução de demanda	300 W	300 W

[2] Para o cálculo do custo, considerou-se uma tarifa residencial de R$0,190 o kWh de energia (Cemig, 1998).
[3] Considerou-se aqui que a concessionária venderá esta energia liberada para outra família.

Com esta análise comparativa entre o que era consumido antes da implantação da medida de conservação, com os resultados posteriores à mesma, verifica-se que o consumidor tem um ganho devido à redução no consumo de R$16,41 no ano.[4]

A análise anterior é feita de forma a não considerar os problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica. Desta forma, cabe-nos algumas perguntas:

1) Quanto será que este consumidor pagaria pelo seu "real" consumo caso existisse uma legislação que cobrasse a distorção harmônica de corrente em residências?

2) Será que a economia previamente calculada compensariam as perdas envolvidas nessa medida de conservação (devido à distorção harmônica)?

3) Qual será a economia real caso seja necessária uma medida de mitigação/eliminação da distorção gerada pela medida de conservação adotada?

Para que estas perguntas possam ser respondidas, deve-se primeiramente realizar uma análise na medida de conservação, verificando-se o distúrbio da qualidade da energia associado, para posteriormente quantificá-lo e contabilizá-lo. Para isto, aplica-se a metodologia de verificação da relação de compromisso entre a qualidade da energia e a conservação de energia elétrica desenvolvida no capítulo 3.

4.3 - Aplicação da Metodologia de Verificação da Relação de Compromisso entre a Qualidade da Energia e a Conservação de Energia Elétrica.

Para a aplicação da Metodologia, escolheu-se dois pontos da medição (ver Anexo D):

Tabela 4.5 - Pontos de Análise para Aplicação da Metodologia.

Pontos	Potência na Carga Lado (B) (W)	I_1 (A)	$I_{rms} = I_T$ (A)	$E_1 = E_{rms}$ Lado A (V)	E_1 Lado B (V)	E_{rms} Lado B (V)	dFP Lado A	S_T Lado A (VA)	THD_I IEEE (%)	I_H (% I_1) $=\sqrt{(\Sigma I_h^2)}$
1	2623,00	13,323	15,615	239	143	168	0,853	3731,99	58,55	58,55
2	4877,00	20,640	21,161	239	222	229	0,996	5057,48	23,93	23,93

[4] O objetivo deste caso base não está relacionado com o montante do valor economizado pelo consumidor, mas sim na determinação do valor real da economia, levando-se em conta a distorção harmônica gerada pela medida de conservação.

Estes pontos foram escolhidos para simular as posições verão/inverno de um chuveiro de duas posições. Com isso, será quantificado através da metodologia o consumo/custo real devido ao uso de um chuveiro controlável, comparando-o com o chuveiro comum (sem controle) de duas posições (Inverno/Verão).

A questão principal para se aplicação da metodologia é: ***"Quanto será o custo da Qualidade da Energia Elétrica que está associada com essa medida de Conservação de Energia que é o chuveiro elétrico controlável, e qual a verdadeira economia?"***

Desta forma, segue-se os passos do item 3.3.3 do capítulo 3, para os pontos 1 e 2 em análise, (ambos para o **lado A** do sistema):

Genérico

1. Freqüência de operação do sistema:

   $f = 60$ [Hz]

2. Tensão fundamental: para os ponto 1 e 2 no lado A da medição:

   Ponto1 = Ponto2 = $E_{11} = E_{12} = 239$ [V]

3. Corrente fundamental no lado da medição A:

   Ponto1: $I_{11} = 13{,}323$ [A]

   Ponto2: $I_{12} = 20{,}640$ [A]

4. Espectro (ordem) e intensidade das correntes harmônicas: Ver Anexo E

5. Corrente rms total: Ponto1: $I_{rms1} = 15{,}615$ [A]

   Ponto2: $I_{rms2} = 21{,}161$ [A]

6. Corrente de neutro: I_N (calculada/medida): Não existe, pois o circuito é monofásico.

7. Fator de deslocamento dFP entre a tensão e a corrente fundamentais:

   Ponto1: $\cos(\varphi_{11}) = dFP_{11} = 0{,}853$

   Ponto2: $\cos(\varphi_{12}) = dFP_{12} = 0{,}996$

8. Potências ativa, reativa e aparente fundamentais:

   Ponto1: $P_{11} = E_{11}\, I_{11} \cos(\varphi_{11}) = 239x13{,}323x0{,}853 = 2716{,}12$ [W]

   Ponto2: $P_{12} = E_{12}\, I_{12} \cos(\varphi_{12}) = 239x20{,}640x0{,}996 = 4913{,}23$ [W]

   Ponto1: $Q_{11} = E_{11}\, I_{11}\, sen(\varphi_{11}) = 1659{,}95$ [VAr]

   Ponto2: $Q_{12} = E_{12}\, I_{12}\, sen(\varphi_{12}) = -\,432{,}51$ [VAr]

   Ponto1: $S_{11} = \sqrt{(P_{11}^2 + Q_{11}^2)} = 3183{,}20$ [VA]

   Ponto2: $S_{12} = \sqrt{(P_{12}^2 + Q_{12}^2)} = 4932{,}23$ [VA]

9. Potência aparente total:

Ponto1: $S_{T1} = E_{rms11} I_{rms11} = 239 \times 15,615 = 3731,99$ [VA]

Ponto2: $S_{T2} = E_{rms12} I_{rms12} = 239 \times 21,161 = 5057,48$ [VA]

10. Potência de distorção harmônica:

Ponto 1: $H_1 = \sqrt{(S_{T1}^2 - S_{11}^2)} = \sqrt{(3731,99^2 - 3183,20^2)} = 1948,07$ [VAr_{Harm}]

Ponto 2: $H_2 = \sqrt{(S_{T2}^2 - S_{12}^2)} = \sqrt{(5057,48^2 - 4932,23^2)} = 1118,58$ [VAr_{Harm}]

11. Fator de potência real FP:

Ponto 1: $FP_1 = P_{11} / S_{T1} = 2716,12 / 3731,99 = 0,728$

Ponto 2: $FP_2 = P_{12} / S_{T2} = 4913,23 / 5057,48 = 0, 971$

12. Distorção Harmônica Total de corrente (IEEE-519):

Ponto 1: $THDi_1$ [%] $= \sqrt{(\Sigma (I_{h1}^2))} / I_{11} = 58,55$ %

Ponto 12 $THDi_2$ [%] $= \sqrt{(\Sigma (I_{h2}^2))} / I_{12} = 23,93$ %

13. Distorção Harmônica Total de corrente de Referência:

THDiR [%] = 20 % (adotada)

Transformador

14. Tipo de conexão do transformador: Monofásico – Fase – Neutro

15. Potência total do transformador em análise:

S = 15 [kVA]

16. Tensão e correntes nominais do transformador para ambos os lados:

V = Primário / Secundário = 7967 / 240 [V]

I = Primário / Secundário = 1,88 / 62,5 [A]

17. Material de que são feitos os condutores da bobina do transformador. ---

18. Bitola dos condutores das bobinas do transformador: ---

19. Resistência da bobina do transformador a corrente contínua (a 20°C):

Primário: $R_{CCT} = 70,2$ [Ω]

Secundário: $R_{CCT} = 3,19$ [Ω]

20. Perda por Foucault na freqüência de operação do sistema (ensaio a vazio):

P_{EC-1} [W] = 67 [W]

21. Perdas por efeito Joule em condições nominais (ensaio de curto-circuito):

$P_J = 368$ [W] – I = 62,5 [A]

Ponto1: $P_{CC1} = 16,77$ [W] - $I_1 = 13,323$ [A]

Ponto2: $P_{CC2} = 40,26$ [W] - $I_1 = 20,640$ [A]

Perdas no transformador para outros valores de potência considerados:

$P = 2900,00W - P_{CC2900} = 13,80$ [W]

$P = 5200,00W - P_{CC5200} = 44,37$ [W]

22. Fator *K* do transformador:

Ponto 1: $k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \cdot \sum h^{1,6} \cdot I_h^2}} = 0,89$

Ponto 2: $k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \cdot \sum h^{1,6} \cdot I_h^2}} = 0,96$

23. Perdas adicionais no transformador: incluída nas perdas por efeito Joule (P_J) do passo 21.

24. Preço do kVA do transformador:

R$ 20,00 / kVA (fabricante)

Cabo

25. a 34. Dados desconsiderados para a análise realizada devido ao baixíssimo comprimento de cabo (1,5 metros).

Outros

35. Preço da tarifa do kWh da energia:

TC = R$0,190 o kWh (tarifa residencial Cemig).

36. Tempo de operação do sistema nas condições analisadas durante um ano:

Ponto 1: 192 [horas/ano]

Ponto 2: 96 [horas/ano]

37. Energia consumida no período:

Ponto 1: P_{11} x 192 = 2716,12 x 192 = 521,50 [kWh]

Ponto 2: P_{12} x 96 = 4913,23 x 96 = 471,67 [kWh]

38. Vida útil do equipamento utilizado pela medida de conservação (anos):

Vida Útil = 5 anos

39. Custo do equipamento da medida de conservação (controlador de potência)[5]:

R$ = 12,00

---

[5] Pesquisa feita diretamente com o fabricante mostrou que o controlador de potência para chuveiro sai por volta de R$12,00 (preço de revenda). Informações obtidas em [Polibol, 1998 – Internet: http:\\\www.medianeira.com.br].

4.3.1 - APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DA METODOLOGIA

4.3.1.1 - PROCEDIMENTO 1: Comparação entre o custo de fornecimento sob condições distorcivas e não distorcivas.

4.3.1.1.1 - Custo de Fornecimento sem distorção: Observa-se que a parcela devido ao excedente reativo não é aplicada pelo fato de estarmos tratando com um consumidor residencial.

Ponto 1: $\text{Custo de Fornecimento1} = A = kWh \cdot TC = 521{,}50 \cdot 0{,}190 = R\$99{,}08$

Ponto 2: $\text{Custo de Fornecimento2} = A = kWh \cdot TC = 471{,}67 \cdot 0{,}190 = R\$89{,}62$

Custo Total = Custo de Fornecimento1 + Custo de Fornecimento2 = R$188,70

4.3.1.1.2 - Custo de Fornecimento com distorção:

Ponto 1:

$$\text{Custo de Fornecimento1D} = A \cdot \left(1 + \left(\sqrt{\frac{1+THDi_1^{\,2}}{1+THD_i R^2}} - 1\right)\right) = 99{,}08 \cdot \left(\sqrt{\frac{1+0{,}5855^2}{1+0{,}20^2}}\right) = R\$112{,}58$$

Ponto 2:

$$\text{Custo de Fornecimento2D} = A \cdot \left(1 + \left(\sqrt{\frac{1+THDi_2^{\,2}}{1+THD_i R^2}} - 1\right)\right) = 89{,}62 \cdot \left(\sqrt{\frac{1+0{,}2393^2}{1+0{,}20^2}}\right) = R\$90{,}36$$

Custo Total D = Custo de Fornecimento1D + Custo de Fornecimento2D = R$202,94

Logo, observa-se que houve um acréscimo no custo de fornecimento (devido à distorção harmônica de corrente) do chuveiro controlável de:

Ponto 1: (R$112,58 – R$99,08) / R$99,08 = 13,63%

Ponto 2: (R$90,36 – R$89,62) / R$89,62 = 0,83%

4.3.1.1.3 - ANÁLISE FINANCEIRA PARA O PROCEDIMENTO 1:

Comparativamente ao caso base, a utilização do chuveiro controlável proporcionaria uma mudança no consumo de:

Tabela 4.6 - Condição de consumo antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 1 **sem a cobrança da distorção harmônica**.

	Estação do Ano	Quantidade de meses no Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema Lado A (W)	Consumo de Energia (kWh/ano)	Custo da Energia no período (R$)
Antes da Medida	Verão	8	192	2900,00	2900,00	556,80	105,79
	Inverno	4	96	5200,00	5200,00	499,20	94,85
	Total	12	288	----	----	1056,0	200,64
Depois da Medida	Verão	8	192	2623,00	2716,12	521,50	99,08
	Inverno	4	96	4877,00	4913,23	471,67	89,62
	Total	12	288	----	----	993,17	188,70

Tabela 4.7 - Resultados da medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1, **sem a cobrança da distorção harmônica**.

	Para o Consumidor	Para a Concessionária
Economia no Custo da Energia	R$ 11,94	----
Liberação da Capacidade do Sistema $(5200,00 - S_{12}) = (5200,00 - 4913,23)$	286,77 W	286,77 W

Verifica-se portanto que com a introdução da medida de conservação de energia, através do uso do chuveiro controlável, o custo do consumo de energia para o consumidor diminuiu em R$11,94 no período considerado.

Houve também uma liberação do sistema de 286,77W, que antes da medida trabalhava com 5200,00W e após, passou para 4913,23W. Para a concessionária, o sistema foi liberado em 286,77W. Mas, em contrapartida, houve um aumento de reativo no sistema, em 1659,95VAr.

Caso a distorção harmônica seja cobrada, os novos valores ficariam (ver Tabela 4.8):

Tabela 4.8 - Condição de Consumo Antes e Após a Medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1 **com a cobrança da distorção harmônica**.

	Estação do Ano	Quantidade de meses no Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema (W)	Consumo de Energia (kWh/ano)	Distorção Harmônica Inserida THDi (%)	Custo da Energia no período (RS)
Antes da Medida	Verão	8	192	2900,00	2900,00	556,80	0	105,79
	Inverno	4	96	5200,00	5200,00	499,20	0	94,85
	Total	12	288	----	----	1056,0	----	200,64
Depois da Medida	Verão	8	192	2623,00	2716,12	521,50	58,55	112,58
	Inverno	4	96	4877,00	4913,23	471,67	23,93	90,36
	Total	12	288	----	----	993,17	----	202,94

Tabela 4.9 - Resultados da medida de Conservação baseada no PROCEDIMENTO 1, **com a cobrança da distorção harmônica**.

	Para o Consumidor	Para a Concessionária
Economia no Custo da Energia	R$ -2,30	----
Liberação da Capacidade do Sistema $(5200,00 - S_{T2}) = (5200,00 - 5057,48)$	142,52 VA	142,52 VA

Sendo que destes R$202,94 cobrados do consumidor, a quantia de (R$202,94 – R$188,70 (Tabela 4.6)) R$14,24 se refere somente ao custo da distorção harmônica baseada na nova definição de potência.

Verifica-se portanto que com a introdução da medida de conservação de energia, através do uso do chuveiro controlável, o custo do consumo de energia para o consumidor aumentou, tendo em vista a baixa qualidade do controlador utilizado, que para fornecer 4877,00W de potência na carga resistiva, consome do sistema 5057,48 VA. Diferença esta devida às perdas, necessidade de reativo e distorções harmônicas geradas pela carga não linear.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

4.3.1.2 - PROCEDIMENTO 2: QUANTIFICAÇÃO E CONTABILIZAÇÃO DA OCUPAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO E DE SUAS PERDAS.

CUSTO DE OCUPAÇÃO

4.3.1.2.1 - Custo de Ocupação devido ao Transformador

Serão contabilizados dois acréscimos de potência para o transformador. O primeiro devido ao aquecimento harmônico, calculado pelo fator *K* e o segundo devido à ocupação de uma potência harmônica (H).

Potência aparente fundamental da medição (lado A):

Ponto 1: $S_{11} = 3183{,}20$ [VA]

Ponto 2: $S_{12} = 4932{,}23$ [VA]

Potência Total da medição:

Ponto 1: $S_{T1} = 3731{,}99$ (VA)

Ponto 2: $S_{T2} = 5057{,}48$ (VA)

Acréscimo de potência necessário ao transformador, devido à potência harmônica:

Ponto 1: $S_{T1} - S_{11} = 548{,}79$ (VA)

Ponto 2: $S_{T2} - S_{12} = 125{,}25$ (VA)

Acréscimo de potência necessário ao transformador, devido ao aquecimento provocado pelos harmônicos (fator *K*):

Ponto 1: $S_{11}/K_1 - S_{11} = 393{,}43$ (VA)

Ponto 2: $S_{12}/K_2 - S_{12} = 205{,}51$ (VA)

Acréscimo de ocupação de potência do transformador considerando-se a potência harmônica e o aquecimento (fator *K*):

Ponto 1: $S_{Traf1} = 548{,}79 + 393{,}43 = 942{,}22$ [VA]

Ponto 2: $S_{Traf2} = 125{,}25 + 205{,}51 = 330{,}76$ [VA]

Nova potência necessária ao transformador com os acréscimos:

Ponto 1: $S_{TrafT1} = 3183{,}20 + 942{,}22 = 4674{,}21$ [VA]

Ponto 2: $S_{TrafT2} = 4932{,}23 + 330{,}76 = 5262{,}99$ [VA]

Necessidade de substituição do transformador:

Transformador antes da medida: 15kVA com carga de 5200,00W

Transformador após a medida (pior caso – ponto 2): 15kVA com carga de 5262,99 [VA]

Neste exemplo, não existe necessidade de substituição do transformador. Mas, caso houvesse, o custo da substituição deveria ser incorporado ao custo de ocupação do mesmo.

Custo de ocupação devido ao transformador :

$$COTraf = (S_{TrafT2} - S_{12}) \times \$kVA = (5{,}26299 - 4{,}93223) \times 20 = R\$\ 6{,}62$$

Para o cálculo do custo de ocupação do transformador, considerou-se o pior caso, ou seja, o ponto de maior potência aparente.

4.3.1.2.2 - Custo de Ocupação devido ao Condutor ou Cabo:

Como a experiência em análise desconsiderou o comprimento do cabo, este custo não foi calculado.

CUSTO DE OCUPAÇÃO DEVIDO ÀS PERDAS:

4.3.1.2.3 - O custo das perdas harmônicas no transformador (COPeT):

Perdas Joule:

Ponto 1:

$$P_{R1} = \sum_{h=1}^{hmáx} I_h^2 R_h = (R \cdot I_{11}) \cdot \sum_{h=1}^{hmáx} I_h^2 = P_{CC1} \cdot \left(1 + (I_{H1})^2\right) = 16{,}77 \cdot \left(1 + 0{,}5855^2\right) = 22{,}52[W]$$

Ponto 2:

$$P_{R2} = \sum_{h=1}^{hmáx} I_h^2 R_h = (R \cdot I_{12}) \cdot \sum_{h=1}^{hmáx} I_h^2 = P_{CC2} \cdot \left(1 + (I_{H2})^2\right) = 40{,}26 \cdot \left(1 + 0{,}2393^2\right) = 42{,}57[W]$$

Perdas devidas à Foucault[6]:

Ponto1:

$$P_{EC1} = P_{EC-1} \cdot \sum_{h=1}^{h\max} I_h^2 h^2 = 67 \cdot \left(\begin{array}{l} 1 + 0{,}482^2 \cdot 2^2 + 0{,}1133^2 \cdot 3^2 + 0{,}1152^2 \cdot 4^2 + 0{,}1873^2 \cdot 5^2 + \\ + 0{,}128^2 \cdot 6^2 + 0{,}0444^2 \cdot 7^2 \end{array} \right) =$$

$$= 67 \cdot (1 + 2{,}82) = 255{,}94[W]$$

---

[6] Observação: $h_{max} = 7$.

Ponto2:

$$P_{EC2} = P_{EC-1} \cdot \sum_{h=1}^{h\max} I_h^2 h^2 = 67 \cdot \left(\begin{array}{l} 1 + 0{,}0665^2 \cdot 2^2 + 0{,}162^2 \cdot 3^2 + 0{,}0625^2 \cdot 4^2 + 0{,}0961^2 \cdot 5^2 + \\ + 0{,}0588^2 \cdot 6^2 + 0{,}0473^2 \cdot 7^2 \end{array} \right) =$$

$$= 67 \cdot (1 + 0{,}78) = 119{,}26 [W]$$

Assim, a perda harmônica total no transformador será: $P_{HT} = P_R + P_{EC}$

Ponto 1: $P_{HT1} = P_{R1} + P_{EC1} = 22{,}52 + 255{,}94 = 278{,}46$ [W]

Ponto 2: $P_{HT2} = P_{R2} + P_{EC2} = 42{,}57 + 119{,}26 = 161{,}83$ [W]

E o custo devido a estas perdas no transformador, fica:

COPeT = P_{HT} x (tempo de operação nestas condições) x ($kWh)

Ponto 1: $COPeT_1 = 278{,}46 \times 192 \times 0{,}190 = R\$10{,}16$

Ponto 2: $COPeT_2 = 161{,}83 \times 96 \times 0{,}190 = R\$2{,}95$

4.3.1.2.4 - O Custo das perdas harmônicas no condutor ou cabo (COPeC). Estas perdas não foram calculadas, por não ter sido considerado o comprimento do cabo.

4.3.1.2.5 - ANÁLISE FINANCEIRA DO PROCEDIMENTO 2:

Ao contrário do custo de ocupação do transformador, o custo (de ocupação) devido às perdas harmônicas sempre devem ser consideradas. A questão principal está em verificar de que lado o medidor de energia (kWh) está inserido. Caso esteja do lado da concessionária, o consumidor pagaria por estas perdas (Figura 4.2).

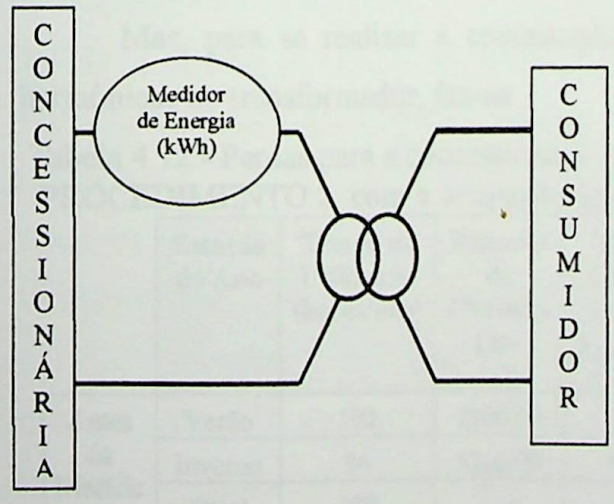


Figura 4.2 - Perdas no transformador contabilizadas para o consumidor.

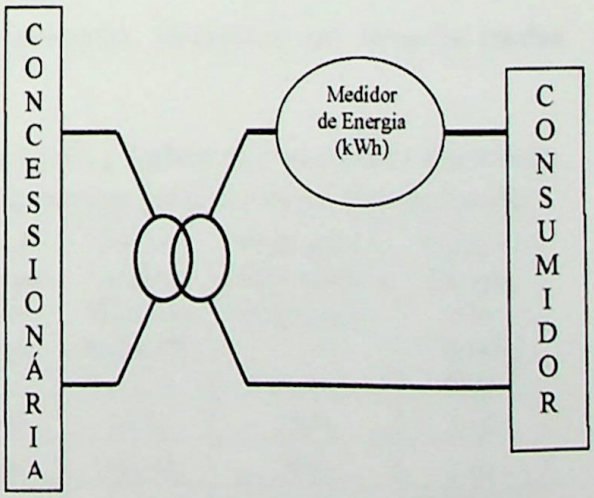


Figura 4.3 - Perdas no transformador contabilizadas para a concessionária.

Mas, caso o medidor de energia esteja no secundário do transformador (Figura 4.3), estas perdas seriam contabilizadas para a concessionária. Da forma como está no exemplo, a concessionária terá que assumir o custo desta perda, pois sua tarifa (média) de energia é fixa, não podendo desta forma, distribuir este custo para os consumidores.

Assim, fez-se a comparação entre o caso base com e sem a inclusão das perdas. Contabilizou-se essas perdas para a concessionária, tendo em vista a topologia do caso base.

Tabela 4.10 - Perdas para a concessionária, antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 2, **sem a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador**.

	Estação do Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema (W) Lado A	Perdas Totais no Transform a-dor (W)	Perdas para a Concessionári a (kWh/ano)	Custo da Energia não Faturada (RS)
Antes da Medida	Verão	192	2900,00	2900,00	80,80	15,51	2,95
	Inverno	96	5200,00	5200,00	111,37	10,69	2,03
	Total	288	----	----	----	26,20	4,98
Depois da Medida	Verão	192	2623,00	2716,12	83,77	16,08	3,06
	Inverno	96	4877,00	4913,23	107,26	10,30	1,96
	Total	288	----	----	----	26,38	5,02

Tabela 4.11 - Perdas para a concessionária baseadas nos resultados da medida de conservação através do PROCEDIMENTO 2, **sem a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.**

	Para o Consumidor	Para a Concessionária
Economia no Custo da Energia	R$ 11,94	----
Faturamento	----	R$ - 0,04
Liberação da Capacidade do Sistema	(5200,00 – 4913,23) 286,77 VA	(5200,00 – 4913,23 – diferença das perdas) = 282,66 W

Mas, para se realizar a comparação da economia, levando-se em conta as perdas harmônicas no transformador, faz-se:

Tabela 4.12 - Perdas para a concessionária, antes e após a medida de conservação baseada no PROCEDIMENTO 2, **com a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador**.

	Estação do Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema Lado A (W)	Perdas Totais no Transfor-mador (W)	Perdas para a Concessionária (kWh/ano)	Custo da Energia não faturada (RS)
Antes da Medida	Verão	192	2900,00	2900,00	80,80	15,51	2,95
	Inverno	96	5200,00	5200,00	111,37	10,69	2,03
	Total	288	----	----	----	26,20	4,98
Depois da Medida	Verão	192	2623,00	2716,12	278,46	53,46	10,16
	Inverno	96	4877,00	4913,23	161,83	15,55	2,95
	Total	288	----	----	----	69,00	13,11

Tabela 4.13 - Perdas para a concessionária baseadas nos resultados da medida de conservação através do PROCEDIMENTO 2, **com a ocupação devido às perdas harmônicas no transformador.**

	Para o Consumidor	Para a Concessionária
Economia no Custo da Energia	R$ 11,94	----
Faturamento[7]	----	R$ - 8,13
Liberação da Capacidade do Sistema	(5200,00 – 4913,23) 286,77 VA	(5200,00 – 4932,96 – diferença das perdas) 212,47 W

Observa-se que com a contabilização das perdas harmônicas no transformador, o custo (devido às perdas) para a concessionária aumentou de R$ - 0,04 para R$ -8,13, implicando numa perda de faturamento de R$8,09, que é a diferença entre os faturamentos das Tabelas 4.11 e 4.13.

Para o consumidor não existe mudança no custo do consumo de energia comparativamente ao que ele pagava antes. Isto porque as perdas do transformador não lhe são devidas (posição do medidor de kWh).

4.3.1.3 - PROCEDIMENTO 3

QUANTIFICAÇÃO DOS CUSTOS DE UMA MEDIDA DE MITIGAÇÃO DEVIDO À DISTORÇÃO HARMÔNICA CAUSADA PELO CHUVEIRO CONTROLADO.

Uma possível solução de mitigação da intensidade harmônica apresentada pelo circuito variador de potência, seria (primeiramente) uma melhoria no circuito de controle do ângulo de disparo do TRIAC. Fazendo com que haja simetria entre estes ângulos tanto para o semi-ciclo positivo, quanto para o negativo da onda de tensão. Desta forma, as harmônicas de ordem par (2^a, 4^a, 6^a,..., 14^a) seriam eliminadas. Com esta melhoria, a Distorção Harmônica Total de corrente (THDi) diminuiria em ambos os pontos de análise, restando apenas harmônicas de ordem ímpar.

Para a redução das harmônicas ímpares, a utilização de filtros ativos (ou outro tipo qualquer) poderia ser uma medida de mitigação/eliminação adequada. Assim, torna-se interessante quantificar o **custo máximo** desta medida de mitigação que proporcione a economia de energia proposta pela medida de conservação.

[7] O faturamento negativo significa que a concessionária deixou de faturar aquele valor.

4.3.1.3.1 - ANÁLISE FINANCEIRA DO PROCEDIMENTO 3:

Tabela 4.14 – Custo máximo para a medida de mitigação do distúrbio provocado pela medida de conservação de energia adotada, baseado no PROCEDIMENTO 3.

	Estação do Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema (W) Lado A	Potência reduzida pela mitigação (W)	Redução de Consumo de Energia com a mitigação (kWh/ano)	Custo da Energia reduzido pela mitigação, no período (R$)
Antes da Medida	Verão	192	2900,00	2900,00	---	---	---
	Inverno	96	5200,00	5200	---	---	---
	Total	288	----	----	---	---	---
Depois da Medida	Verão	192	2623,00	2716,12	93,12	17,88	3,40
	Inverno	96	4877,00	4913,23	36,23	3,48	0,66
	Total	288	----	----	---	21,36	4,06

Com a mitigação, a nova redução no consumo de energia, comparada ao caso base, fica:

Tabela 4.15 – Comparação entre os custos com consumo de energia com e sem as medidas de mitigação, baseado no PROCEDIMENTO 3.

		Estação do Ano	Tempo de Utilização (horas/ano)	Potência do Chuveiro (W)	Potência Consumida do Sistema (W) Lado A	Custo da Energia no período (R$)
	Antes da Medida	Verão	192	2900,00	2900,00	105,79
		Inverno	96	5200,00	5200,00	94,85
		Total	288	----	----	200,64
Sem mitigação	Depois da Medida	Verão	192	2623,00	2716,12	99,08
		Inverno	96	4877,00	4913,23	89,62
		Total	288	----	----	188,70
Com mitigação	Depois da Medida	Verão	192	2623,00	2623,00	95,69
		Inverno	96	4877,00	4877,00	88,96
		Total	288	----	----	184,65

Redução ocorrida de R$11,94

Redução esperada de R$15.99

Verifica-se que, para a medida de mitigação/eliminação ser eficaz economicamente, a ponto de garantir a proposta da medida de conservação de energia de reduzir em R$15,99 o custo de faturamento devido ao consumo de energia (por período), será necessário uma análise que leve em consideração a vida útil dos equipamentos. A Figura 4.4 exemplifica melhor esta colocação:

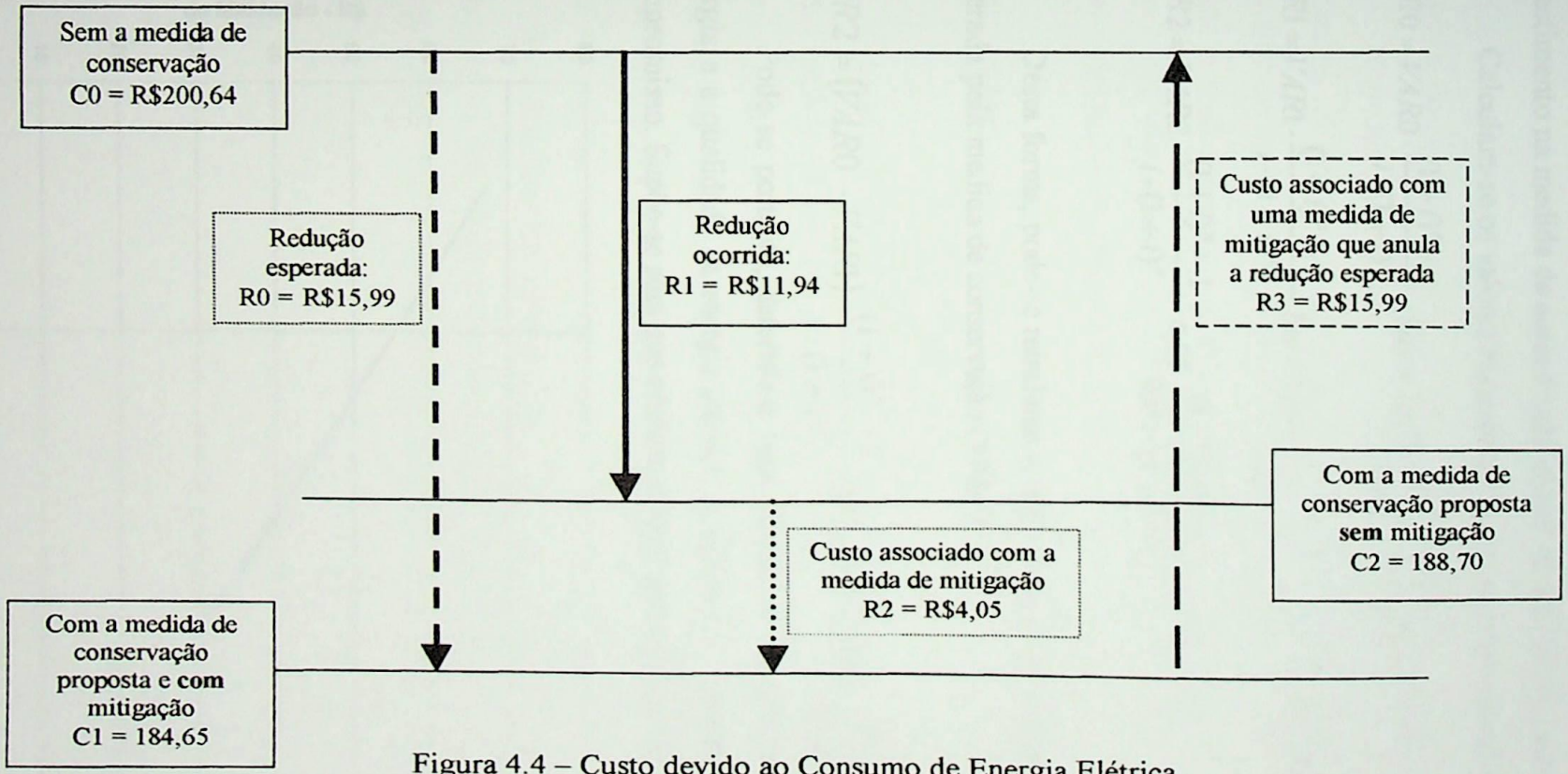


Figura 4.4 – Custo devido ao Consumo de Energia Elétrica.

Observa-se que a medida de mitigação custa (por período) R$4,05.

Avaliando-se os custos e reduções no consumo ao longo de 5 anos (vida útil do chuveiro e variador de potência) obtém-se os seguintes valores:

Sendo i = 6% - taxa da capitalização adotada para o período de um ano em análise;

n = 5anos - número de períodos em análise ;

VAR0 = R$15,99 - valor anual da redução esperada

VAR1 = R$11,94 - valor anual da redução ocorrida.

VAR2 = VAR0 – VAR1 = R$ 4,05 - valor anual do custo associado com a medida de mitigação.

Investimento na medida de conservação (custo do variador de potência): Inv = R$12,00

Calculam-se os valores presentes para as condições anteriores:

$$VPR0 = VAR0 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - Inv = 15{,}99 \frac{(1+0.06)^5 - 1}{0{,}06 \cdot (1+0.06)^5} - 12{,}00 = R\$\,55{,}36$$

$$VPR1 = VAR1 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - Inv = 11{,}94 \frac{(1+0.06)^5 - 1}{0{,}06 \cdot (1+0.06)^5} - 12{,}00 = R\$\,38{,}30$$

$$VPR2 = VAR2 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = 4{,}05 \frac{(1+0.06)^5 - 1}{0{,}06 \cdot (1+0.06)^5} = R\$17{,}06$$

Desta forma, pode-se relacionar o custo máximo de mitigação (VPR2) com a redução esperada pela medida de conservação (VAR1).

$$VPR2 = (VAR0 - VAR1) \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = (15{,}99 - VAR1) \cdot \frac{(1+0{,}06)^5 - 1}{0{,}06 \cdot (1+0{,}06)^5}$$

Pode-se portanto, determinar uma relação de compromisso entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica. A figura 4.5 – mostra o gráfico desta relação de compromisso. Supõe-se aqui que existam valores contínuos para a medida de mitigação.

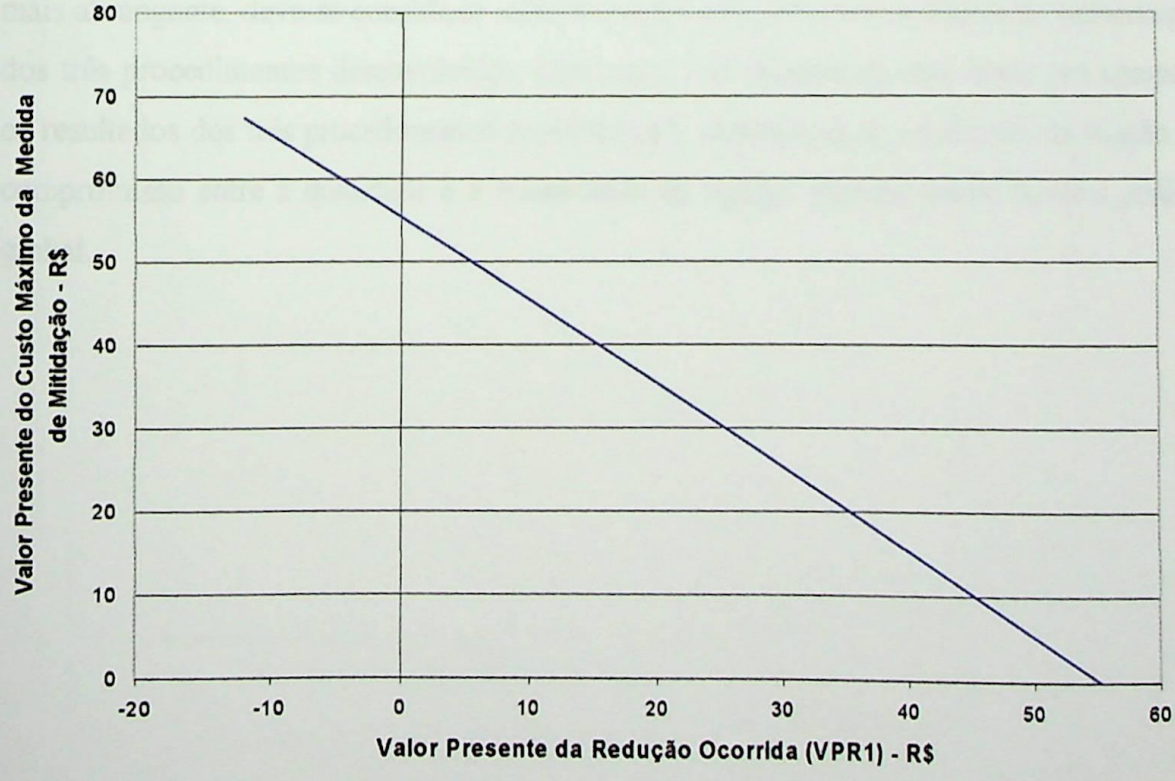


Figura 4.5 - Relação de Compromisso entre a Conservação e a Qualidade da Energia Elétrica.

Através da Figura 4.5, pode-se observar que caso uma medida de mitigação tenha valor igual a R$55,36, a redução proporcionada pela medida de conservação será toda utilizada para pagar a medida de mitigação, implicando num valor de redução ocorrida nulo.

Caso se tenha a redução esperada igual à redução ocorrida (VPR0 = VPR1 = R$55,36), não haverá necessidade da medida de mitigação, e seu custo será nulo, conforme mostra a mesma figura.

Sabendo-se que para valores superiores à R$55,36 no valor presente da medida de mitigação (VPR2), ter-se-á valores negativos no valor presente da redução ocorrida, significando que o benefício proporcionado pela medida de conservação não é suficiente para cobrir os custos com a mitigação, ao longo do período considerado de 5 anos.

Por exemplo, para se elevar o valor presente da redução de R$38,30 para R$45,00, deve-se ter um custo máximo de mitigação de:

$$VPR2 = VPR0 - VPR1 = 55{,}36 - 45{,}00 = R\$10{,}36$$

A análise anterior levou em consideração apenas a redução das perdas que surgiram com a medida de conservação. Cabe ressaltar que o custo do consumo de energia da medida de mitigação deve estar contabilizado no custo da própria medida. Outros valores, tais como a cobrança de excedente harmônico (procedimento 1), custo devido a perdas nos transformadores e cabos (procedimento 2), não foram considerados. Para uma análise final e mais abrangente, deve-se considerar todos os custos associados com a medida de conservação dos três procedimentos desenvolvidos. Para tanto, está apresentada uma tabela que compara os resultados dos três procedimentos sugeridos pela metodologia de verificação da relação de compromisso entre a qualidade e a conservação de energia. Posteriormente faz-se a análise global.

Tabela 4.16 - Resumo dos Resultados da Aplicação da Metodologia através dos PROCEDIMENTOS 1 a 3[8].

		Tempo de Utilizaçã o no período horas/ano	**Potência no Chuveiro (W)**	**Potência Consumida do Sistema (W)**	**Custo devido ao faturament o do excedente harmônico (R$)**	**Custo de Ocupação devido ao Transform a-dor (R$)[9]**	**Perda de Faturamento devido às perdas harmônicas no transformad or (R$)[10]**	**Custo Máximo da Medida de Mitigaçã o (VPR2) (R$/ano)**	**Consumo de Energia no período (kWh/ano)**	**Custo de Faturamento para o consumidor no período (R$)**	**Faturamen -to para a Concessio- nária (R$)**	**Economi a gerada pela Medida de Conserva -ção (R$)**
CASO BASE (Sem a Medida de Conservação)	Verão	192	2900,00	2900,00	---	---	---	---	556,80	**105,79**	---	—
	Inverno	96	5200,00	5200,00	---	---	---	---	499,20	**94,85**	---	—
CASO BASE (Com a Medida de Conservação)	Verão	192	2623,00	2716,12	---	---	---	---	521,50	**99,08**	---	**6,71**
	Inverno	96	4877,00	4913,23	---	---	---	---	471,67	**89,62**	---	**5.23**
Procedimento 1	Verão	192	2623,00	2716,12	13,50	---	---	---	521,50	**112,58**	---	**-6,79**
	Inverno	96	4877,00	4913,23	0,74	---	---	---	471,67	**90,36**	---	**4,49**
Procedimento 2	Verão	192	2623,00	2716,12	---	----	7,10	---	521,50	**99,08**	-7,10	—
	Inverno	96	4877,00	4913,23	---	6,62	0,99	---	471,67	**89,62**	-7,61	—
Procedimento 3	Verão	192	2623,00		---	---	---	10,36	*	*	*	**10,68**
	Inverno	96	4877,00		---	---	---		*	*	*	

* Ver o valor associado com a medida de conservação adotada.

[8] Os resultados dos procedimentos 1 a 3 foram comparados com os resultados do caso base com a medida de conservação (Tabela 4.6).
[9] Este custo só será contabilizado caso haja necessidade de expansão do sistema comparativamente ao sistema anterior à aplicação da medida de conservação.
[10] Perda para a Concessionária.

4.3.2 - ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS DA METODOLOGIA

Nesta análise, leva-se em conta todos os custos ou benefícios gerados pela medida de conservação através dos resultados dos procedimentos 1 a 3 e utilizando-se de fluxos de caixa.

O fluxo de caixa do consumidor difere do fluxo de caixa da concessionária, tendo em vista que nem sempre o consumo do primeiro, reflete o faturamento do segundo, por motivo de perdas.

4.3.2.1 – Fluxo de caixa sem a medida de conservação para o consumidor.

O valor anual uniforme (VA) mostrado na Figura 4.6 representa o custo de fornecimento devido ao consumo de energia elétrica por período.

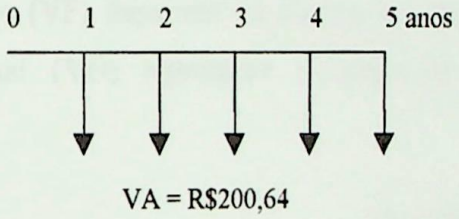


Figura 4.6 – Fluxo de caixa do custo devido ao consumo de energia sem a medida de conservação.

4.3.2.2 – Fluxo de caixa com a medida de conservação para o consumidor.

O valor anual uniforme (VB) mostrado na Figura 4.7 representa o custo de fornecimento devido ao consumo de energia elétrica. O valor anual (VC) representa o custo do excedente harmônico e o valor anual (VD) representa a economia proporcionada pela medida de conservação.

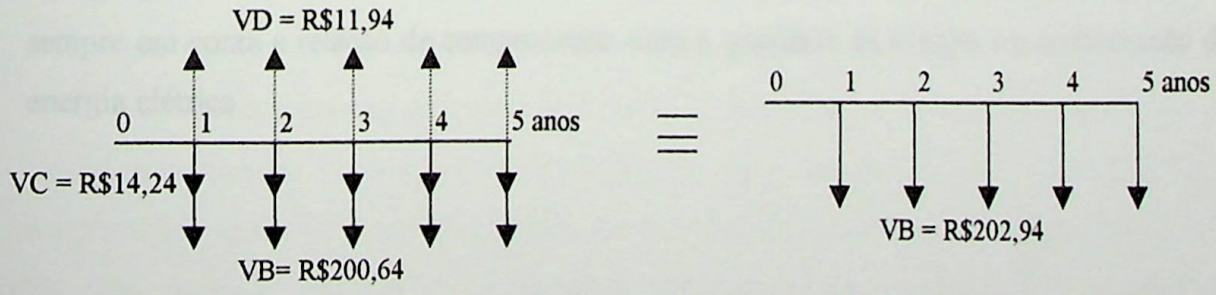


Figura 4.7 - Fluxo de caixa do custo devido ao consumo de energia com a medida de conservação.

4.3.2.3 – Fluxo de caixa sem a medida de conservação para a concessionária.

O valor anual uniforme (VE) mostrado na Figura 4.8 representa o faturamento da concessionária, devido ao consumo de energia elétrica gasta pelo consumidor por período.

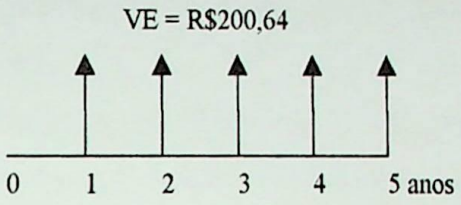


Figura 4.8 – Fluxo de caixa do faturamento da concessionária sem a medida de conservação.

4.3.2.4 – Fluxo de caixa com a medida de conservação para a concessionária.

O valor anual uniforme (VF) mostrado na Figura 4.9 representa o faturamento da concessionária. O valor anual (VG) representa o custo de ocupação e perdas no transformador.

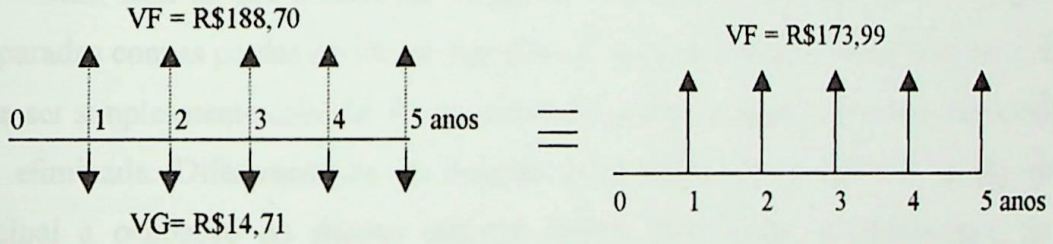


Figura 4.9 – Fluxo de caixa do faturamento da concessionária com a medida de conservação.

Desta forma, pode-se observar que uma medida de mitigação poderá aumentar tanto a economia do consumidor como o faturamento da concessionária. Determinado-se tanto o custo como o consumo de energia desta medida de mitigação, calcula-se um novo fluxo de caixa para o consumidor e para a concessionária, a fim de verificar a verdadeira economia de energia para o consumidor e o verdadeiro valor faturado pela concessionária. Levando-se sempre em conta a relação de compromisso entre a qualidade da energia e a conservação de energia elétrica.

RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

Os atuais programas de conservação sugerem medidas que não levam em consideração os problemas causados pelos distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica. Desta forma, através de uma análise financeira, contabilizam uma economia que muitas vezes não representa o valor real esperado.

Isto acontece porque surge um acréscimo nas perdas e ocupa-se mais o sistema elétrico, quando a medida de conservação apresenta uma característica de carga não-linear.

Atualmente existe uma discussão a respeito de como deverá ser feita a distribuição de responsabilidades entre os consumidores, fabricantes e concessionários, dos problemas gerados pela distorção harmônica.

Alguns autores sugerem a cobrança do "excedente" harmônico, assim com é feito para a energia reativa, através do fator de potência (Portaria DNAEE 1569). O excedente harmônico seria cobrado dos consumidores que ultrapassassem determinados limites estabelecidos por lei. Limites estes chamados de "limites de referência".

Mas, sabe-se que a distorção harmônica causa danos e perdas diferenciadas quando comparadas com as perdas devido ao excedente reativo. A distorção harmônica não é algo que possa ser simplesmente cobrada. É uma distorção nociva ao sistema que deve ser minimizada e/ou eliminada. Diferentemente do excesso de potência reativa que tem como problema principal a ocupação do sistema elétrico. Dentro desta linha de pensamento, de que a distorção harmônica deve ser eliminada e não tarifada simplesmente, existem outros autores que defendem tal abordagem. Desta forma, a atual legislação, não cobre tais problemas, mas está em busca de uma solução.

De uma forma geral, o importante é estar consciente de que a minimização da distorção harmônica pode e deve ser de responsabilidade de todos os "atores" envolvidos no setor elétrico. Sejam os consumidores ou as concessionárias, através de medidas de mitigação, os fabricantes com a melhoria da qualidade de seus produtos e o órgão Regulador com a elaboração de normas que visem a adequação dos níveis de qualidade.

No entanto, para se realizar uma análise de viabilidade econômica que contemple os custos relacionados com a perda da qualidade, sugere-se a aplicação da metodologia desenvolvida através dos seus procedimentos. Esta metodologia fornece um algoritmo através do qual pode-se verificar as verdadeiras economias proporcionadas pela medida de conservação sob as novas condições, onde o excedente devido aos harmônicos é cobrado (procedimento1) ou a ocupação e as perdas em transformadores e cabos são consideradas

(procedimento2) e contabilizando o custo de uma medida de mitigação que venha a reduzir os problemas oriundos dos distúrbios (procedimento3).

Através do estudo prático, pôde-se concluir que tanto a economia para o consumidor quanto o faturamento da concessionária podem diminuir, conforme se incorpore ou não, nas análises financeiras da medida de conservação, os custos oriundos do acréscimo de perdas nos transformadores e cabos, além do custo associado com uma maior ocupação do sistema elétrico e relativo ao excedente harmônico. No estudo, verificou-se a existência de uma relação de compromisso entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica. Com esta relação está associado o custo da medida de mitigação do distúrbio gerado pela medida de conservação. E que quanto maior o custo desta mitigação, menores serão os benefícios proporcionados pela medida de conservação ao longo do período em análise que contemple a vida útil do equipamento e dessa medida.

Conclui-se ainda que para uma correta avaliação das perdas oriundas da utilização de uma medida de conservação, deve-se primeiramente se realizar um levantamento das características elétricas do sistema em análise medindo-se e calculando-se valores que serão utilizados nos procedimentos da metodologia.

Cabe ressaltar, que antes de se realizar a medida de conservação, torna-se interessante realizar uma simulação computacional com o objetivo de se verificar e evitar possíveis problemas que possam surgir. Atentando-se para isso, evitar-se-á que perdas ou outros problemas possam vir a existir.

Como proposta do trabalho, recomenda-se a inclusão dos custos obtidos através dos procedimentos da metodologia, na análise de viabilidade econômica das medidas de conservação. Com isso contabilizam-se as verdadeiras economias proporcionadas pela medida de conservação.

Este trabalho desenvolveu uma metodologia de análise da relação de compromisso entre a conservação e a qualidade da energia. Cabe ressaltar que devido à variedade dos sistemas elétricos e das cargas, uma metodologia mais abrangente e de aplicação geral, incluindo-se o desequilíbrio entre fases, e outros distúrbios como as depressões de tensão, afundamento de tensão, etc., possa ser desenvolvida como proposta futura para outros trabalhos.

Por fim, as concessionárias de energia e os consumidores, devem se atentar para medidas de conservação que impliquem em perda da qualidade da energia.

Assim, a metodologia desenvolvida fornece um ferramental de análise da relação de compromisso entre a qualidade da energia e a conservação de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACE - Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia, "Ocorrência de Tensões e Correntes Harmônicas nos Sistemas Elétricos - Portaria em Elaboração pelo DNAEE, Apreciação da ABRACE", Relatório ABRACE; novembro 1985.

ABREU, José Policarpo de; José Maria C. Filho; Paulo L. Carvalho; "Impacto das Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos"; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

ABREU, José Policarpo de; José Maria C. Filho; Paulo L. Carvalho; Oliver Péricles O. Freiras; "Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica"; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997 - 2

AGÊNCIA, para Aplicação de Energia, Manual de Administração de Energia , Iluminação 4.

ARANGO, Hector; et. alli.; " A Estrutura Tarifária no Brasil e sua Atualização para Ambientes Distorcidos", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

ARRILLAGA, J.; "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 1985.

BRASIL, Dalton O. C., et alli; "Qualidade de Potência – Aspectos Metodológicos e de Custos", II SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, São Lourenço, de 1997.

BRONZEADO H. S. - CHESF, Á. J. P. Ramos - CHESF, J. C. de Oliveira - UFU, J. P. G. de Abreu - EFEI, A. A. C. Arruda - ELETROPAULO, A. C. Brandão – CEMIG, II SBQEE – "Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições" Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

CEB – Companhia Energética de Brasília, "Projeto de Conservação de Energia da Esplanada dos Ministérios", Brasília, Junho de 1995.

CED – Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, CESP, CPFL, ELMA, EBE, EPUSP, IEE/USP, "Nota Técnica do Projeto ntegrado de Qualidade de Energia, Normalização, Medição e Tarifação – Tarifação e Medição em Ambientes Distorcidos", Junho de 1998.

CEMIG, "Energia Solar para o Aquecimento de Água", Cemig/Superintendência Comercial, Belo Horizonte, 1993

CESP, "Manual de Fator de Potência", 2ª Edição – SP, 1986.

COENE, "Apostila do Curso de Otimização Energética", FUPAI – Fundação de Ensino e Assessoramento à Industria, Itajubá, 1996

DE ARAÚJO, João Lizardo R. Hermes, "Difusão de Tecnologias Eficientes no Brasil", Instituto de Economia, Material do Curso de Reestruturação do Setor Elétrico e Novos Negócios em Eficiência Energética - UFRJ, 1998

DE VRÉ, R. "Limitation of Harmonics due to household and similar low-voltage equipament." International Conference on Harmonics in Power System, 1994.

ELETROBRÁS, "Análise dos Comentários sobre a Minuta de Portaria Regulamentando os Critérios para Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL/GTEE - 02/86, janeiro 1986.

ELETROBRÁS, "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", Relatório CECE/SCEL/GCOI e GTCP/CTST/GCPS, fevereiro 1993.

EMANUEL, A. E.; Wang, X,; "Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Transactions On Power Apparatus and System", Vol. PAS-104, N° 3, March, 1985.

EMANUEL, Alexander E.; "Apparent Power: A Practical Approach to its Resolution", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

FICAP, "Fios e Cabos Plásticos", Catálogos Diversos, 1998

FINEP - Capacitação para a Tomada de Decisões na Área de Energia - "O Planejador do Setor Elétrico: Desafios e Controvérsias"; Rio de Janeiro - 1989.

FÓRUM NB-3, "Harmônicos em Transformadores", Revista Eletricidade Moderna, pgs 36-37, Janeiro de 1997

FURTADO, H.C., "Avaliação do desempenho de materiais ferromagnéticos para motores. Revista Eletricidade Moderna, n°263, pp. 50-57, fevereiro de 1996.

GELLER, H. S., et. Alli, "Iluminação Eficiente no Brasil: Evolução do Mercado, Economia de Eletricidade e Políticas Públicas. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS/PROCEL, Dezembro de 1996.

GELLER, H. S., "O Uso Eficiente da Eletricidade: uma estratégia eficiênte para o Brasil", Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1996.

GUIMARÃES, C. A. M.; "Apostila sobre Harmônicos", Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica – EFEI, 1997.

HANDBOOK, Insulated Power Cable Engineers Associated; July 1959.

HEI, Hawaian Electrical Institute, 1998. [Internet: http:\\www.hei.com]

IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System (ANSI).

IEC 1000-3-2, "Limits for Harmonic Current Emissions", International Electrotechnical Commission Standard, Mar. 1995.

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

JANNUZZI, Gilberto de M.; Swisher, J. N. P.; "Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis" Ed. Autores e Associados, Campinas-SP, 1997

JARDINI, José A., Moreira, J. G. de Souza, "Efeitos dos Chuveiros no Sistema e Alternativas para sua Substituição", Revista Eletricidade Moderna, pgs. 82 a 86, Janeiro de 1996.

JOSÉ BATISTA Siqueira Filho; Eudes Pontes da Silva; "Harmônicos e Capacitores em Prédios Comerciais: Análise de um Caso Real", Revista Eletricidade Moderna, No. 287, Fevereiro de 1998.

JOSÉ CÉSAR Nonato - "Faturamento de Energia Reativa em Condomínios Residenciais", Revista Eletricidade Moderna, Fevereiro de 1998

KARL Johnson, Electric Power Research Institute Palo Alto, California, and Robert ZAVADIL, Electrotek Concepts, Inc. Knoxville, Tennessee - "Assessing the Impacts of Nonlinear Loads on Power Quality in Commercial Buildings - An Overview", IEEE Transactions 1991.

KAUFMAN, J. E., "IES Lighting Handbook", Illuminating Engineering Society of North America, New York, 1981.

KEY, Thomas S.; Lai, Jih-Sheng; "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Swith-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building", IEEE Trans. On Industry Applications", Vol. 32, N° 5, September/October, 1996.

LAI, Jih-Sheng; Key, Thomas S.; "Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipament for Commercial Office Buildings" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No 4, July/August 1997.

LAMBERTS, Roberto; Dutra, Luciano; Pereira, F. O. R.; "Eficiência Energética na Arquitetura", São Paulo, PW Editores, 1997.

LINDERS, John, R., "Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment", IEEE Trans. On Industry Applications", Vol. IA-15, N° 5, pp. 428-436, September/October, 1979.

MAHLER, Renato Pereira, "Curso de Reestruturação do Setor Elétrico & Novos Negócios em Eficiência Energética. Monografia: Eficientização Energética em Empresas de Saneamento Básico no Brasil", UFRJ, Maio de 1998.

MIELCZARSKI, W.; "Quality of Electricity supply in Competitive Markets", Workshop apresentado no III CONLADIS, São Paulo, Setembro de 1998.

MILLS, E., A. Rosenfeld, "Consumer Non Energy Benefits as Motivation for Making Energy-Efficiency Improvements", ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Monterrey, California, 1994.

NBR 5410, "Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Procedimentos ABNT", 1997

NBR 11301, "Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%), 1990

OLIVEIRA, A. de; et. Alli; "Uma Contribuição para a Quantificação e Qualificação da Distorção Harmônica", II SBQEE, São Lourenço, 1997.

PADACA, V. F.; Hess, H. L.; " Resonant Interaction and Additive Harmonic Effects of Multiple Paralleled AC Drives in Forest Products Processing", University of Idaho, [www.powerquality.com, 1998]

PROCEL 1996, Resultados do, "Economia de Energia e Redução de Demanda na Ponta", Abril de 1997.

PROCEL, "Manual de Conservação de Energia Elétrica na Indústria – Alta Tensão", 1996.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre, "Qualidade de Energia – Harmônicas", Manual de Referência, 1998.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre, "Dimensionamento Econômico de Condutores Elétricos", Catálogo de Publicação, 1998.

R. R. VERDERBER, et. alli., "Harmonics From Compact Fluorescent Lamps", IEEE Transactions - 1991

REZEK, A.J.J., "Harmônicos Controlados por Conversores Controlados pela Rede", Notas de Aula de Eletrônica de Potência, EFEI 1995.

ROCHA, C. O. A.; Mello, C. A. F.; Gomes, H. N.; "Harmônicos causados pela operação simultânea de televisores"; Rev. Eletricidade Moderna, Abril de 1997.

SAMIR Datta, Senior Member, IEEE California Polytechnic State University - "Power Pollution Caused by Lighting Control Systems", IEEE Transactions 1991.

SEN, P.K., Landa, H. A., "Derating of induction motors due to waveform distortion", IEEE Trans., IA26, pp. 1777-1982, 1990.

STRANGAS, Elias G.; "Adjustable Speed Drive Power Quality Evaluation Program – Second Phase – 1995-1996 - Final Report", Michigan State University, East Lansing MI48824, June 1996.

TABOSA, R. P. e Soares, G. A., "Ações Tecnológicas de Conservação de Energia em Motores e Acionamentos". Revista Eletricidade Moderna, n°`263, pp. 36-48, Fev. de 1996.

TOM Shaughnessy, "Power Factor, Harmonics and Harmonic Filter", Power CET, Santa Clara, CA, 1998.

VITRÚVIO, M. L.; "Los diez libros de arquitectura". Ed. Iberia S.A., Barcelona, 1982.

WAGNER, V. E., et. Alli., "Effects of Harmonics on Equipament", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N° 2, April 1993.

WATANABE, E. H., et. alli, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, N° 2, April 1993.

WILKINS, A. J., et. alli., "Fluorescent Lighting, Headaches and Eye-Strain", presented at the National Lighting Conference, 1988.

YACAMINI, R.; "Power System Harmonics – Part1 Harmonic Sources", Power Engineering Journal, August 1994, pps 193-198.

YACAMINI, R.; "Power System Harmonics – Part3 Problems Caused by Distorted Supplies", Power Engineering Journal, October 1995, pps 233-238.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ANDERSEN, Mark, "Getting "Power Bugs" Out of Your Facility"; The Energy Management Training Series - Internet :http:\\powerquality.com, 1998

ARANGO, Hector; "Transporte e Entrega de Energia Elétrica", CENÁRIOS – Curso de Especialização Sobre o Novo Ambiente Regulatório, Institucional e Organizacional do Setor Elétrico, Universidade de São Paulo - USP, 1997.

ARSENEAU, R.; Quellette, M.; "The Effects of Supply Harmonics of the Performance of Compact Fluorescent Lamps", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993,pps 473-479

BAGHZOUZ, Y.; Tan, O. T.; "Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter Performance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104 N° 2, February 1985, pps 339-406

BEGOVIC', M. M.; Djuric', P. M.; Dunlap, S.; Phadke, A. G.; "Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 480-486

BERNARDES, D. F.; Júnior, A. S.; Rodrigues, J. C. G.; Vicente, J. M. E.; "O Impacto do uso de Microcomputadores na Qualidade da Energia Elétrica", Artigo apresentado no II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - São Lourenço - M.G.. De 16 a 19 de Novembro de 1997

BOLETIM Conjuntura Energia, Coordenadoria do Sistema de Informações Energéticas e Informática, 1998

BRONZEADO, H. S., "Principais Aspectos da Qualidade de Energia Elétrica", notas do Curso de Extensão Universitária, UFPE, agosto 1997. – 2

DKB - Desdner Kleinerwort Benson - Departamento de Pesquisa da Instituição Financeira DKB, "The Millennium Files" Latin America: Consumption Comes of Age, Londres, 1997

DNAEE, "Manual de Implantação da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica", Relatório do Grupo de Trabalho criado pela Portaria DNAEE 163/93, agosto 1997.

ELETROBRÁS, "Critérios e Metodologias para o Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL/CENC - 01/78, 1978.

ELETROBRÁS, "Critérios e Metodologias para o Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL/GTEE - 03/84, 1984.

ELETROBRÁS, "Parecer sobre a Avaliação dos Critérios do GCOI para o Atendimento a Cargas Especiais Aplicados a Consumidores Existentes no Sistema", Relatório SCEL/GTEE - 05/84, Outubro 1984.

ELETROBRÁS, "Análise dos Comentários sobre a Minuta de Portaria Regulamentando os Critérios para Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL/GTEE - 02/86, janeiro 1986.

EMANUEL, A. E.; Levitsky, F. J.; Gulachenski, E. M.; "Induction Watthour Meter Performance on Rectifier / Inverter Circuits", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100 N° 11, November 1981, pps 4422-4427

FLEISHMAN, Barry; Dickstein Shapiro; "Power Quality and Products Liability Law Emerging Issues and Concepts", Et Al Whashington D.C., 1998-1; Internet: http:\\www.powerquality.com

FLEISHMAN, Barry; Anderson Kill Olick & Oshinsky; "Whose Fault Was It", Whashington D.C., 1998-2; Internet: http:\\www.powerquality.com

GAMA, Paulo Henrique R. P. Gama; et. alii; "Interferência no Sistema Elétrico Causado pela Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Consumidores Residenciais", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

GOLDBERG, S.; Horton, W. F.; "Induction Watthour Meter Accuracy with Non-Sinusoidal Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2 N° 3, July 1987, pps 683-690

HENDERSON, R. D., "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformes", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30 N° 3, May/June 1994

LU, S.; Liu, Y.; Ree, J. De L.; "Harmonics Generated From a DC Biased Transformer", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 725-731

MAKRAM, E. B.; Wright, C. L., Girgis, A. A.; "A Harmonic Analysis of the Induction Watthour", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 N° 3, July 1992, pps 1080-1088

MILLER, A. J. V.; Dewe, M. B.; "The Application of Multi-Rate Digital Signal Processing Techniques to the Measurement of Power System Harmonic Level", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 531-539

RAMOS, Álvaro J. P. – CHESF; Daniel de Lira – Politécnica/UPE; Hervelto S. Bronzeado – CHESF; "Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Práticos" – II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997

RICHARD Redl; Paolo Tenti; J. Daan Van Wyk; "Power Eletronics Polluting Effects"; IEEE Spectrum, May 1997.

SECRETARIA de Energia do Estado de São Paulo, Comissão de Serviços Públicos de Energia, "Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica – Indicadores, Padrões e Penalidades – Versão 2, Julho de 1997

SICREE, R. M.; Rauch, G. B.; Dietrich, F. M.; "Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses Over a Database of Residencial Measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 607-619

WILLIAMS, S. M.; Brownfield, G. T.; Duffus, J. W.; "Harmonic Propagation on a Electric Distribution System: Field Measurements Compared with Computer Simulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 547-552

YACAMINI, R., "Power System Harmonics - Part 2: Measurements and Calculations", Power Engineering Journal, February 1995, pps 51-56

ANEXO A

TRABALHO DE RETROFITTING UTILIZANDO-SE DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

ANÁLISE DO TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO E DO VALOR PRESENTE EM DOIS CASOS DE RETROFITTING ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA VIDA ÚTIL E DO PERÍODO DE FUNCIONAMENTO DE REATORES E LÂMPADAS FLUORESCENTES, UTILIZANDO A TÉCNICA DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.

Paulo Henrique Ramalho P. Gama

Mestrando da EFEI
Departamento de Eletrotécnica

Edson de Oliveira Pamplona

Professor Doutor da EFEI
Instituto de Engenharia Mecânica

Resumo - O presente trabalho descreve uma análise da variação do tempo de retorno de investimento em um caso de retrofitting e a variação do valor presente em outro. Esta análise de variação do VP e do Tempo é feita incorporando-se probabilidades para as vidas úteis de reatores e lâmpadas fluorescentes tubulares envolvidas no Retrofitting. Para a simulação é utilizada a técnica de Monte Carlo.

Palavras-chave: Monte Carlo, Retrofitting, Simulação, Variação de Vida Útil.

I. Introdução

Devido à sua popularidade, os sistemas de iluminação fluorescente tubular representam um interesse primordial em relação aos esforços de conservação de energia na iluminação. Especificamente lâmpadas de 32,36 e 40 W e os reatores duplos com 220V concentram o maior volume de aplicações em sistemas de iluminação tubular. As lâmpadas tubulares representam cerca de 74% do mercado de lâmpadas fluorescentes e os reatores duplos 68% do mercado de reatores.

O termo Retrofitting pode ser interpretado como a reforma de algum sistema onde se incorporam novas tecnologias voltadas para a conservação de energia, com melhoria significativa no seu desempenho.

Uma correta análise das alternativas e da avaliação dos investimentos se torna necessária para a execução do retrofitting.

Sabe-se que várias considerações devem ser feitas para que se consiga determinar com o menor erro possível o Valor Presente e/ou o Tempo de Retorno do Investimento em análise.

Dentre estas estimativas, citam-se a vida útil de lâmpadas e reatores, implicando em um maior ou menor custo de manutenção no período considerado; o período de funcionamento do sistema em análise, implicando num aumento ou diminuição do custo de energia elétrica da alternativa. Outros fatores não considerados neste trabalho também podem ser relevantes, tais como a variação no custo da energia (Demanda e Consumo na Ponta e Fora de Ponta), variação no preço das lâmpadas e reatores a serem substituídos e seus respectivos custos de troca. Também não foi considerada a variação do investimento na alternativa futura.

Deste modo uma análise econômica utilizando-se não somente os valores médios estimados é feita através de uma simulação de Monte Carlo, com as respectivas probabilidades para cada valor de variável em análise.

Com isto consegue-se saber não só o Tempo de Retorno do Investimento e seu valor presente, mas também a sua probabilidade de ser superior ou inferior a um valor considerado como *Valor Crítico*.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a simulação da variação dos índices de análise econômica como o Tempo de Retorno de Investimento para o Caso1 e o Valor Presente e TIR para o Caso2.

II. Caso 1 - Edifício de Escritórios

Este caso refere-se à reforma de 1193 luminárias de 2 x 40W, passando-as para 1 x 32W, e de 36 luminárias de 2 x 20W, passando-as para 1 x 16W, em dois pavimentos de um edifício de escritórios. Após a avaliação técnica feita [1], chegou-se a uma alternativa de substituição das lâmpadas e reforma nas luminárias. Analisando então a alternativa.

III. Análise econômica da alternativa encontrada, comparada com a atual caso1.

Tabela1 - Fluxo de Caixa do Sistema Atual - Caso1

Discriminação /Ano	0	1	2	3	4	5
Investimento R$mil	7464,0	---	---	---	---	---
Custo c/ Energia R$mil		43266,89	43266,89	43266,89	43266,89	43266,89
Custo c/ Manutenção R$mil		7464,0	7464,0	7464,0	7464,0	7464,0
Fluxo Total	7464	50730,89	50730,89	50730,89	50730,89	50730,89

Tabela2 - Fluxo de Caixa do Sistema Futuro - Caso1

Discriminação /Ano	0	1	2	3	4	5
Investimento R$mil	78705,38	-	-	-	-	-
Custo c/ Energia R$mil	---	17569,28	17569,28	17569,28	17569,28	17569,28
Custo c/ Manutenção R$mil	---	---	4860,0	4860,0	4860,0	4860,0
Fluxo Total	78705,38	17569,28	22429,28	22429,28	22429,28	22429,28

Tabela3 - Fluxo Diferencial Acumulado para o cálculo do Tempo de Retorno do Investimento - Caso1

Fluxo Diferencial Acumulado (R$)	-71241,4	-38079,8	-9778,16	18523,45	46825,06	75126,67

Com as tabelas 1 e 2 conseguiu-se determinar o Tempo de Retorno do Investimento. Isto foi feito, encontrando-se o fluxo diferencial acumulado, conforme mostrado na tabela 3.

Deste modo, determinou-se o Tempo de Retorno do Investimento, mostrado pelo gráfico1. Este tempo, com os valores médios da vida útil dos reatores e lâmpadas, foi de aproximadamente 28 meses.

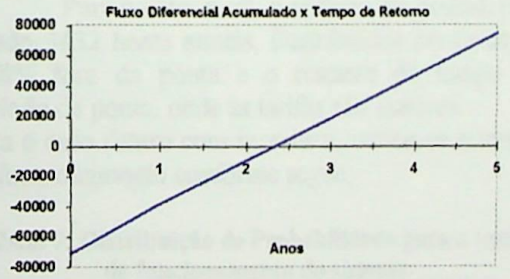


Gráfico 1: Tempo de Retorno do Investimento Caso1

Assim sendo, variou-se a vida útil do reator e da lâmpada fluorescente em análise, conforme as tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Distribuição de Probabilidade para a vida Útil da Lâmpada fluorescente tubular.

Vida Útil da Lâmpada Fluorescente (Hs)	Probabilidade (%)
6000	13
7500	50
9000	22
10500	10
11250	5

Tabela 5: Distribuição de Probabilidade para a vida útil dos Reatores.

Vida Útil dos Reatores (Hs)	Probabilidade (%)
15000	20
20000	20
25000	50
30000	10

Estas estimativas de distribuição foram feitas baseando-se em alguns aspectos como:

- *Fatores importantes que afetam a vida da Lâmpada Fluorescente [2]:*

1. Deterioração gradual do revestimento de fósforo;
2. Escurecimento da superfície interna do bulbo por causa do desprendimento do material emissivo dos filamentos, particularmente nas extremidades da lâmpada;
3. Falta do cumprimento da política de manutenção adotada para a limpeza de luminárias e substituição da lâmpada e reator na época correta relativa às suas vidas média.

- Efeito da Temperatura [2]:

1. As características da lâmpada dependem e muito da pressão de vapor de mercúrio interna à lâmpada, que por sua vez depende da temperatura. Sendo esta última dependente da construção, potência, temperatura ambiente, projeto da luminária, entre outros.

Para uma boa utilização das lâmpadas fluorescentes, aceita-se um decréscimo no fluxo luminoso de cerca de 20% do seu valor original. Este instante equivale à sua vida média. Uma vida muito longa por vezes é conseguida, mas a qualidade da iluminação apresenta-se muito baixa e não é recomendado. Outro fator é que, dentre um conjunto de lâmpadas, cerca de 50% delas "morrem" quando atingem a sua vida nominal. Esta é a chamada taxa de mortalidade. Gráficos de fabricantes mostram esta relação [2].

Após todas estas colocações, determinou-se o Tempo de Retorno do Investimento para o caso do fluxo com incertezas nas vidas úteis dos reatores e lâmpadas.

Como resultado obteve-se para 500 amostras simuladas os seguintes valores:

Tabela 6: Resultado da Simulação para o Tempo de Retorno do Investimento.

Valor Médio (meses)	27
Desvio Padrão	0,73
Prob. T > 28 meses	9,26%
Prob. T > 29 meses	0,36%

O Tempo de retorno antes previsto para 28 meses, caiu para 27 meses. Uma diferença percentual de 5 pontos. Esta diferença se deu pequena pelo fato do custo de manutenção associado à vida das lâmpadas e reatores ser pouco influenciado, não alterando muito o resultado final da análise do investimento.

Para verificar tal fato, realizou-se então uma variação no tempo de funcionamento do sistema, ou seja, o número de horas em que o sistema de iluminação fica ligado.

Para o caso atual, o sistema foi considerado ligado 3432 horas anuais. Distribuídas em cerca de 80,8% fora da ponta e o restante do tempo no período de ponta, onde as tarifas são maiores.

Para o caso futuro com incerteza, variou-se o tempo de funcionamento conforme segue:

Tabela 7: Distribuição de Probabilidade para o tempo de funcionamento do sistema.

Horas de Func. na Ponta	
Valor (Hs)	Probabilidade (%)
54	10
55	60
58	30
Horas de Func. Fora da Ponta	
Valor (Hs)	Probabilidade (%)
228	10
231	60
251	30

Com esta variação consegui-se os resultados apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Resultado da Simulação para o Tempo de Retorno do Investimento com variação da vida útil das lâmpadas e do tempo de funcionamento do sistema.

Valor Médio (meses)	26,33
Desvio Padrão	0,91
Prob. T > 28 meses	3,30
Prob. T > 29 meses	0,17%

Tem-se neste caso que com o acréscimo diário de uma hora de funcionamento a alternativa futura se torna mais interessante.

Deste modo, como já comentado anteriormente, pode-se prosseguir com a variação dos parâmetros mais sensíveis às alternativas conforme se ache necessário.

IV. Caso 2 - Centro de Processamento de Dados

Este caso refere-se a um edifício destinado ao processamento de dados e serviços de apoio. A alternativa avaliada e apresentada ao cliente considerou a substituição de luminárias existentes (4 x 40W) por outras (2 x 20W), oferecendo um controle de ofuscamento de alta qualidade.

Foram considerados no preço global do Retrofitting, a complementação de forro devido à diferença de dimensões entre as luminárias atual e futura, a mão de obra de retirada, a colocação e a modificação dos rabichos de interligação entre luminária e caixa de passagem e os serviços complementares.

A análise econômica do Retrofitting deste sistema foi feita pelo método do Tempo de Retorno, da TIR e do valor presente, pois o cliente desejava uma noção mais apurada do investimento necessário

V. Análise econômica da alternativa encontrada, comparada com a atual caso2.

Tabela 9 - Fluxo de Caixa, em R$mil, com Sistema Atual - Caso2

Discriminação	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
A) Investimento											
Materiais + M.O.											
Engenharia											
B) Custo Anual											
Energia	35,7	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	35,7
Manutenção	8,2	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	8,2
Depreciação											
IR + CS	-16	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-16
Fluxo	27,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	27,9

IR + CS: 36,44% Taxa de Desconto: 20% Valor Presente Líquido: -R$214,78 mil

Tabela 10 - Fluxo de Caixa, em R$mil, com Sistema Futuro - Caso2

Discriminação	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
A) Investimento	**125,1**										
Materiais + M.O.	109,1										
Engenharia	16,0										
B) Custo Anual											
Energia	13,1	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	13,1
Manutenção	4,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	4,9
Depreciação	7,1	14,1	14,1	14,1	14,1	12,5	10,9	10,9	10,9	10,9	5,5
IR + CS	-9,1	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-17,7	-17,1	-17,1	-17,1	-17,1	-8,6
Depreciação	-7,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-12,5	-10,9	-10,9	-10,9	-10,9	-5,5
Fluxo	134	17,8	17,8	17,8	17,8	18,4	18,9	18,9	18,9	18,9	9,5

IR + CS: 36,44% Taxa de Desconto: 20% Valor Presente Líquido: -R$173,89 mil

Tabela11 - Fluxo Diferencial para o cálculo do Tempo de Retorno do Investimento - Caso2

***Fluxo diferenc.**	-106,1	38,1	38,1	38,1	38,1	37,5	36,9	36,9	36,9	36,9	18,5
Fluxo diferenc. Acumulado	-106,1	-69,0	-29,9	8,2	46,3	83,8	121	158	195	232	250

IR + CS: 36,44% Taxa de Desconto: 20% * V.P.L. para o Fluxo Diferencial: R$40,8 mil

Os valores de Depreciação adotados foram: 10% para Materiais + Mão de Obra
20% para o serviço de Engenharia.

Com isto consegue-se um Tempo de Retorno do Investimento, não considerando a taxa de desconto, em cerca de 34,7 meses. Conforme pode ser visto pelo gráfico 2:

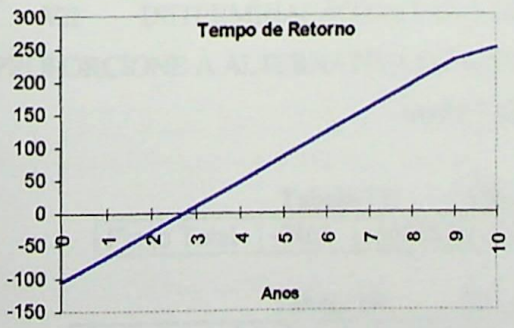


Gráfico2: Tempo de Retorno do Investimento Caso 2

O mesmo procedimento feito para o Caso 1 foi aplicado ao Caso2.

Determinou-se o Tempo de Retorno do Investimento, o Valor Presente do Fluxo Diferencial e a TIR para o caso do fluxo com incertezas nas vidas úteis dos reatores e lâmpadas e nas horas de funcionamento do sistema, conforme mostra a tabela que segue.

A distribuição de Probabilidade para a vida útil da lâmpada fluorescente tubular e para a vida útil dos reatores eletromagnéticos seguem conforme as tabelas 4 e 5, já citadas.

Já a distribuição de Probabilidade para a vida útil dos reatores eletrônicos e para o período de funcionamento do sistema estão nas tabelas 12 e 13 respectivamente.

Tabela 12: Distribuição de Probabilidade para a vida útil dos Reatores Eletrônicos.

Vida Útil dos Reatore Eletrônicos (Hs)	Probabilidade (%)
70.000	20
75.000	20
80.000	50
90.000	10

Tabela 13: Distribuição de Probabilidade para o tempo de funcionamento do sistema - Caso2.

Horas de Func. na Ponta	
Valor (Hs)	Probabilidade (%)
60	10
66	50
72	40
Horas de Func. na Ponta	
Valor (Hs)	Probabilidade (%)
550	10
560	50
570	40

Como resultado obteve-se para 500 amostras simuladas os seguintes valores:

Tabela 14: Resultado da Simulação para o Tempo de Retorno do Investimento - Caso2.

Valor Médio (meses)	32,17
Desvio Padrão	1,31
Prob. T < 34,7 meses	97,16%
Prob. T < 33,0 meses	74,61%

O Tempo de retorno antes previsto para 34,7 meses, caiu para 32,17 meses. Uma diferença percentual de 7,3 pontos.

Já, para o valor presente a diferença foi bem maior, cerca de 20% conforme segue.

Tabela 15: Resultado da Simulação para o Valor Presente Líquido do Fluxo Diferencial das Alternativas - Caso2.

Valor Médio (R$)	51.123,41
Desvio Padrão	5.129,76
Prob. VPL < 0	0,00 %
Prob. VPL < 40,89mil	2,30 %
Prob. TIR < TMA	0,00 %

VI. Resultados Comparativos

Abaixo encontra-se uma tabela que compara os valores obtidos nos dois casos com e sem a técnica de simulação, mostrando também os erros associados.

Tabela 16: Tabela Comparativa dos Resultados.

	Tempo de Retorno do Investim. (meses)	Valor Presente Líquido (R$mil)
Valor Adotado Caso1	28	----
Simulado Caso1	26,33	----
Erro	6 %	----
Valor Adotado Caso2	34,7	40,89
Simulado Caso2	32,17	51,12
Erro	7,3 %	20 %

Deste modo pode-se observar que uma pequena variação na vida útil das lâmpadas e reatores, associado com um acréscimo de uma hora de funcionamento no período de trabalho, já resultou em diferenças da ordem de 20 % para o VPL no Caso 2 e da ordem de 6% para o Tempo de Retorno para o Caso1. Isto mostra que as incertezas devem ser levadas em consideração na análise econômica dos sistemas de Retrofitting.

VII DETERMINAÇÃO DA TAXA DE JUROS MÁXIMA DE UM FINANCIAMENTO QUE PROPORCIONE À ALTERNATIVA DO **CASO 1** SER VIABILIZADA SEM INCORRER EM GASTO A MAIS PARA O CONSUMIDOR.

Tabela 17: Fluxo de caixa do Sistema Atual (R$)

Fluxo Total	-7464	-50730,89	-50730,89	-50730,89	-50730,89	-50730,89

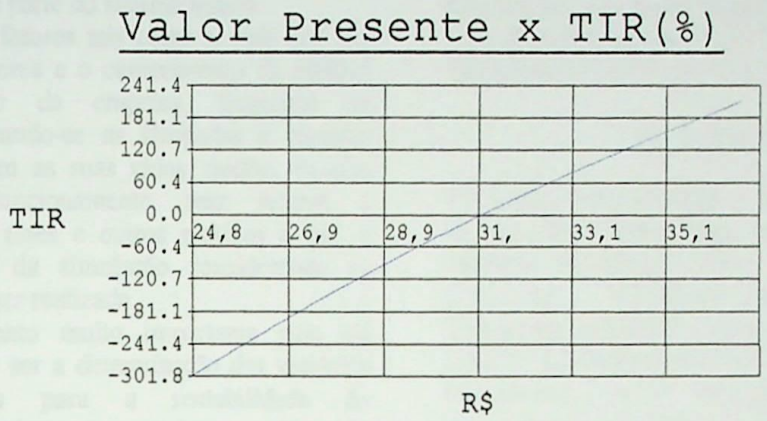
Tabela 18: Fluxo de caixa do Sistema Futuro (R$)

Fluxo Total	-78705,38	-17569,28	-22429,28	-22429,28	-22429,28	-22429,28

Tabela 19: Fluxo de Caixa Diferencial das Alternativas Sistema Futuro - Atual. Este é o fluxo de caixa que o consumidor poderá garantir o seu pagamento, tendo em vista que já iria ser pago através dos custos atuais (R$).

Fluxo Diferencial	-71241,4	33161,61	28301,61	28301,61	28301,61	28301,61

Para a determinação da Taxa Interna de Retorno (TIR) deste fluxo diferencial, no qual o Valor Presente se torna nulo e para "pagar" as futuras parcelas do financiamento:



O Valor do empréstimo necessário ao Consumidor para que não haja desembolso além do que ele deveria ter com o sistema atual: R$ 71.241,40

Sistema de Financiamento para o empréstimo acima:

Valor Principal: R$ - 71.241,40
Número de Prestações: 5
Período de Carência: nenhum
Taxa de Juros anual (TIR): 31,0755%

Tabela 20: Financiamento Sistema PRICE:

Período (anos)	Saldo Devedor (R$)	Prestação (R$)	Amortização (R$)	Juros (R$)
0	-71.241,40	---	---	---
1	-63.525,12	-29.854,90	-7716,28	-22.138,62
2	-53410,96	-29.854,90	-10.114,15	-19.740,75
3	-40153,79	-29.854,90	-13.257,18	-16.597,72
4	-22776,87	-29.854,90	-17.376,91	-12.477,99
5	0,00	-29.854,90	-22.776,87	-7.078,03

Valor de cada prestação, conforme tabela Price: R$29.854,90 ao ano.

Tabela 21: Financiamento Sistema SAC:

Período (anos)	Saldo Devedor (R$)	Prestação (R$)	Amortização (R$)	Juros (R$)
0	-71.241,40	---	---	---
1	-56.993,12	-36.386,90	-14.248,28	-22.138,62
2	-42.744,84	-31.959,18	-14.248,28	-17.710,90
3	-28.496,56	-27.531,45	-14.248,28	-13.283,17
4	-14.248,28	-23.103,73	-14.248,28	-8.855,45
5	0,00	-18.676,00	-14.248,28	-4.427,72

Deste modo, torna-se possível ao consumidor realizar o Retrofitting do seu sistema de iluminação sem desembolsar qualquer quantia, através de um financiamento à taxa máxima de Juros de 31,0755% aaca.

VIII. Conclusões

O trabalho apresentou uma análise na variação dos indicadores de viabilidade econômica VPL, TIR, Tempo de Retorno, para dois casos de análise de Alternativas de Investimento.

A principal conclusão foi verificar que a probabilidade de que a alternativa do caso 2 apresente Valor Presente menor do que zero foi igual a P=0%

(ver tabela 15). Deste modo, a alternativa torna-se totalmente viável.

A variação encontrada nos resultados foram devidos a fatores reais do dia a dia de uma empresa, como por exemplo, o trabalho em regime de hora extra, ocasionado um aumento das horas de funcionamento do sistema e conseqüentemente um maior consumo de energia. Ou talvez o esquecimento de parte do sistema ligado.

Outros fatores tais como a vida útil das lâmpadas e reatores e o cumprimento da política de manutenção da empresa, limpando as luminárias, trocando-se as lâmpadas e reatores quando atingirem as suas vidas médias, mesmo estando em funcionamento, nem sempre é obedecido. Por estes e outros motivos é que a análise através da simulação considerando as incertezas deve ser realizada.

Um ponto muito importante para tal simulação, deve ser a determinação das variáveis mais sensíveis para a rentabilidade do investimento. No caso apresentado esta análise não foi realizada por completo, mas foi simulada, através da variação das horas de funcionamento do sistema. O objetivo da determinação destas variáveis sensíveis é o fato de se ter ou não a necessidade de controle sobre as mesmas. No caso apresentado, um timer para que as lâmpadas se apagassem após o expediente, poderia ser instalado, evitando deste modo o consumo desnecessário em caso de esquecimento.

Outra conclusão importantíssima foi a determinação da taxa de juros máxima que o consumidor estaria disposto a pagar, sem ser necessário qualquer desembolso a mais em suas contas, para a implantação da alternativa. Taxa esta de 30,0755%aaca para o caso 1.

Estas técnicas podem ser encontradas em várias bibliografias [4], [5], [9].

Deve ser observado também que para não se abrir mão da qualidade do ambiente de trabalho sem deixar de conservar energia, deve-se buscar novas tecnologias, tais como lâmpadas fluorescentes com vida útil média superior a 20.000 horas em regimes de funcionamento de 10 em 10 horas [2].

IX. Referências

[1] Azarias Macedo Júnior - "Técnicas de Retrofitting de sistemas fluorescentes tubulares", Eletricidade Moderna, Setembro de 1996.

[2].Sylvania, "Lâmpadas Fluorescentes", Boletim Técnico de Engenharia - Maio de 1995.

[3] IES Lighiting Handbook Reference 1972.

[4] Oliveira J. A. N, "Engenharia Econômica: Uma Abordagem às Decisões de Investimento", S.P., Mc Graw Hill, 1982.

[5] Neves Cesar das, "Análise de Investimentos: Projetos Industriais e Engenharia Econômica", R. J., Zahar 1982.

[6] Hirschfeld, Henrique - "Engenharia Econômica e análise de custos", 5ª Ed., SP, Atlas 1992.

[7] Philips - "Manual de Iluminação", Philips Lighting Division, 1981.

[8] Siemens - "Electrical Installations Handbook - Part 2", Siemens AG, 1987.

[9] Pamplona, E.O. e Montevechi, J. A. B. - Apostila do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica - "Engenharia Econômica", EFEI - 199

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

ANEXO B

RESULTADOS DE UMA ANÁLISE DO IMPACTO DAS DEPRESSÕES DE TENSÃO SOBRE ALGUNS EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

A tabela abaixo apresenta a probabilidade de falha dos equipamentos devido a ocorrências de Depressão de Tensão.

Tabela B1 – Falha dos Equipamentos por Ano

Equipamentos	Número provável de falhas por ano	Probabilidade de falha(%) / ano
VCR's	1,84	3
Forno Microondas	0,44	1
Relógios	0,44	1
PLC's	3,0 - 29,59	4 - 41
ASD's	1,67 - 37,42	2 - 52
Relés Auxiliares	0,33 - 1,84	0,5 - 3
Microprocessador	0,33 - 1,84	0,5 - 3
Contatores	0,66 - 1,84	1,0 - 3

Fonte: [Abreu, 1997 - 1]

Conforme a tabela, os equipamentos que possuem maior probabilidade de apresentar falhas são os ASD'S e PLC's, pois os mesmos possuem ampla faixa de sensibilidade:

- PLC'S : 4 a 41%
- ASD'S : 2 a 52%

Os PLC's (Programmable Logic Controller) e o ASD'S são os equipamentos mais vulneráveis, pois a menor probabilidade de falha (2 a 4 %) é bem superior a menor probabilidade dos outros equipamentos (0,5 a 1%).

Os relés auxiliares e microprocessadores apresentaram probabilidades de falhas de operação equivalentes, isto é de 0,5 a 3%.

Dentre os equipamentos analisados os VCR'S são os mais sensíveis. Os relógios digitais e os fornos de microondas apresentaram probabilidades de falhas iguais (1%).

Tabela B2 - Resistividade Elétrica e Coeficiente de Temperatura

Material	Resistividade (ρ) $\Omega.mm^2/m$ a 20°C	Coeficientes de Temperatura (α_{20}) por K a 20°C
Condutor de Cobre	0,017241	$3,93 \times 10^{-3}$
Condutor de Alumínio	0,028264	$4,03 \times 10^{-3}$

Fonte: [NBR 11301, 1990], adaptado.

Tabela B3 - Valores Experimentais dos Coeficientes Ks e Kp para condutores de cobre.

Tipo de Condutor	Construção			
	Não Impregnada		Impregnada	
	Ks	Kp	Ks	Kp
Redondo Encordoado Normal	1	1	1	0,8
Redondo Compactado	1	1	1	0,8
Redondo Segmentado[1]	---	---	0,435	0,37

Fonte: [NBR 11301, 1990], adaptado.

Tabela B4 – Resistência máxima do condutor à corrente contínua a 20°C, R_{CC20}, [Ω/km].

SEÇÃO (mm^2)	Cabos NOFLAM	
	Trifólio	Espaçados 1D
	Rca (60Hz) [Ω/km]	Rca (60Hz) [Ω/km]
1,5	14,4777	14,4777
2,5	8,8661	8,8661
4	5,5159	5,5159
6	3,6853	3,6853
10	2,1897	2,1897
16	1,3762	1,3761
25	0,8703	0,8700
35	0,6276	0,6272
50	0,4639	0,4634
70	0,3220	0,3212
95	0,2327	0,2316
120	0,1854	0,1840
150	0,1513	0,1495
185	0,1221	0,1200
240	0,0949	0,0920
300	0,0777	0,0742
400	0,0634	0,0591
500	0,0526	0,0473

FONTE: [FICAP, 1998], adaptado.

[1] Os valores indicados se aplicam a condutores formados por quatro segmentos e seções até $1500mm^2$, tendo todas as camadas de fio a mesma direção de encordoamento.

ANEXO C

MEDIÇÕES EM LÂMPADAS REALIZADAS COM A UTILIZAÇÃO DO ANALISADOR DE REDES CIRCUTOR MODELO AR4

Cada medição representa uma lâmpada em teste ou um conjunto de lâmpadas.

1ª MEDICÃO	
Fabricante	LUPAQUAI IND. E COM. LTDA
Modelo	AROLUX - Circular com reator eletrônico
Potência	22 W ≡ 60W incandescente

2ª MEDICÃO	
Fabricante	General Eletric
Modelo	Biax - Eletronic Compact Fluorescent Bulb
Potência	20 W
Dados	FP = 0,9 THD = 33%

3ª MEDICÃO	
Fabricante	PHILIPS
Modelo	Energy Saver - PL - Eletrônico
Potência	23 W ≡ 100W incandescente

4ª MEDICÃO	
Fabricante	PHILIPS
Modelo	Energy Saver - PL - Eletrônico
Potência	20 W ≡ 60W incandescente

5ª MEDICÃO	
Fabricante	LUPAQUAI IND. E COM. LTDA
Modelo	AROLUX - Circular 12" reator eletrônico
Potência	32 W
Dados	FP = 0,4

6ª MEDICÃO	
Modelo	Duas lâmpadas da medição 5 em paralelo

7ª MEDICÃO	
Modelo	Duas lâmpadas da medição 1 em paralelo

8ª MEDICÃO	
Modelo	Três lâmpadas da medição 1 em paralelo

9ª MEDICÃO	
Modelo	Duas lâmpadas da medição 2 em paralelo

10ª MEDICÃO	
Modelo	Duas lâmpadas da medição 3 em paralelo

11ª MEDICÃO	
Modelo	Duas lâmpadas da medição 4 em paralelo

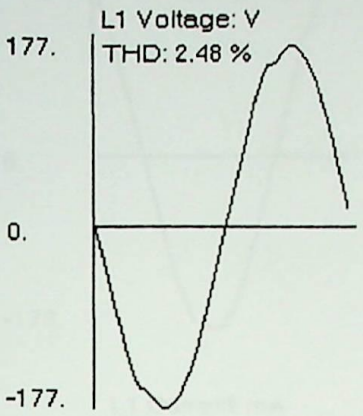
12ª MEDICÃO	
Fabricante	OSRAM
Modelo	Incandescente 127v
Potência	300 W
Dados	Padrão - Brasil

13ª MEDICÃO	
Modelo	2 lâmp. BIAX 20W 2 lâmp. PHILIPS 23W 2 lâmp. PHILIPS 20W 2 lâmp. Circulares AROLUX 32W fp=0.4 3 lâmp. Circulares AROLUX 22W
Dados	Potência para cada lâmpada.

Para os resultados que seguem, os valores de THD tanto de tensão quanto para corrente foram calculados conforme a norma IEC – 1000. Assim a equação usada foi a (2.19).

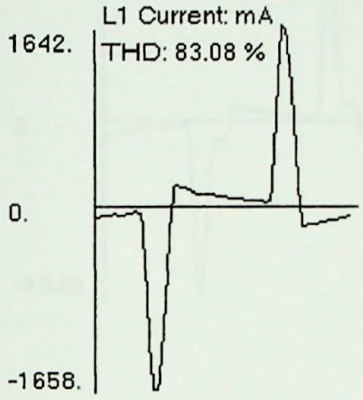
RESULTADOS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM LÂMPADAS

1ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 2.49 %

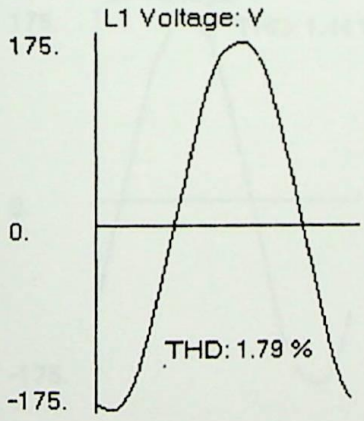
2	0.14
3	1.02
4	0.10
5	1.87
6	0.08
7	1.04
8	0.08
9	0.53
10	0.04
11	0.41
12	0.03
13	0.17
14	0.05
15	0.15



Irms:552. I1:306.
THD(I): 83.09 %

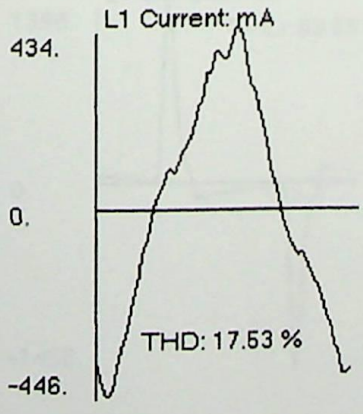
2	0.91
3	100.54
4	1.14
5	83.09
6	1.40
7	59.79
8	1.25
9	36.62
10	0.39
11	17.48
12	0.47
13	4.85
14	0.30
15	5.60

2ª MEDICÃO



Vrms:126. V1:125.
THD(V): 1.79 %

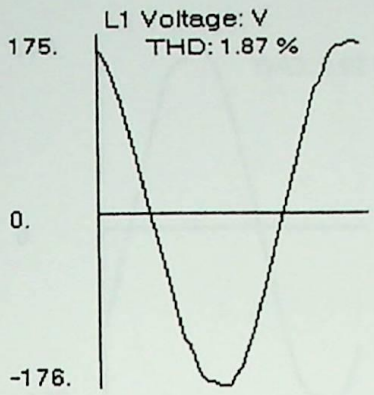
2	0.09
3	0.72
4	0.06
5	1.55
6	0.04
7	0.47
8	0.06
9	0.14
10	0.05
11	0.15
12	0.03
13	0.08
14	0.11
15	0.09



Irms:267. I1:262.
THD(I): 17.54 %

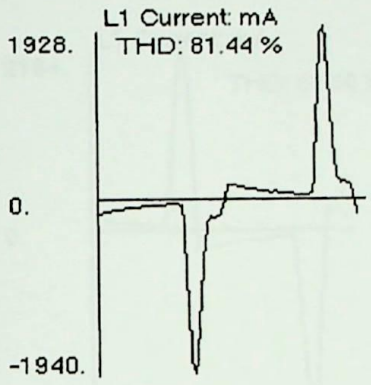
2	0.25
3	16.81
4	0.12
5	2.65
6	0.14
7	2.83
8	0.22
9	2.77
10	0.15
11	2.79
12	0.08
13	1.78
14	0.16
15	0.99

3ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 1.88 %

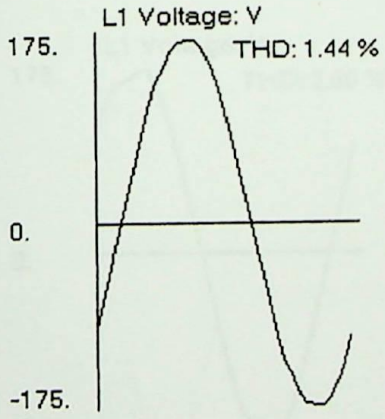
2	0.05
3	0.84
4	0.08
5	1.20
6	0.04
7	0.13
8	0.06
9	0.65
10	0.01
11	0.79
12	0.02
13	0.48
14	0.03
15	0.27



Irms:573. I1:331.
THD(I): 81.45 %

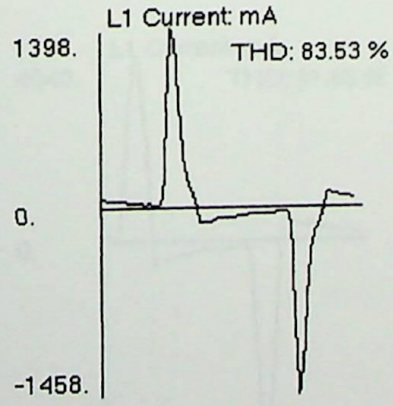
2	0.54
3	91.67
4	0.75
5	65.80
6	0.63
7	51.44
8	0.93
9	47.08
10	0.75
11	38.16
12	0.99
13	22.70
14	0.39
15	11.52

4ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 1.45 %

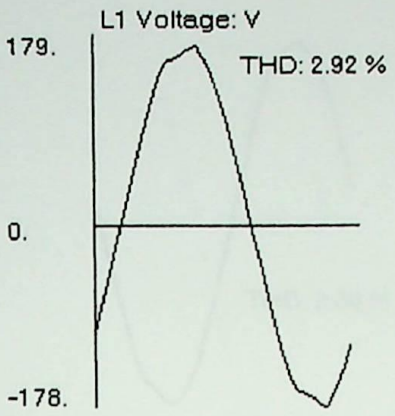
2	0.16
3	0.77
4	0.09
5	0.97
6	0.07
7	0.25
8	0.09
9	0.28
10	0.07
11	0.35
12	0.08
13	0.45
14	0.03
15	0.22



Irms:402. I1:219.
THD(I): 83.54 %

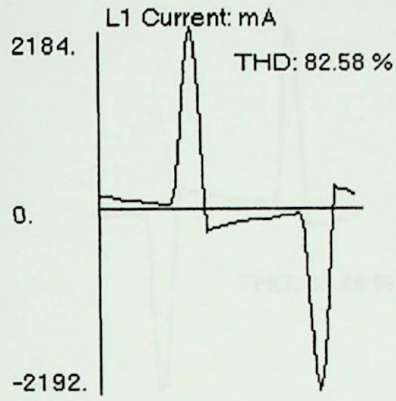
2	1.79
3	98.59
4	3.10
5	76.89
6	3.64
7	55.51
8	3.79
9	42.60
10	3.25
11	36.11
12	2.58
13	28.70
14	1.95
15	19.44

5ª MEDICÃO



Vrms:126. V1:125.
THD(V): 2.93 %

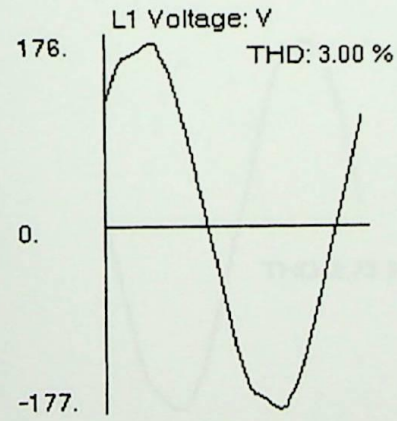
2	0.16
3	1.36
4	0.06
5	2.05
6	0.03
7	1.35
8	0.03
9	0.70
10	0.10
11	0.36
12	0.05
13	0.04
14	0.02
15	0.21



Irms:739. I1:416.
THD(I): 82.58 %

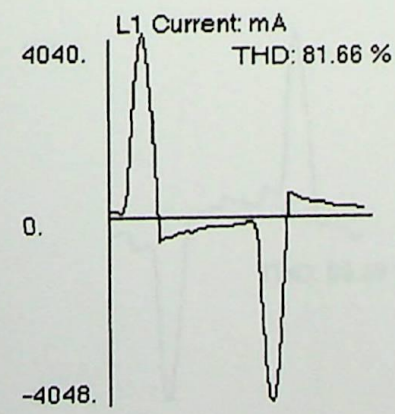
2	0.51
3	100.33
4	1.25
5	82.05
6	1.12
7	57.36
8	1.31
9	33.34
10	0.92
11	14.14
12	0.25
13	3.64
14	0.44
15	5.31

6ª MEDICÃO



Vrms:126. V1:125.
THD(V): 3.01 %

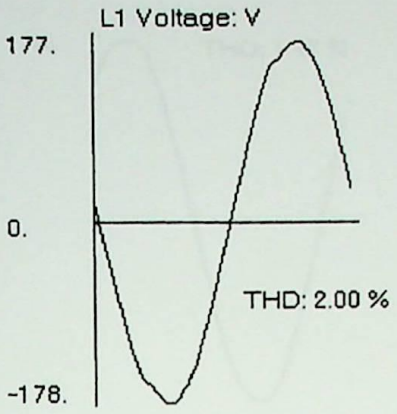
2	0.09
3	1.58
4	0.09
5	2.15
6	0.02
7	1.15
8	0.07
9	0.63
10	0.08
11	0.24
12	0.02
13	0.13
14	0.02
15	0.36



Irms:1424. I1:820.
THD(I): 81.66 %

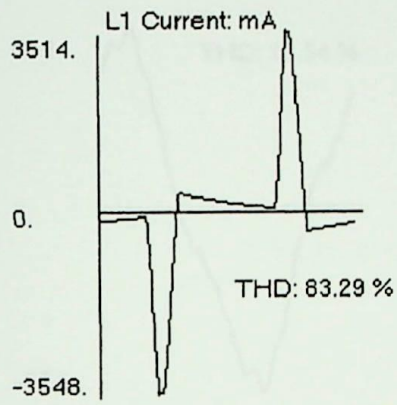
2	1.55
3	99.42
4	1.73
5	79.54
6	2.33
7	53.82
8	2.21
9	27.45
10	1.50
11	8.19
12	0.86
13	3.67
14	0.30
15	7.84

7ª MEDICÃO



Vrms:126. V1:125.
THD(V): 2.00 %

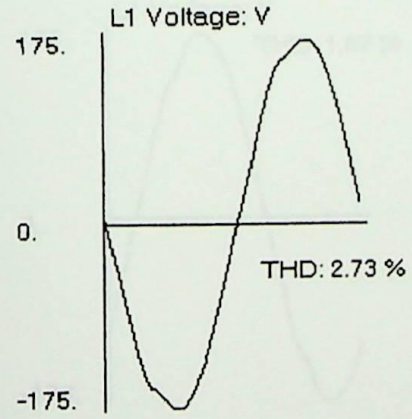
2	0.12
3	1.14
4	0.05
5	1.20
6	0.06
7	0.83
8	0.05
9	0.65
10	0.04
11	0.26
12	0.01
13	0.11
14	0.01
15	0.23



Irms:1173. I1:647.
THD(I): 83.30 %

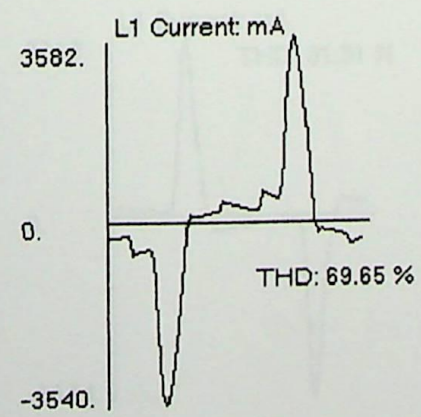
2	0.08
3	101.04
4	0.24
5	83.37
6	0.52
7	60.58
8	0.36
9	37.58
10	0.45
11	18.01
12	0.45
13	6.90
14	0.52
15	6.95

8ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 2.73 %

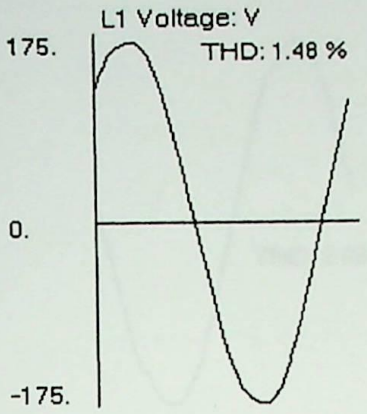
2	0.14
3	1.26
4	0.07
5	2.11
6	0.07
7	1.05
8	0.03
9	0.43
10	0.03
11	0.11
12	0.05
13	0.21
14	0.06
15	0.25



Irms:1300. I1:931.
THD(I): 69.65 %

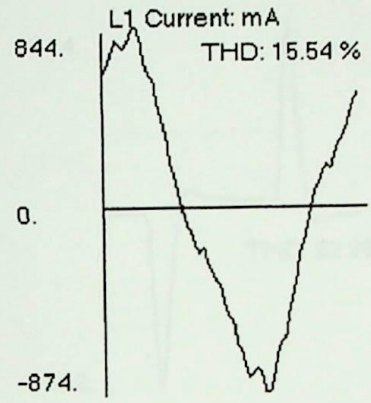
2	0.82
3	72.49
4	0.84
5	49.57
6	0.69
7	35.44
8	0.27
9	17.25
10	0.22
11	7.71
12	0.42
13	7.31
14	0.28
15	6.52

9ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 1.48 %

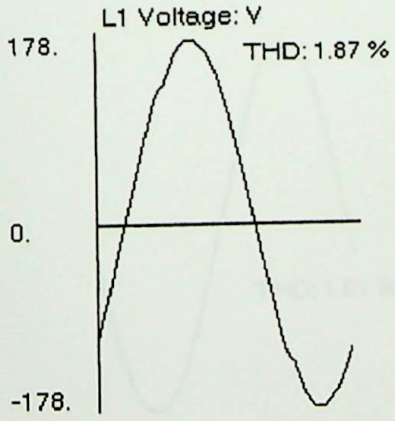
2	0.08
3	0.80
4	0.08
5	1.14
6	0.10
7	0.42
8	0.02
9	0.09
10	0.05
11	0.16
12	0.04
13	0.08
14	0.06
15	0.04



Irms:532. I1:524.
THD(I): 15.55 %

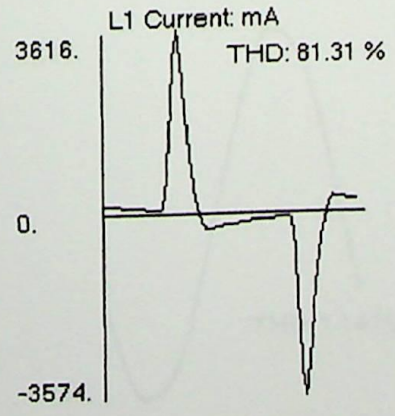
2	0.22
3	15.12
4	0.15
5	1.93
6	0.07
7	1.30
8	0.17
9	1.63
10	0.20
11	2.22
12	0.22
13	1.92
14	0.09
15	1.48

10ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 1.88 %

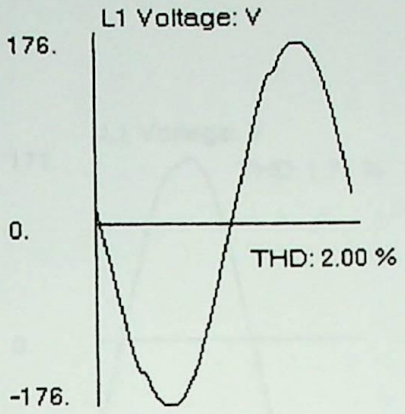
2	0.19
3	1.22
4	0.02
5	0.47
6	0.09
7	0.82
8	0.05
9	0.66
10	0.01
11	0.60
12	0.07
13	0.47
14	0.04
15	0.24



Irms:1106. I1:643.
THD(I): 81.31 %

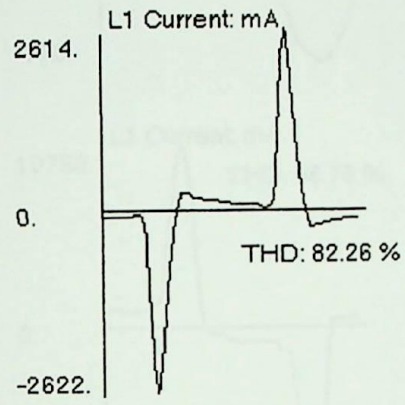
2	0.79
3	97.93
4	0.50
5	74.88
6	1.17
7	50.63
8	0.92
9	31.97
10	0.97
11	20.98
12	0.91
13	14.38
14	0.63
15	8.82

11ª MEDICÃO



Vrms:125. V1:125.
THD(V): 2.00 %

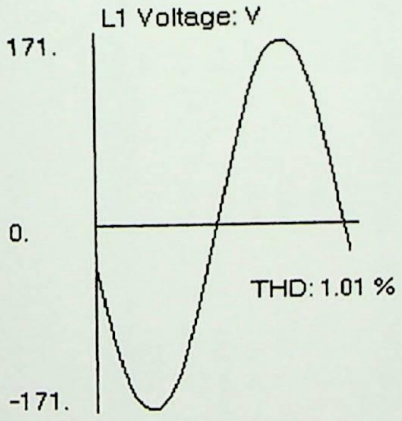
2	0.12
3	1.07
4	0.10
5	1.15
6	0.06
7	0.90
8	0.08
9	0.50
10	0.01
11	0.44
12	0.03
13	0.46
14	0.05
15	0.24



Irms:811. I1:461.
THD(I): 82.27 %

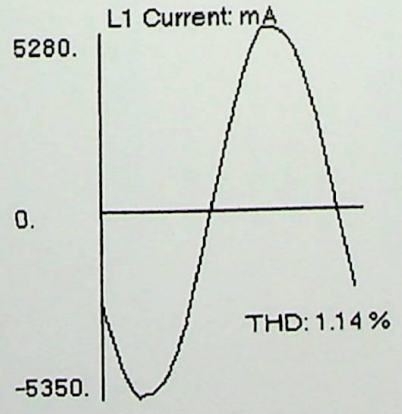
2	0.42
3	99.10
4	0.36
5	78.99
6	0.36
7	54.67
8	0.83
9	34.15
10	0.48
11	20.86
12	0.38
13	14.22
14	0.34
15	9.28

12ª MEDICÃO



Vrms:121. V1:121.
THD(V): 1.02 %

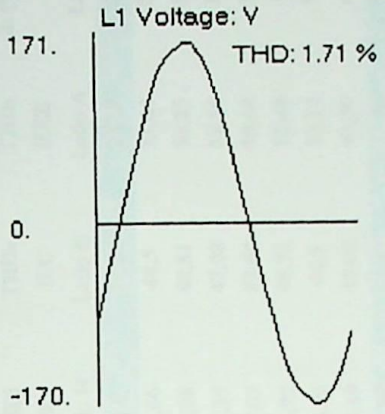
2	0.11
3	0.20
4	0.04
5	0.92
6	0.01
7	0.30
8	0.05
9	0.11
10	0.04
11	0.16
12	0.03
13	0.05
14	0.02
15	0.02



Irms:3784. I1:3783.
THD(I): 1.15 %

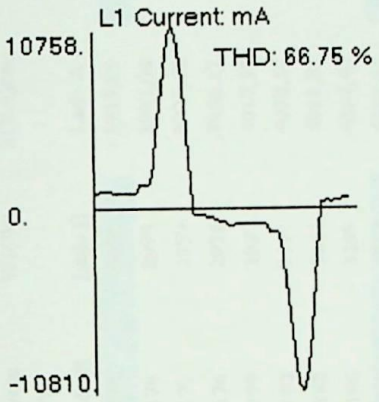
2	0.06
3	0.26
4	0.10
5	0.97
6	0.10
7	0.43
8	0.08
9	0.21
10	0.07
11	0.10
12	0.03
13	0.04
14	0.05
15	0.13

13ª MEDICÃO



Vrms:121. V1:120.
THD(V): 1.72 %

2	0.05
3	0.91
4	0.01
5	1.21
6	0.04
7	0.70
8	0.07
9	0.34
10	0.05
11	0.15
12	0.03
13	0.16
14	0.02
15	0.08



Irms:4269. I1:3176.
THD(I): 66.76 %

2	0.45
3	72.52
4	0.68
5	46.29
6	0.68
7	23.69
8	0.65
9	6.77
10	0.27
11	2.94
12	0.08
13	4.45
14	0.09
15	0.80

ANEXO D

MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS DA CARGA NÃO LINEAR EM TESTE.

TRI001 Data: 11/98 THDv do Lado A < 2,00%

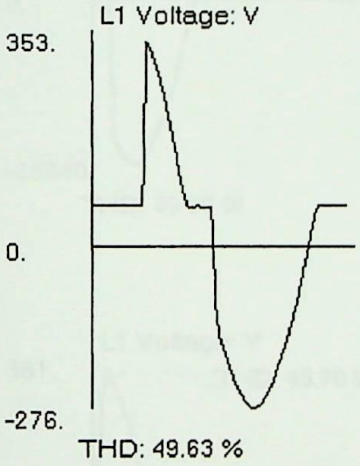
HORA	V1 (V) Lado A	A1(mA)	Arms(mA)	V1 (V) Lado B	Vrms (V) Lado B	W1(W) Lado B	S(VA)rms Lado A	THDi IEC Lado B	THDv IEC Lado B	THDi IEEE Lado A	Ih (% de I1) Lado A
17:15:00	239	14,316	16468	151	175	2892	3935,85	49,8	50,05	57,29	57,29
17:16:00	239	14,859	16724	155	178	2993	3997,04	47,66	48,5	53,64	53,64
17:17:00	239	14,517	16638	154	177	2959	3976,48	49,08	48,81	56,25	56,25
17:18:00	239	14,969	16553	159	176	2926	3956,17	47,35	47,08	52,36	52,36
17:19:00	239	14,811	16809	157	179	3027	4017,35	47,97	47,64	54,44	54,44
17:20:00	239	14,521	17065	154	182	3111	4078,54	48,92	48,71	57,49	57,49
17:21:00	239	15,142	17150	161	183	3161	4098,85	46,93	46,5	53,15	53,15
17:22:00	239	16,282	18345	173	196	3599	4384,46	43,49	43,06	49,00	49,00
17:23:00	239	16,928	18260	181	195	3565	4364,14	41,39	41,15	44,65	44,65
17:24:00	239	16,705	18260	178	196	3582	4364,14	42,3	42,01	46,24	46,24
17:25:00	239	16,394	18430	173	198	3666	4404,77	42,91	43,2	48,24	48,24
17:26:00	239	17,498	18857	184	202	3817	4506,82	38,72	39,56	41,73	41,73
17:27:00	239	17,177	18942	183	203	3868	4527,14	40,43	40,2	44,58	44,58
17:28:00	239	17,362	19028	186	204	3901	4547,69	39,88	39,48	43,71	43,71
17:29:00	239	17,238	19028	185	204	3901	4547,69	40,22	39,99	44,40	44,40
17:30:00	239	17,843	19113	190	206	3952	4568,01	37,17	37,3	39,82	39,82
17:31:00	239	17,893	19113	191	206	3952	4568,01	37,07	37,04	39,60	39,60
17:32:00	239	17,706	19113	190	206	3952	4568,01	37,74	37,54	40,74	40,74
17:33:00	239	17,771	19710	191	212	4204	4710,69	37,2	36,93	41,26	41,26
17:34:00	239	19,318	20137	207	217	4406	4812,74	30,65	30,78	31,95	31,95
17:35:00	239	19,14	20137	205	217	4389	4812,74	31,63	31,33	33,28	33,28
17:36:00	239	19,223	20052	205	216	4339	4792,43	30,93	31,62	32,26	32,26
17:37:00	239	18,891	20393	203	220	4507	4873,93	32,86	32,63	35,47	35,47
17:38:00	239	20,64	21161	222	229	4877	5057,48	23,34	23,04	23,93	23,93
17:39:00	239	20,45	20990	220	227	4793	5016,61	24,09	23,79	24,73	24,73
17:40:00	239	20,358	20990	219	227	4793	5016,61	24,93	24,61	25,70	25,70
17:41:00	239	20,574	21076	220	228	4809	5037,16	23,5	24,42	24,07	24,07
17:43:00	239	13,266	15444	142	167	2589	3691,12	50,22	50,21	58,47	58,47
17:44:00	239	13,48	15529	144	167	2606	3711,43	49,59	49,32	57,13	57,13
17:45:00	239	13,323	15615	143	168	2623	3731,99	49,96	49,64	58,55	58,55
17:46:00	239	13,946	15785	149	170	2690	3772,62	47,77	47,48	54,07	54,07

ANEXO E

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA O ESTUDO PRÁTICO
(Potências na Carga Resistiva)

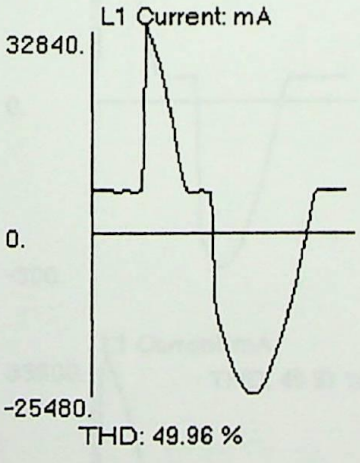
As formas de onda e o espectro harmônico se referem ao Ponto B, com excessão da corrente. Cabe observar que a corrente é a mesma para os pontos A e B.

POTÊNCIA: 2623 [W]



Vrms:166. V1:143.
THD(V): 49.64 %

2	47.60
3	11.74
4	11.69
5	18.59
6	12.51
7	4.07
8	4.92
9	8.25
10	5.87
11	2.49
12	4.98
13	5.76
14	4.11
15	1.55



Irms:15465. I1:13323.
THD(I): 49.96 %

2	48.20
3	11.33
4	11.52
5	18.73
6	12.80
7	4.44
8	4.66
9	8.06
10	6.07
11	2.46
12	4.90
13	5.84
14	4.32
15	1.35

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

POTÊNCIA: 2892 [W]

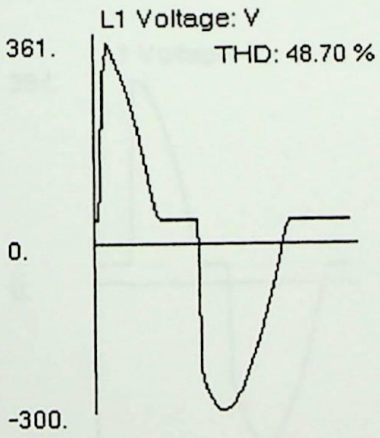
Vrms:176. V1:151.
THD(V): 50.05 %

2	33.88
3	30.20
4	25.29
5	8.92
6	11.94
7	10.70
8	1.34
9	10.63
10	6.65
11	3.68
12	7.91
13	3.01
14	5.35
15	5.81

Irms:16600. I1:14316.
THD(I): 49.80 %

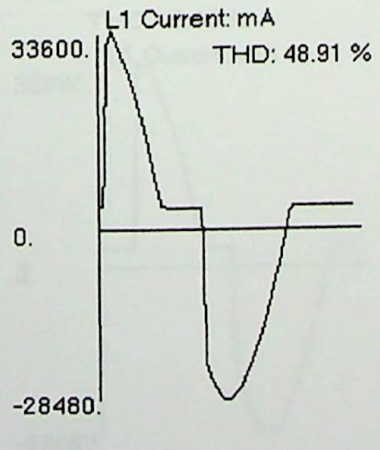
2	34.54
3	29.40
4	25.16
5	9.50
6	11.23
7	10.79
8	1.07
9	10.07
10	6.94
11	2.82
12	7.35
13	3.61
14	4.50
15	5.40

POTÊNCIA: 3111 [W]



Vrms:178. V1:154.
THD(V): 48.71 %

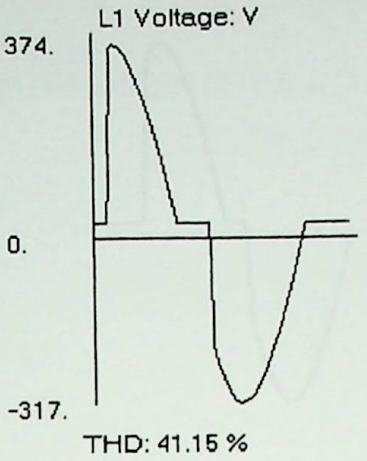
2	33.45
3	28.67
4	24.55
5	8.78
6	10.94
7	10.85
8	0.96
9	9.46
10	6.69
11	3.00
12	7.16
13	3.30
14	4.26
15	5.28



Irms:16750. I1:14521.
THD(I): 48.92 %

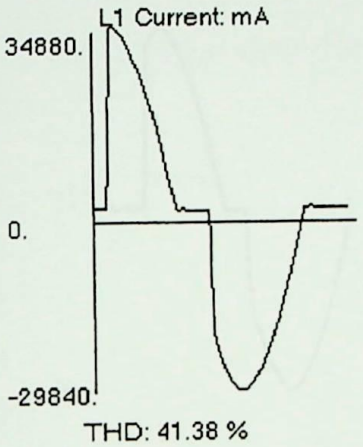
2	33.29
3	29.04
4	24.70
5	8.53
6	11.29
7	10.70
8	1.10
9	9.89
10	6.57
11	3.20
12	7.41
13	3.20
14	4.67
15	5.44

POTÊNCIA: 3565 [W]



Vrms:200. V1:181.
THD(V): 41.15 %

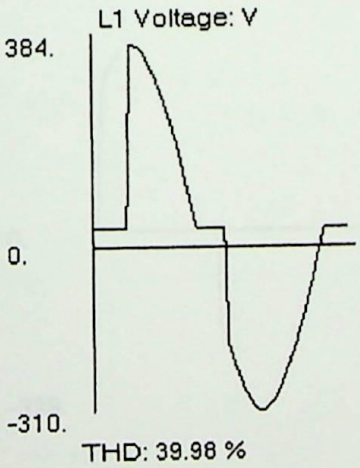
2	23.64
3	26.75
4	18.97
5	1.31
6	11.43
7	9.46
8	4.53
9	7.26
10	2.19
11	6.15
12	5.15
13	1.96
14	5.41
15	2.60



Irms:18706. I1:16928.
THD(I): 41.39 %

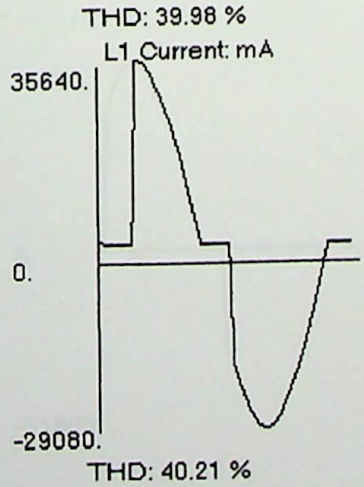
2	23.87
3	26.89
4	19.12
5	1.21
6	11.57
7	9.45
8	4.58
9	7.31
10	2.22
11	6.21
12	5.21
13	1.93
14	5.33
15	2.61

POTÊNCIA: 3901 [W]



Vrms:203. V1:185.
THD(V): 39.99 %

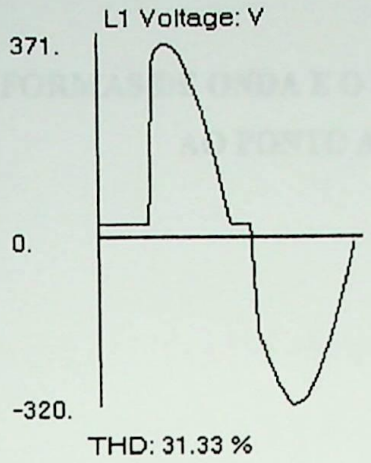
2	25.10
3	23.53
4	18.57
5	1.49
6	9.15
7	11.20
8	2.36
9	6.66
10	4.84
11	3.36
12	6.11
13	1.83
14	3.89
15	4.88



Irms:18922. I1:17238.
THD(I): 40.22 %

2	25.31
3	23.68
4	18.70
5	1.64
6	9.13
7	11.33
8	2.27
9	6.69
10	4.82
11	3.36
12	6.07
13	1.87
14	3.84
15	4.96

POTÊNCIA: 4389 [W]



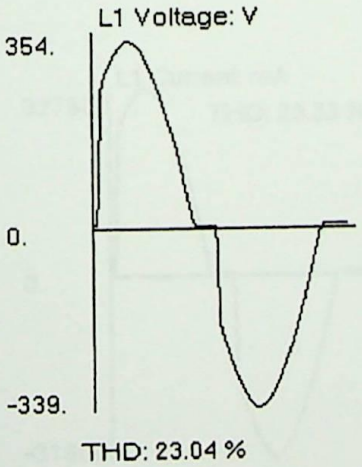
Vrms:217. V1:205.
THD(V): 31.33 %

2	16.72
3	19.46
4	13.41
5	5.53
6	8.91
7	5.30
8	4.07
9	6.58
10	1.83
11	4.22
12	3.19
13	2.29
14	3.72
15	1.58

Irms:20240. I1:19140.
THD(I): 31.63 %

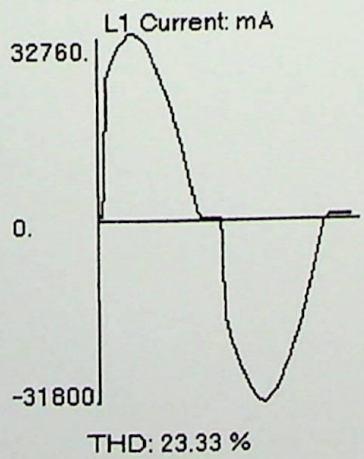
2	17.28
3	19.24
4	13.68
5	5.29
6	8.90
7	5.77
8	3.79
9	6.80
10	1.95
11	4.15
12	3.47
13	1.99
14	3.89
15	1.60

POTÊNCIA: 4877 [W]



Vrms:229. V1:222.
THD(V): 23.04 %

2	6.59
3	15.91
4	6.17
5	9.54
6	5.80
7	4.77
8	5.25
9	0.95
10	4.56
11	1.01
12	3.84
13	1.35
14	3.03
15	1.57

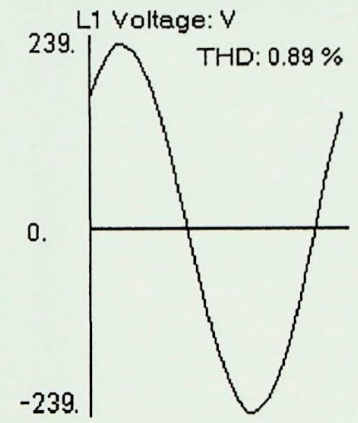


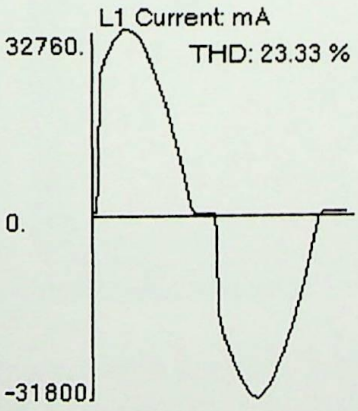
Irms:21282. I1:20640.
THD(I): 23.34 %

2	6.65
3	16.20
4	6.25
5	9.61
6	5.88
7	4.73
8	5.30
9	0.95
10	4.62
11	1.06
12	3.96
13	1.40
14	3.02
15	1.61

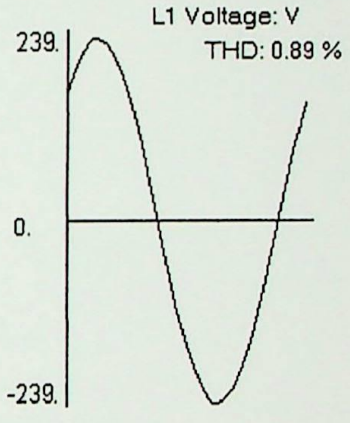
AS FORMAS DE ONDA E O ESPECTRO HARMÔNICO ABAIXO, SE REFEREM AO PONTO A, UTILIZADO NA METODOLOGIA.

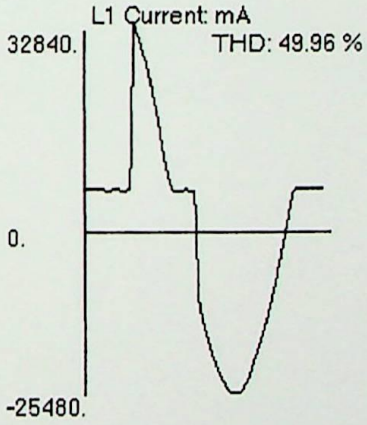
POTÊNCIA: 4877 [W]





POTÊNCIA: 2623 [W]





ANEXO F

FOLHETO DEMONSTRATIVO DE UM VARIADOR DE POTÊNCIA PARA CHUVEIRO RESIDENCIAL.

MANGUEIRAS

Controladores de Temperatura para Chuveiro

O Controlador de Temperatura Polibol, dá ao seu usuário a condição de reduzir o consumo de energia elétrica

Quando você está tomando o seu banho e deseja diminuir a temperatura da água, normalmente o que se faz, é aumentar a vazão da água que vai para o chuveiro, para que esta saia com uma temperatura menor, e sendo o chuveiro responsável por um grande consumo de energia elétrica em uma casa, a redução que o controlador Polibol proporciona é bastante considerável, pois ao diminuir a temperatura o controlador Polibol, não exige que aumente a vazão da água, mas sim ele diminui a energia elétrica que vai para o chuveiro.

Além disso, tem outras vantagens:

- **Economia de Água** - O controlador POLIBOL, também atua na economia de água, pois para diminuir a temperatura da água que sai do chuveiro, tem-se duas opções: Aumentar a vazão da água ou diminuir a potência do chuveiro. No entanto o controlador POLIBOL, atua na segunda opção, que é diminuir

a potência do chuveiro sem precisar gastar mais água.

- **Conforto nos banhos** - Com o uso do controlador POLIBOL, os banhos irão ficar mais confortáveis, pois ele oferece todas as temperaturas desejáveis em seu chuveiro..
- **Acréscimo na vida útil do chuveiro** - O chuveiro é um dos eletrodomésticos que tem maior potência elétrica, por isso também é o que mais está sujeito a dar problemas. Um problema comum nos chuveiros, é derreter a base onde está fixa a chave de mudança de temperatura (morno, frio e quente ou inverno, frio e verão). Isto acontece, devido ao grande número de acionamento desta chave, e também a forma de manuseá-la (as vezes até com pancadas), e sendo assim os contatos desta irão se folgar gerando mau contato em conseqüência um grande aquecimento onde irá derreter a base.

  Já com o uso do controlador POLIBOL, estes problemas não irão mais acontecer, pois não será necessário fazer as mudanças de temperatura na chave seletora do chuveiro e sim no controle do POLIBOL.

  Além disto, o controlador aumenta a durabilidade da resistência do chuveiro, pois esta nem sempre irá operar em sua potência máxima.
- **Elimina riscos de choques** - A energia elétrica é um grande benefício para nossa vida, mas se não tomarmos cuidado ela pode até matar. E quando estamos tomando banho, é um dos momentos que estamos em condições frágeis para com a energia elétrica, porque o nosso corpo está molhado e os pés não estão isolados do chão, porém se tocarmos em um chuveiro ou na haste deste sendo metálicos, o choque elétrico pode até ser fatal. Portanto é fácil colocar, que com o uso do controlador POLIBOL, o usuário terá menos risco de choques, pois com uso deste, uma vez feita a mudança de posição do chuveiro para o quente (inverno), não terá mais necessidade de manuseá-lo, e sim fazer as mudanças de temperatura no controle do POLIBOL.

Disponível em:

Cód. 10050	127V	(5800W - 45A)
Cód. 10051	220V	(6500W - 30A)

ANEXO G

Este trabalho resultou na apresentação e publicação de um artigo em seminário e em uma revista de circulação nacional e na apresentação de uma monografia em um curso de especialização.

O artigo apresentado foi:

"Interferência no Sistema Elétrico, Causado pela Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Consumidores Residenciais" II SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Novembro de 1997, São Lourenço, MG, Brasil.

"Interferência Causada pelo Uso de Fluorescentes Compactas em Residenciais" Revista Eletricidade Moderna, pgs. 134 – 142, Setembro de 1998.

"A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica", Monografia apresentada no Curso de Especialização sobre Reestruturação do Setor Elétrico e Novos Negócios em Eficiência Energética", Instituto de Economia, Grupo de Energia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Março a Junho de 1998.

SEGUNDO SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
SÃO LOURENÇO - MG - Novevembro de 1997

INTERFERÊNCIA NO SISTEMA ELÉTRICO CAUSADO PELA UTILIZAÇÃO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS

Jamil Haddad* Roberto A. Yamachita* Paulo Henrique R. P. Gama*
José K. Fujiwara** Antonio Carlos V. Delgado** Vanice Ferreira dos S. Dornellas***
* Escola Federal de Engenharia Itajubá - EFEI - Instituto de Engenharia Elétrica
Av. BPS, 1303 - 37500-000 - Itajubá/MG Tel.(035) 6291241 e-mail: jamil@iee.efei.rmg.br
** Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL *** Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Resumo - Este artigo apresenta os resultados de um programa da CPFL que incentiva a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes eletrônicas no segmento residencial, visando diminuir a demanda de potência e o consumo de energia elétrica no horário de ponta de carga do sistema. Como estas lâmpadas representam cargas não lineares, os harmônicos produzidos por elas também são analisados.
Palavras-chave - lâmpada fluorescente eletrônica, distorção harmônica, programa de substituição

Abstract - This article presents the results of an incentive program by CPFL. This program sets the substitution of incandescent lamps by eletronic fluorescent for residential segment, aiming a redution in power demand and energy comsumption during electrical systems peak time. As those lamps represents non-linear loads, the harmonics generated by them are also studied.
Keywords - eletronic fluorescent lamp, harmonic distortion, substitution program

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico surgiram no mercado sistemas de iluminação eficientes, como por exemplo, a família de lâmpadas fluorescentes eletrônicas.

Devido ao grande "marketing" feito sobre a necessidade de substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes eletrônicas, torna-se necessário uma análise não só do ponto de vista de redução de custos mas também sobre os aspectos da qualidade de energia, pois estas lâmpadas representam cargas não-lineares para o sistema elétrico.

2. HARMÔNICOS

Os medidores de kWh são afetados pelas componentes harmônicas, particularmente se existirem condições de ressonância resultando em altas tensões e correntes no circuito [1]. Equipamentos que utilizam discos de indução, normalmente medem só a corrente fundamental, porém, o desbalanço causado pela distorção harmônica pode gerar erros na medição dos mesmos.

Estudos [2], [3] tem mostrado que ambos os erros, para mais ou para menos, são possíveis quando a distorção harmônica está presente, dependendo do tipo de medidor, e das harmônicas

4. Fator de Dispersão (Kd) = Relação entre a soma vetorial e a soma algébrica das correntes harmônicas de determinada ordem, geradas pelas cargas existentes - na determinação do fator de dispersão, pode-se considerar uma distribuição estatística para os ângulos de fase das correntes envolvidas. Em geral, o fator de distorção deve ser alto (> 20%) para resultar em erros significativos.

Iluminação de descarga, tais como as lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio e vapor de sódio de alta pressão, apresentam características totalmente não-lineares, e por isso distorcem as formas de onda de tensão e corrente [4]. Como mostrado posteriormente os níveis harmônicos de corrente são altos implicando em efeitos como:

- Quedas de tensão significativas para o sistema elétrico;
- Baixo fator de potência para as instalações;
- Aumento das perdas por histerese e correntes parasitas nos transformadores;

Somatório de Harmônicos

Em um sistema composto por várias fontes harmônicas, a intensidade da componente harmônica resultante depende de vários fatores, tais como [5]:

1. O ângulo de fase de cada harmônico;
2. Fator de Saturação (Ks) = relação entre o número de consumidores que possuem a carga geradora de harmônicos e o número total de consumidores;
3. Fator de Simultaneidade (Kv) = relação entre o número de consumidores cujas cargas estão em funcionamento em determinado horário e o número de consumidores que possuem tal carga. harmônicas entre os limites definidos de acordo com o tipo da carga geradora de harmônico.

Deste modo, consegue-se determinar as correntes harmônicas em uma determinada barra do sistema, resultante da operação de um número elevado de cargas geradoras de harmônicos, através da seguinte fórmula:

$$Ih_R = Ks \cdot Kd \cdot Kv \cdot N \cdot Ih$$

onde:
h = ordem harmônica;
Ih_R = Corrente harmônica resultante;
Ih = Corrente harmônica gerada por uma única carga;
Ks, Kd e Kv definidos conforme anteriormente;
N = Número de consumidores residenciais alimentados pela barra em análise;

3.CASO PRÁTICO CPFL

Como exemplo de um caso prático tem-se o programa de incentivo implantado pela Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL em cidades do interior do Estado de São Paulo, para substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes eletrônicas no segmento residencial, visando diminuir a demanda de potência e o consumo de energia no horário de ponta do sistema elétrico.

Esta experiência de saturação de residências com lâmpadas busca avaliar as conseqüências da instalação concentrada de lâmpadas fluorescentes, com base tipo rosca, que utilizam reatores eletrônicos incorporados de alto e baixo fator de potência (FP).

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram instalados equipamentos de medição nas residências e no transformador de distribuição responsável pelo suprimento destas cargas. Entre as grandezas medidas e analisadas tem-se o consumo de potência reativa, demanda de energia e o fator de potência.

Após dois meses , todas as lâmpadas incandescentes (LI) de oito consumidores residenciais (60 lâmpadas) foram substituídas por lâmpadas fluorescentes eletrônicas com reator de baixo FP (LbFP). Passados mais dois meses, estas, foram substituídas por outras lâmpadas com reator de alto FP (LaFP), que são descritas a seguir:

L1 - Compacta de 15 W com reator de baixo FP.
L2 - Compacta de 23 W com reator de baixo FP.
L3 - Circular de 22 W com reator de baixo FP.
L4 - Circular de 32 W com reator de baixo FP.
L5 - Compacta de 20 W com reator de alto FP.
L6 - Circular de 22 W com reator de alto FP.
L7 - Circular de 32 W com reator de alto FP.

Durante as medições de campo foram aplicados questionários de posse e hábitos dos consumidores para avaliar o grau de aceitação e satisfação destas lâmpadas. A seguir, tem-se uma análise considerando o consumidor e a concessionária.

- ***Do ponto de vista do consumidor:*** A redução de energia se torna evidente pela substituição da lâmpada incandescente pela fluorescente de baixo e alto FP.

Esta redução pode ser apresentada pela curva de Demanda média (gráficos 1 e 2) de uma residência em análise para dias úteis e não úteis. A influência da iluminação na carga total da residência em análise se torna mais acentuado a partir das 22 horas.

O período de medição com lâmpadas incandescentes foi de 26/01 a 22/02/95. Com fluorescente de baixo FP foi de 09/03 a 15/03/95 e para o de Alto FP 12/05 a 11/06/95.

- ***Do ponto de vista da Concessionária:*** Por um lado o transformador que alimenta as residências em estudo fica menos sobrecarregado. Mas por outro lado, ocorre um aumento da potência reativa do circuito. Isto acontece pelo fato das lâmpadas apresentarem um fator de potência abaixo do unitário comparado com as incandescentes.

É importante observar que as medições foram feitas em épocas distintas, ou melhor, a medição com a incandescente foi realizado num período em que vigorava o horário de verão. Deste modo os valores a serem comparados estão defasados em relação à curva das outras lâmpadas, resultando desta forma, num deslocamento da curva de demanda das lâmpadas LbFP e LaFP (gráficos 3 e 4) para a esquerda. A partir das 22 horas verifica-se que a demanda de energia com as lâmpadas incandescentes torna-se maior em relação às outras lâmpadas.

Por outro lado, a potência reativa é aumentada quando da substituição da lâmpada LI pela LbFP (gráficos 5 e 6). A mesma observação feita com relação ao período do horário de verão e a sazonalidade da época de medição deve ser levada em consideração.

Os gráficos 7 e 8 mostram os fatores de potência das medições com as respectivas lâmpadas.

Os períodos de medição no transformador foram:

LI - 15/02/95 a 07/03/95
LbFP - 07/04/95 a 01/05/95
LaFP - 03/05/95 a 18/06/95

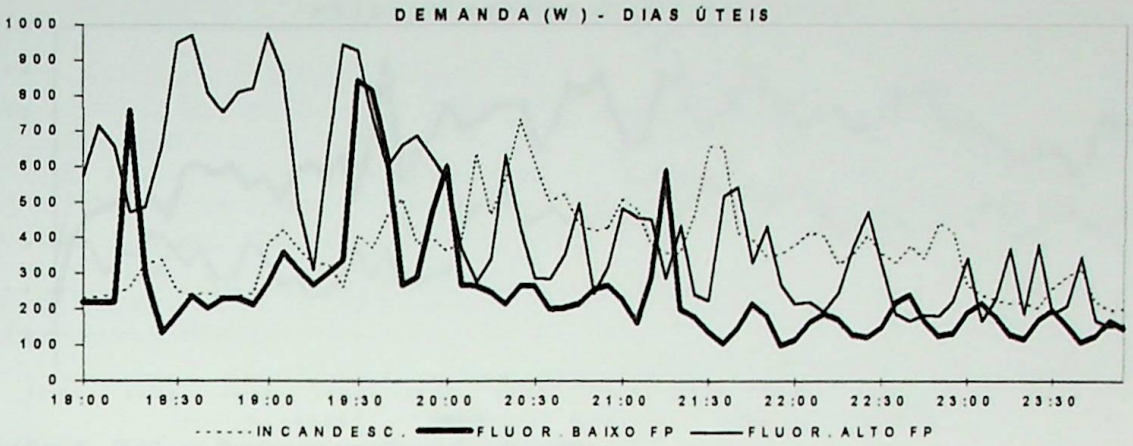


Gráfico 1 - Demanda de energia de um consumidor, dias úteis

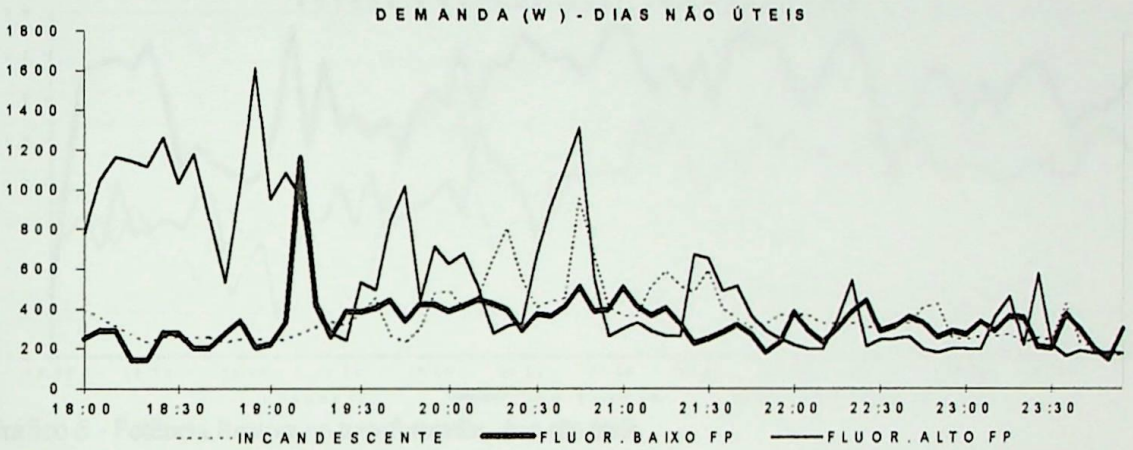


Gráfico 2 - Demanda de energia de um consumidor, dias não úteis

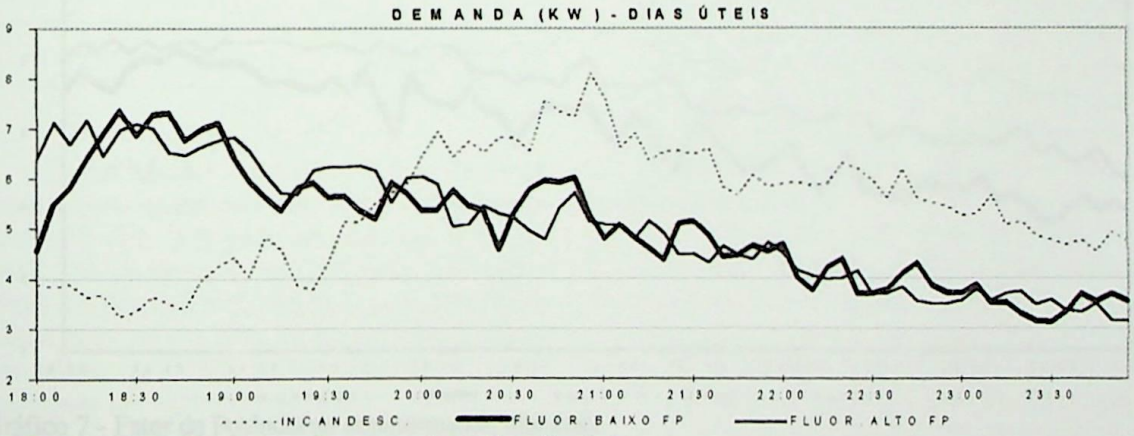


Gráfico 3 - Demanda de energia no transformador, dias úteis

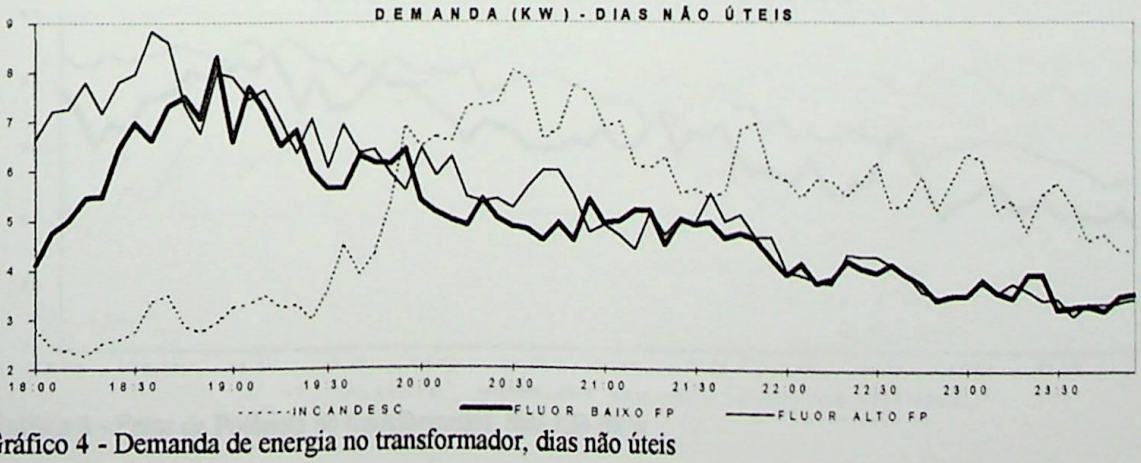


Gráfico 4 - Demanda de energia no transformador, dias não úteis

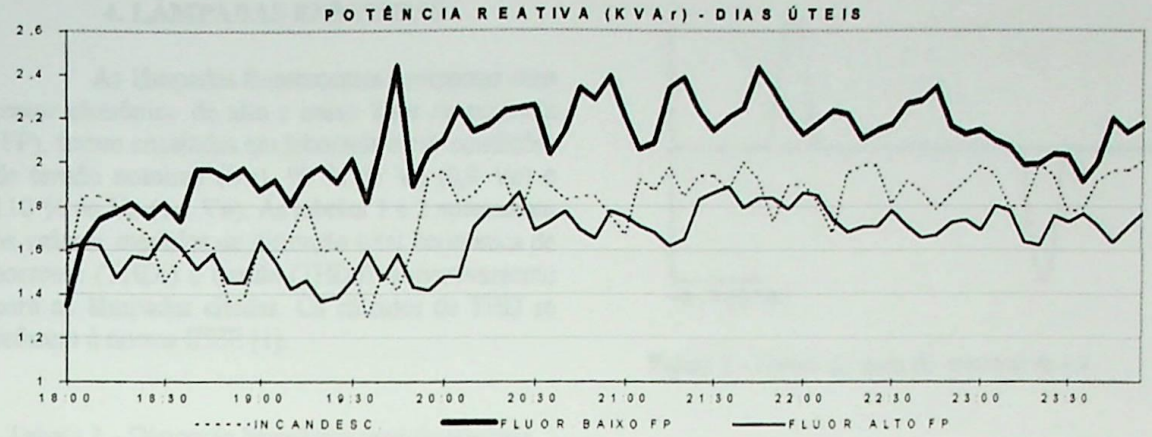


Gráfico 5 - Potência Reativa no transformador, dias úteis

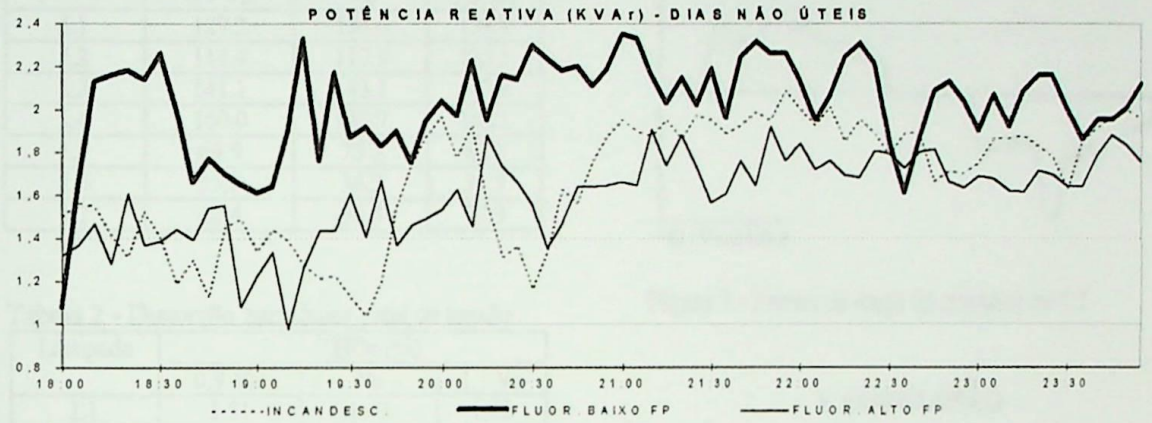


Gráfico 6 - Potência Reativa no transformador, dias não úteis

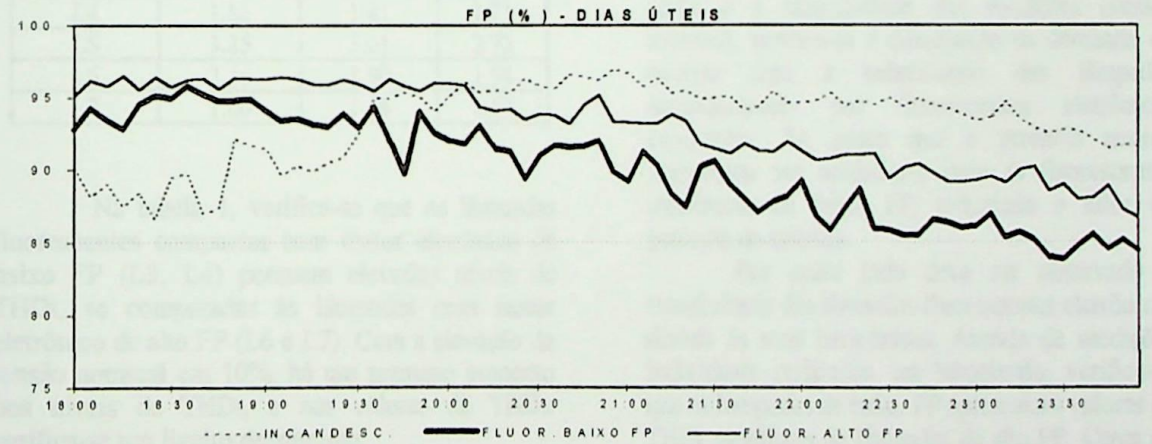


Gráfico 7 - Fator de Potência no transformador, dias úteis

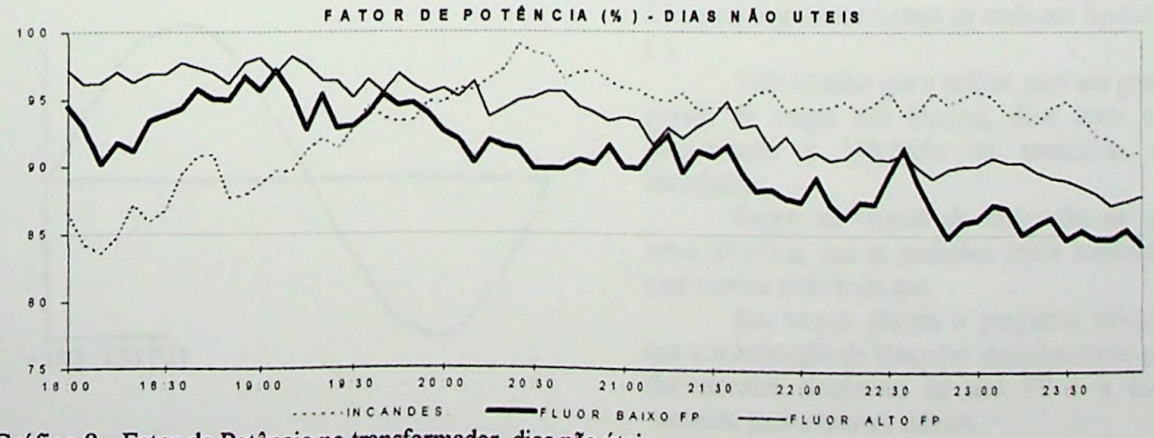


Gráfico 8 - Fator de Potência no transformador, dias não úteis

4. LÂMPADAS ENSAIADAS.

As lâmpadas fluorescentes compactas com reator eletrônico de alto e baixo fator de potência (FP), foram ensaiadas em laboratório sob condições de tensão nominal (Vn), 90 % de Vn (0,9 Vn) e 110 % de Vn (1,1 Vn). As tabelas 1 e 2 apresentam os valores medidos de distorção total harmônica de corrente (THDi) e tensão (THDu) respectivamente para as lâmpadas citadas. Os cálculos de THD se referem à norma IEEE [1].

Tabela 1 - Distorção harmônica total de corrente

Lâmpada	THDi (%)		
	0.9 Vn	Vn	1.1 Vn
L1	127.2	134.6	131.8
L2	114.4	117.9	125.1
L3	141.1	143.1	147.4
L4	160.0	159.7	168.1
L5	69.9	75.3	81.7
L6	35.8	36.2	37.5
L7	42.4	39.3	37.9

Tabela 2 - Distorção harmônica total de tensão

Lâmpada	THDu (%)		
	0.9 VN	Vn	1.1 Vn
L1	1.51	1.63	1.62
L2	1.44	1.56	1.51
L3	1.84	1.81	1.81
L4	1.86	1.81	1.71
L5	3.25	3.01	2.73
L6	2.16	1.90	1.94
L7	1.60	1.58	1.54

Na tabela 1, verifica-se que as lâmpadas fluorescentes compactas com reator eletrônico de baixo FP (L3, L4) possuem elevados níveis de THDi, se comparadas às lâmpadas com reator eletrônico de alto FP (L6 e L7). Com a elevação da tensão nominal em 10%, há um pequeno aumento nos níveis de THDi, e nos valores de THDu verifica-se um ligeiro decréscimo.

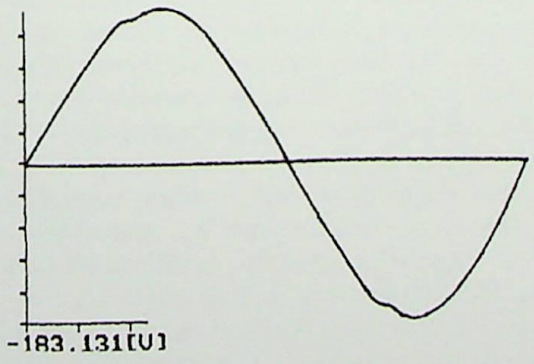


Figura 1 - Forma de onda da tensão de L4.

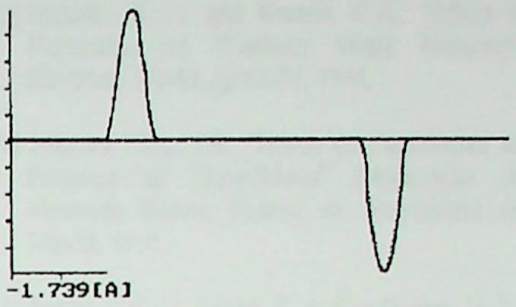


Figura 2 - Forma de onda da corrente de L4.

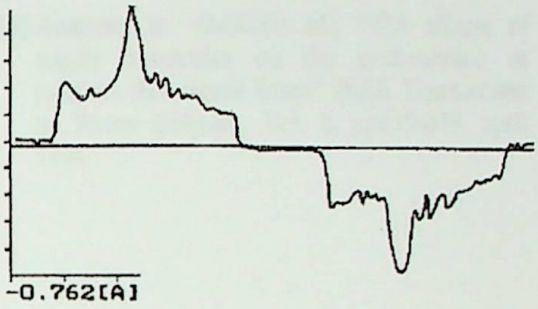


Figura 3 - Forma de onda da corrente de L7.

5. CONCLUSÃO

Levando-se em consideração o horário de verão e a sazonalidade das medições (verão-inverno), verifica-se a diminuição da demanda de energia com a substituição das lâmpadas incandescentes por fluorescentes eletrônicas compactas. Ao passo que a potência reativa apresentou um acréscimo, para as fluorescentes eletrônicas de baixo FP, reduzindo o fator de potência do sistema.

Por outro lado deve ser observado a interferência das lâmpadas fluorescentes eletrônicas devido às suas harmônicas. Através de medições individuais realizadas em laboratório, verifica-se que as lâmpadas de baixo FP apresentam valores de THDi superiores às lâmpadas de alto FP. Cerca de 4 vezes para uma lâmpada de mesma potência, sendo mostrado na tabela 1 com as lâmpadas L4 e L7 e suas respectivas formas de onda nas figuras 2 e 3.

Vale ressaltar que a análise, para um grupo grande de cargas não lineares, deve levar em consideração a influência do somatório de harmônicos.

Sugere-se, quando da realização de um novo programa, que as medições sejam realizadas num mesmo período do ano.

Em termos globais o programa mostrou que a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes eletrônicas de alto FP é a mais vantajosa para o sistema elétrico.

6. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a colaboração do aluno da EFEI, Ricardo Marques, pela ajuda na preparação dos arquivos de dados.

7. REFERÊNCIAS

[1] EEE Recommended Pratices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Std 519-1992,

[2] Baggot, A. J., " The Effects of Waveshape Distorcion on the Measurement of Energy by Tariff Meters" International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, pp 261-267, 1974,

[3] Faucett, M. A. and Keener, C.A., "Effect of Harmonics on Watthour Meter Accuracy" Electrical World, pp 82-84, 1945,

[4] Siqueira Filho, J.B. "Banco de Capacitores na Presença de Harmônicos" Dissertação de Mestrado Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1995,

[5] Rocha, A.C. O., Mello, C. A. F. e Gomes, H. N. "Harmônicos Causados pela Operação Simultânea de Televisores" Eletricidade Moderna, pp 234-242, 1997.

[6] Arseneau R., Ouellette M., "The effects of supply harmonics on the performance of compact fluorescent lamps" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, pp473-479, april 1994.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

A Qualidade da Energia Elétrica e sua Relação com a Conservação da Energia

Paulo Henrique R. P. Gama* Adilson de Oliveira**

* Mestrando da Escola Federal de Engenharia Itajubá - EFEI - Instituto de Engenharia Elétrica
Av. BPS, 1303 - 37500-000 - Itajubá/MG Tel.(035) 629-1311, e-mail: paulo_ramalho@hotmail.com
**Professor titular da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Instituto de Economia

Resumo - Através de alguns exemplos reais, este trabalho aborda a questão da Qualidade da Energia Elétrica e sua relação com a Conservação de energia. Determina as principais medidas de Conservação adotadas atualmente pelo PROCEL dentro dos programas de GLD, quantificando física e economicamente os efeitos destas sobre a Qualidade. Objetivando por fim levantar argumentos para que os programas de Conservação incluam em suas análises de viabilidade econômica as medidas de mitigação dos distúrbios gerados.

Palavras-chave - Conservação, Qualidade da Energia, Programas de Conservação e Qualidade.

1. INTRODUÇÃO

No passado, a questão da Qualidade da Energia Elétrica não era importante, por dois motivos principais: o primeiro deles porque a maioria dos usuários não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, já que seus processos e equipamentos não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade. O segundo deles está relacionado com as empresas brasileiras de eletricidade, pois a quase meio século, operaram dentro de um regime de monopólio de tarifas com base no custo do serviço. Significando que todo aumento ou redução de custos não implicava em aumento ou redução dos lucros.

Atualmente, a questão da Qualidade da Energia Elétrica surge como um fator muito mais relevante e de necessidade aos vários envolvidos no sistema elétrico. A deterioração da Qualidade pode provocar ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a comunidade.

A revista *Busines Week*[2], informava que a "poluição" elétrica estava custando cerca de US$ 26 bilhões por ano em danos e atitudes preventivas, só nos Estados Unidos. E a "poluição" está aumentando, calculando-se que para este fim de milênio, 60% da energia elétrica esteja circulando por cargas não-lineares. E que a maioria destas cargas serão do tipo eletrônica.

Diante de um mercado globalizado crescentemente competitivo, o assunto da Qualidade tem se tornado de fundamental importância no cenário econômico nacional, uma vez que os modernos processos industriais produtivos podem sofrer interrupções mais ou menos longas devido às variações momentâneas da tensão, implicando em significativas perdas econômicas. E também porque a sensibilidade dos equipamentos aos distúrbios originários do sistema elétrico tem aumentado.

Por outro lado a desregulamentação do setor elétrico incorpora uma mudança na atuação das empresas brasileiras de eletricidade, que reduzindo seus custos podem aumentar seus lucros, sem que a tarifa seja modificada.

[2] de 8 de Abril de 1991.

Ao lado das medidas propostas de conservação de energia, os serviços de melhoria da qualidade da energia elétrica também podem ser feitos pelas concessionárias e/ou pelo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Esta nova oportunidade de negócio, para as concessionárias, poderão ampliar os seus serviços e aumentar a sua competitividade[3] neste mercado desregulamentado.

Mas, para que os resultados destes novos serviços possam ser melhor obtidos, é de suma importância que exista uma Regulação Técnica por parte dos órgãos competentes, garantindo os níveis adequados dos distúrbios (referentes à qualidade da energia) e não permitindo que os problemas de outros consumidores inviabilizem o projeto de qualidade desenvolvido.

Deste modo, este artigo pretende, numa primeira etapa, abordar a questão da qualidade da energia elétrica, definindo e identificando os seus principais distúrbios e suas causas. O objetivo é mostrar algumas possíveis maneiras de se eliminar tais distúrbios, identificando com isso, quem são os principais responsáveis por tais atitudes e também interessados em adquirir energia de qualidade. Assim como também os possíveis "poluidores" do sistema responsáveis pela geração dos distúrbios.

Numa segunda etapa, o trabalho aborda o Programa de Conservação atualmente realizado pelo PROCEL. Iidentifica dentre os equipamentos eficientes, utilizados nestes programas de conservação, os que mais prejudicam a Qualidade da Energia, determinando quais os efeitos que estes equipamentos trazem para a qualidade.

Numa última etapa, realiza um esforço preliminar de quantificação destes efeitos sobre a qualidade da energia elétrica causados por algumas medidas de conservação e devidas aos distúrbios por elas apresentadas, quantificando física e economicamente a grandeza destes distúrbios. Esta última etapa se baseou em alguns casos reais.

[3] Ver Lonie, Bruce; "Utility Deregulation and Its Opportunities", PowerCET Corporation, Santa Clara, California, 1998

2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

DEFINIÇÃO

Qualidade da energia elétrica pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este último pelo lado do cliente), medidos no *ponto de entrega de energia*[4]. Se, entretanto, olharmos o problema sob o ponto de vista 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"*. [BRONZEADO, 1997].

Principais Distúrbios

Pesquisas realizadas nos EUA, patrocinadas pelo EPRI (Electrotechnical Power Research Institute), identificaram três distúrbios da QEE que mais tem afetado os consumidores: as *Variações Instantâneas de Tensão (Transitórios)* as *Depressões de Tensão (Voltage Sags)* e os *Harmônicos*. Estes distúrbios podem causar problemas, como os listados a seguir:

DEPRESSÃO DE TENSÃO

Principais problemas:

- Operação inadequada de equipamentos industriais PLC's, responsáveis pelo controle de processos industriais; de relés, responsáveis pela proteção do sistema elétrico; microprocessadores, componente usado em dispositivos de controle;
- Variação da velocidade ou parada de motores;
- Falhas em inversores de freqüência, usados para o controle de velocidade de motores;
- Perda de memória de equipamentos eletrônicos domésticos como vídeos, microondas e relógios digitais, entre outros;

HARMÔNICOS

Causam diversos problemas tanto para a concessionária quanto para os consumidores em geral, como:

- Operação incorreta de equipamentos de controle e proteção;
- Erros em medidores de energia ativa, utilizados nas indústrias, comércios e residências;
- Aumento das perdas em equipamentos como transformadores, motores, cabos, bancos de capacitores, etc.
- Aumento da corrente do neutro de transformadores;
- Interferência em sistema de comunicação;
- Redução do fator de potência;
- Sobretensão devido à circulação de correntes harmônicas.

A tabela 1 mostra o acréscimo de corrente devido às distorções harmônicas de corrente (THDi) causadas por cargas não lineares. Tomou-se como base uma corrente (fundamental) de 1 Ampère. E também os respectivos valores do fator de potência.

Tabela 1: Influência das harmônicas no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência.

Distorção na Corrente THDi - %	Acréscimo de corrente %	Fator de Potência total
0	0,00	1
10	0,50	0,995
30	4,40	0,958
50	11,80	0,894
70	22,07	0,819
90	34,54	0,743
100	41,42	0,707
120	56,20	0,640
150	80,28	0,555

TRANSITÓRIOS

Os transitórios, via de regra, provocam a degradação ou falha imediata nos isolamentos de equipamentos elétricos, falhas em fontes eletrônicas e desligamentos indevidos em acionamentos de velocidade variável usados em motores.

3. FATORES DETERMINANTES DA QUALIDADE

Alguns distúrbios da QEE podem ser solucionados. Estas soluções são chamadas de medidas de mitigação e/ou de eliminação. O importante aqui é salientar que tanto a Concessionária, como os Consumidores, Fabricantes de equipamentos/produtos e o Órgão Regulador, podem ser responsáveis pela melhora da Qualidade da Energia Elétrica (ofertantes da QEE), desde que tomem medidas preventivas ou corretivas para não poluírem o sistema elétrico, da seguinte forma:

1. Condicionamento de potência ao nível da carga, do equipamento ou na entrada do consumidor. Solução esta que depende do próprio consumidor, como utilização de No-Breacks; filtros harmônicos, outros.
2. Alterações no sistema da Concessionária, na rede do consumidor ou em procedimentos de operação. Solução esta que está diretamente relacionado com a Concessionária de energia.
3. Modificações no projeto das cargas, sensíveis aos distúrbios da qualidade. Depende dos fabricantes, pois são eles (na maioria das vezes) os responsáveis pelo projeto dos produtos e equipamentos utilizados no sistema elétrico.
4. O Órgão Regulador poderá garantir uma boa qualidade da energia ou através de normas de qualidade implantadas no País e regulamentações de níveis máximos dos distúrbios gerados pelos equipamentos e produtos de fabricação nacional ou proibindo os importados poluidores, ou talvez,

[4] Trata-se da fronteira entre as instalações da concessionária e as do consumidor.

através de uma mudança na estrutura tarifária do País, propondo a cobrança de algumas distorções, como por exemplo os harmônicos, da mesma forma como é feito para o fator de potência. Alguns trabalhos já propõem esta cobrança [Arango, 1997].

Torna-se óbvio que os envolvidos com o problema da qualidade não desejam "poluir" o sistema, pois muitas indústrias precisam de energia com boa qualidade, devido aos seus processos sensíveis; alguns consumidores comerciais e residenciais não desejam que seus produtos e serviços sejam prejudicados; e as concessionárias não querem ser as únicas responsáveis por danos e prejuízos causados pelos distúrbios originários da má qualidade, que muitas vezes são causados pelos próprios consumidores. Deste modo, aqueles que desejam uma melhor qualidade da energia deverão pagar mais pela mesma. Os que não precisarem ou não desejarem, não precisarão pagar a mais por ela.

4. OS PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E SEUS IMPACTOS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) [PROCEL, 1998], criado em dezembro de 1985 e instituído no ano seguinte, é um programa do governo, coordenado pelo Ministério das Minas e Energia e cujo controle de sua execução cabe à Eletrobrás. Tem por objetivo promover o combate ao desperdício de energia elétrica em todo o País. A economia de energia obtida a partir das ações do PROCEL contribui tanto para minimizar os investimentos necessários à expansão do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quanto para a redução de custos e a melhoria da qualidade de produtos e serviços oferecidos à sociedade.

O PROCEL estabelece metas de redução de desperdícios que são consideradas no planejamento formal do setor elétrico. Neste Planejamento é feito um Plano Estratégico para um horizonte de dez anos (Plano Decenal). A meta global no período 1996-2005 é obter uma economia progressiva de energia elétrica que deverá alcançar 130 milhões de MWh no ano de 2015.

Para atingir estas metas, o PROCEL tem centrado seu interesse nas seguintes áreas:

- elaboração de planos de ação para programas de combate ao desperdício;
- proposição de políticas e instrumentos legais/econômicos de incentivo;
- projetos de **Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD)**;
- programas de redução de perdas na oferta;
- **atuação no uso final** (residencial, industrial, comercial, rural e público);
- Entre Outros.

Destas alternativas de economia de energia, a **gerência pelo lado da demanda (GLD)** e a **atuação no uso final**, incluem diversas medidas, tais como sistemas tarifários diferenciados, programas educativos, auditorias energéticas, ou opções tecnológicas. A tabela 2 apresenta alguns exemplos de opções tecnológicas que podem e são utilizadas na gerência pelo lado da demanda pelo PROCEL.

Dentre as medidas tomadas através da **gerência pelo lado da demanda** e a **atuação no uso final**, merecem destaque o uso de alguns equipamentos / componentes, tais como:

- Controladores de Velocidade Variável para motores;
- Lâmpadas Fluorescentes Compactas;
- Controle de Iluminação através de *Dimmers;*
- Compensação de Potência Reativa através de bancos de capacitores.

Tabela 2: Algumas Alternativas Tecnológicas Utilizadas pelo Lado da Demanda

SETOR RESIDENCIAL	SETOR COMERCIAL	SETOR INDUSTRIAL
• Eletrodomésticos de alta eficiência (incluindo ar condicionado e bombas de calor para aquecimento ambiental e de água) • Iluminação eficiente através de lâmpadas fluorescentes compactas • Isolação Térmica de aquecedores de água • Torneiras e chuveiros de baixa vazão • Isolação térmica de prédios • Projeto de prédios energeticamente eficientes Filme solar para janelas • Controladores Programáveis • Aquecimento Solar • Etc.	• Iluminação fluorescente de alta eficiência • Controle de Iluminação (*dimmer*) • Sistema de controle de Demanda • Isolação térmica de prédios • Filme solar para janelas • Ar condicionado e bombas de calor de alta eficiência • Projeto de prédios energeticamente eficiente • Estudos de Retroffiting em Iluminação • Etc.	• Controladores ajustáveis de freqüência para motores • Compensação de Potência Reativa através de bancos de capacitores • Motores de alta eficiência • Iluminação interior e exterior com lâmpadas de sódio a alta pressão • Recuperação de calor de processo • Cogeração Industrial • Bombas de calor para processo • Equipamentos Eletrotérmicos • Recondutoramento de instalações

FONTE: [FINEP, 1989].

Estas medidas resultam em efeitos negativos sobre o sistema elétrico (ver tabela 3).

Pode-se, portanto, vincular perda de qualidade da energia elétrica a algumas medidas de conservação de energia.

Sendo o principal distúrbio causado por estes equipamentos a emissão harmônica.

Deste modo, deve-se atentar para estas medidas de conservação que tenham efeitos negativos sobre a Qualidade.

Tabela 3: Benefícios e Efeitos da Conservação sobre a Qualidade da Energia Elétrica

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	QUALIDADE DA ENERGIA	
Ação	**Benefício**	**Efeitos**
Instalação de Controladores de Velocidade Variável	Economia de Energia e possibilidade de gerência do controle dos fluxos	▪ Geração de Harmônicas ▪ Eliminação das "Voltage Sags" durante a partida de motores
Instalação de Lâmpadas Fluorescentes	Economia de Energia	▪ Geração de Harmônicos ▪ Susceptibilidade ao Flicker ▪ Redução do Fator de Potência
Instalação de Banco de Capacitores	Melhoria do Fator de Potência	▪ Geração de Transitórios ▪ Amplificação de Harmônicos
Controle da Iluminação através de *Dimmers*	Melhoria do fator de Carga	▪ Redução no Fator de potência ▪ Geração de Harmônicas ▪ Melhoria de tensão de regime permanente

Fonte: [Abreu - 1997 - 2]

5. UM ESFORÇO PRELIMINAR DE QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA CAUSADOS POR ALGUMAS MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO

Quantidades Físicas

1. Controladores de velocidade variável

O principal distúrbio causado por estes equipamentos é a distorção harmônica. Esta, é medida através do indicador THD (*Total Harmonic Distortion*).

Cada Controlador pode ter um nível diferente de distorção harmônica. Mas todos eles (por trabalharem com a eletrônica de potência) distorcem a forma de onda de corrente, implicando em emissões de corrente harmônicas.

A referência [KARL - 1991] mostra um exemplo do nível desta distorção deste equipamento, atingindo correntes harmônicas de 51,1% do valor da sua fundamental. Fazendo com que a corrente do circuito passasse de 6,6 (A) para 9,97 (A). Apresentando uma distorção de corrente de THDi = 113,3%.

Como perda é proporcional à corrente que circula no circuito de forma quadrática (Perda = Resistência x Corrente^2), tem-se um aumento de 128 % nestas perdas para este caso em análise.

2. Utilização de Lâmpadas Fluorescentes

A substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas, injeta níveis substanciais de harmônicos no sistema de distribuição secundária (220/127 V), (devido ao reator das mesmas), principalmente se for considerada a adoção disseminada desta prática por parte dos consumidores, implicando também na redução do fator de potência.

A tabela 4 mostra o grau desta distorção harmônica e a redução no fator de potência para um Retrofitting de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas em um edifício com carga total de 100kVA, conforme [R. R. Verderber, 1991]. As lâmpadas possuíam THD_i=115%.

Devido ao Retrofitting, houve um aumento na distorção harmônica de 0% (com incandescentes) para 23,5% com todas as lâmpadas sendo substituídas por fluorescente. E o fator de potência, inicialmente em 0,85 (com as incandescentes) caiu para 0,65 na situação final.

Tabela 4: Efeitos do Retrofitting de lâmpadas na Qualidade da Energia Elétrica

	Percentagem do Retrofitting com lâmpadas fluorescentes compactas			
	10	**25**	**50**	**100**
Distorção Harmônica Total de Corrente (%)	1,7	4,5	9,8	23,5
Fator de Potência Total	0,84	0,82	0,78	0,65

Fonte: [R. R. Verderber, 1991]

Outra característica das lâmpadas fluorescentes, é a sua sensibilidade (ou melhor, susceptibilidade) à Cintilação ("Flicker"), podendo ser contribuidora para as dores de cabeça e outros

problemas fisiológicos, conforme [A. J. Wilkins - 1988], prejudicando deste modo a qualidade do ambiente de trabalho.

3. Instalação de bancos de capacitores

A instalação de bancos de capacitores é a forma mais utilizada, pela indústria, para realizar a compensação de potência reativa.

Esta instalação, se não for bem executada, todos os benefícios que traria (como liberação do sistema para transmitir potência ativa, sem novos investimentos, além de facilitar o controle de tensão) serão anulados em função dos problemas de qualidade de energia que poderão surgir, tais como:
- amplificação do conteúdo harmônico presente no sistema, bem como seus malefícios sobre os diversos equipamentos;
- estabelecimento de condições de ressonância com conseqüentes sobretensões harmônicas;
- queima prematura dos bancos de capacitores devido ao aquecimento das unidades capacitivas sob condições harmônicas;
- introdução de transitórios de chaveamento, principalmente devido à necessidade de controle do fator de potência, segundo a média horária, podendo desligar processos industriais.

4. Controladores de intensidade luminosa (dimmers)

A referência [SAMIR - 1991] analisa a influência deste dispositivo verificando o fator de potência e a distorção harmônica como principais distúrbios desta medida de conservação.

Como resultados da referência, cita-se a redução do fator de potência de 0,99 para 0,31 com 100% do controle de iluminação (menor intensidade de luz), com uma distorção harmônica variando de 3,9% para 87,1% nesta última condição. E o aumento da 3ª harmônica de corrente, tomada para o autor como a mais significativa.

Quantidades Econômicas

Os itens abaixo apresentam alguns exemplos em que os autores quantificaram as perdas devido às distorções harmônicas e a instalação de bancos para correção do fator de potência. Demonstrando que este distúrbio (harmônico) gera custos, muitas vezes sendo quantificado somente quando acontecer algo mais grave como, por exemplo, substituição de equipamentos danificados.

Um caso real relatado na referência [JOSÉ BATISTA, 1998] mostra a perda de dois bancos de capacitores de 50 kVAr cada (representando cerca de R$15.000,00 no total, em valores de julho/95) em um prédio comercial devido aos problemas harmônicos. Cujas principais cargas eram: Lâmpadas fluorescentes; equipamentos de informática como computadores, estabilizadores de tensão, *no-breaks*; condicionadores de ar e inversores para controle da velocidade dos motores dos elevadores.

Em um trabalho realizado por José C. Nonato [JOSÉ CÉSAR, 1998], na Região de Taguatinga (DF), se os condomínios residenciais fossem faturados pela energia reativa, o valor da fatura corresponderia a 40% do que é faturado para a energia ativa atualmente, representando uma quantia de R$20,2 mil (em valores de julho/95). E que se as unidade consumidoras corrigissem o fator de potência para 0,92, seriam liberados para o sistema 29% da potência necessária para atendê-las (cerca de 223kVA). Sendo o custo dos capacitores, necessários para tal correção, pagos com vantagem num tempo de retorno de quatro meses. As principais cargas do condomínio eram: motores de elevadores, bombas d'água e lâmpadas fluorescentes.

Outro caso interessante é o efeito da redução harmônica em um Prédio Comercial relatado na referência [THOMAS, 1996]. Os principais equipamentos utilizados no Prédio Comercial eram: computadores, impressoras, fotocopiadoras, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos de alta eficiência e controladores de velocidade de motores. Em resumo, as perdas nos cabos elétricos foram verificadas em US$888 por ano. Já no transformador (que fornecia energia ao prédio) em US$1,203 por ano, totalizando US$2,101 dólares por ano, devido somente ao problema harmônico.
No mesmo estudo ele verificou que o transformador estava sobrecarregado, funcionando com apenas 50% da sua capacidade. Demonstrando que as perdas que ocasionavam isto eram devidas às harmônicas de corrente. Quantificou também o custo para a eliminação destas harmônicas através de filtros, sendo U$1440 para os 60kW de potência instalada, resultando num *pay-back* de 3.1 anos, levando-se em conta outras perdas e a eficiência do filtro adotado.

O exemplo a seguir determina o custo do consumo de energia de um Controlador de Velocidade Variável com e sem a condição harmônica. Este cálculo se baseia na **Nova Estrutura Tarifária** baseada na referência [Arango, 1997].

" Um Controlador de Velocidade Variável em funcionamento, consome da rede 3,2 kW de potência [KARL - 1991]. Se num cálculo hipotético ele funcionar 8 horas por dia e 24 dias ao mês (com fator de potência dentro dos limites permitidos > 0,92), totalizando 192 horas ligado, a Concessionária receberá por este consumo de energia um valor correspondente a R$73,73 para uma tarifa de R$120,00 o MWh (sem considerar os impostos).

Já, para o mesmo Controlador, se fosse cobrada a distorção harmônica que este causa ao sistema, a concessionária teria que cobrar pelo consumo desta energia, considerando o mesmo tempo de funcionamento, um valor final de

R$89,10 - implicando em um aumento de consumo próprio de 20,8% devido somente às distorções harmônicas.

Uma observação muito importante se faz necessária neste ponto. O cálculo anterior analisou o acréscimo do consumo devido às distorções harmônicas de corrente, para este único controlador. Mas, é sabido que quando várias cargas lineares e não-lineares são colocadas no sistema, existem compensações harmônicas [Gama, 1997] que na maioria das vezes diminuem os níveis destas distorções.

Deste modo, a tabela 5 calcula a perda de faturamento da concessionária devida às distorções harmônicas para vários níveis de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi), através do consumo não cobrado por elas. Demonstrando também a necessidade de mitigação/eliminação desta distorção por parte dos consumidores e da própria concessionária.

Para isto, considerou-se várias alternativas, onde o nível de mitigação desta distorção vai diminuindo de **100%** (significando que existe uma distorção harmônica total de corrente máxima permitida THDi = 20% (Supondo aqui uma utilização da capacidade do sistema de 20% para a distorção harmônica total de corrente. Este valor ainda não é consenso entre os especialistas mas já é adotado por algumas concessionárias norte americanas. Ver [R. R. Verderber - 1991]), onde nesta ocasião não existe cobrança da distorção) para um valor igual a **0%** (representando um valor de , por exemplo, 150% de distorção harmônica total de corrente presente no sistema - adotado). Foi suposto também que o fator de potência está em 0,92."

Com a tabela 5, verifica-se que caso não sejam tomadas providências no sentido de prevenir, mitigar ou eliminar as distorções harmônicas de corrente, estas poderão gerar perdas para a sociedade como um todo. Pois, atualmente elas não são cobradas dos seus respectivos poluidores implicando em perdas (técnicas) que são incorporadas na tarifa de energia elétrica, fazendo com que toda a sociedade pague por problemas, muitas vezes, devidos a alguns consumidores somente.

Tabela 5: Aumento no custo do consumo de energia para várias distorções harmônicas, baseado na nova definição de potência.

Nível de Mitigação (%)	*Distorção Harmônica Total de Corrente THDi (%)*	*Aumento no custo do consumo (%), não faturado pela Concessionária*
100	*20*	*0,00*
80	*30*	*2,31*
70	*45*	*7,47*
50	*75*	*22,50*
30	*105*	*42,10*
20	*120*	*53,08*
10	*135*	*64,64*
0	*150*	*76,67*

6. RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÃO

Recomendações

A partir destes resultados, cabe-nos uma pergunta: *Qual a percentagem dos danos causados pela má Qualidade da Energia Elétrica anualmente, que poderiam ser evitados caso a Conservação de Energia implantasse em seus programas as medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios por eles causados?*

A resposta para esta questão ainda não é fácil, tendo em vista que não existe um programa de qualidade implantado e que atualmente as empresas e concessionárias estão começando a dar relevância para estes problemas. Espera-se que com a QEE, a Eficiência Energética aumente, sem causar posteriormente danos aos processos. E que, de maneira genérica a satisfação social também aumente.

A qualidade da energia pode ser regulamentada pelo Órgão Regulador (nacional ou Estadual) de forma eficaz, para que os consumidores cativos (residenciais na maioria e alguns outros) não sejam prejudicados com o fornecimento da energia de baixa qualidade, num contexto de privatização das concessionárias no qual o país vem passando. Esta regulamentação do Orgão Regulador, pode ser através de duas medidas: A primeira, definindo novos indicadores para a qualidade da energia elétrica. E a segunda, através de uma estrutura tarifária mais adequada à realidade elétrica atual, com distorções. Caso seja a primeira a adotada, não basta somente realizar uma regulação, através destes indicadores, para as concessionárias. É preciso também que os problemas de geração de distúrbios dos equipamentos sejam normalizados, por exemplo, via ABNT, para que estes garantam os níveis de qualidade exigidos na regulamentação. Poderiam ser tomadas como base, para um ponto de partida, as normas internacionais IEEE 519-1992, ou a IEC 1000 para a questão dos harmônicos, que o

programa nacional de qualidade da energia não está levando em consideração.

Tendo em vista o escopo deste artigo, sugere-se que para esta questão de Regulação da Qualidade através de Indicadores para as Concessionárias ou Tarifa, sejam feitos estudos posteriores com intuito de se determinar a melhor opção.

Sugere-se que os programas de conservação implantados nas mais diversas áreas, incorporem em suas linhas de ação uma avaliação prévia dos equipamentos/produtos utilizados, visando quantificar os principais geradores de distúrbios e os níveis destes, para posteriormente sugerir a utilização dos mesmos. Para isto, o PROCEL deverá buscar juntamente com o Órgão Regulador as normas para a Qualidade da Energia.

Recomenda-se ainda uma metodologia mais adequada por parte do PROCEL, na atuação das suas medidas, podendo-se por exemplo, realizar simulações e estudos de casos relacionados com geração dos distúrbios provocados pelos equipamentos, visando antecipar possíveis problemas.

Não deve ser esquecido que outros problemas, tais como o desequilíbrio e a depressão de tensão, são também altamente prejudiciais para o sistema elétrico, piorando a QEE. Deve-se incluí-los também nas análises de caso.

O PROCEL poderá utilizar-se dessa necessidade de normalização dos distúrbios relacionados com a QEE para desenvolver relações institucionais com a Aneel. Poderão trabalhar em conjunto visando os objetivos de ambas as partes. Por um lado dando apoio na determinação de níveis permissíveis aos distúrbios e por outro a Aneel implantando, garantindo e fiscalizando tais limites.

Conclusões

A Qualidade da Energia Elétrica é um problema comum a todos os envolvidos com o sistema elétrico e de suma importância no contexto atual de vido às tecnologias mais sensíveis aos seus distúrbios e devido à mudança na atuação das empresas brasileiras de eletricidade do setor elétrico brasileiro.

Neste contexto, os distúrbios analisados anteriormente mostraram que são capazes de gerar prejuízos econômicos para a sociedade como um todo.

Como todos os consumidores podem ser demandantes e ofertantes da qualidade da energia elétrica, a responsabilidade pela geração dos distúrbios deve ser devida àquele que o gerar tendo que pagar mais pela alta qualidade solicitada, sem que este custo seja repassado aos demais consumidores, como atualmente é feito. Seria justo também que os consumidores ofertantes de qualidade recebessem por esta "virtude", pois houve um custo associado a esta característica relacionado com as medidas de mitigação/eliminação adotadas.

Devido ao crescimento do consumo de energia elétrica nos últimos anos, nas mais diversas áreas de consumo (industrial, comercial e residencial), e o aumento significativo nas vendas de eletroeletrônicos (muitos deles poluidores do sistema) também ocorridos, o sistema apresentará níveis cada vez piores de qualidade de energia, se nada for feito.

Por outro lado, algumas medidas tomadas no campo da conservação de energia, implicam em piora da qualidade da energia elétrica, gerando como principais problemas para a Qualidade de Energia os Harmônicos e a redução no fator de potência. Causando perdas econômicas em determinadas situações.

Torna-se fundamental a inclusão das medidas mitigadoras/eliminadoras dos problemas causados, nas análises econômicas de viabilidade dos programas propostos pelo PROCEL. Garantindo a verdadeira economia de energia muitas vezes esperada (e talvez até aumentá-la). E também tornando estas medidas mais eficientes do ponto de vista social, pois as perturbações geradas nos programas que não são cobradas, estão sendo pagas pela sociedade como um todo através da parcela de perdas técnicas incorporadas na própria tarifa de energia elétrica.

7. REFERÊNCIAS

A. J. Wilkins, et. alli., "Fluorescent Lighting, Headaches and Eye-Strain", presented at the National Lighting Conference - 1988.

ABRACE - Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia, "Ocorrência de Tensões e Correntes Harmônicas nos Sistemas Elétricos - Portaria em Elaboração pelo DNAEE, Apreciação da ABRACE", Relatório ABRACE; novembro 1985.

ABREU, José Policarpo de; José Maria C. Filho; Paulo L. Carvalho; "Impacto das Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos"; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

ABREU, José Policarpo de; José Maria C. Filho; Paulo L. Carvalho; Oliver Péricles O. Freiras; "Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica"; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997 - 2

ALOÍSIO de Oliveira, et. Alli., "Uma Contribuição para a Quantificação e Qualificação da Distorção Harmônica", - II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

Aneel, "Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica - Manual de Implantação" - Versão 4.0 - Janeiro de 1998.

ARANGO, Hector; et. alli.; " A Estrutura Tarifária no Brasil e sua Atualização para Ambientes Distorcidos", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

BRONZEADO H. S. - CHESF, Á. J. P. Ramos - CHESF, J. C. de Oliveira - UFU, J. P. G. de Abreu - EFEI, A. A. C. Arruda - ELETROPAULO, A. C. Brandão – CEMIG, II SBQEE – "Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições" Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

DKB - Desdner Kleinerwort Benson - Departamento de Pesquisa da Instituição Financeira DKB, "The Millennium Files" Latin America: Consumption Comes of Age, Londres, 1997

ELETROBRÁS, "Análise dos Comentários sobre a Minuta de Portaria Regulamentando os Critérios para Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais", Relatório SCEL/GTEE - 02/86, janeiro 1986.

EMANUEL, Alexander E.; "Apparent Power: A Practical Approach to its Resolution", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

FINEP - Capacitação para a Tomada de Decisões na Área de Energia - "O Planejador do Setor Elétrico: Desafios e Controvérsias"; Rio de Janeiro - 1989.

GAMA, Paulo Henrique R. P., et. alli., "Interferência no Sistema Elétrico Causado pela Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Consumidores Residenciais", II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

HEI, Hawaian Electrical Institute, 1998. Internet: http:\\www.hei.com

IEC 1000-4-7 International Standard Commission

IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System (ANSI).

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

JOSÉ BATISTA Siqueira Filho; Eudes Pontes da Silva; "Harmônicos e Capacitores em Prédios Comerciais: Análise de um Caso Real", Revista Eletricidade Moderna, No. 287, Fevereiro de 1998.

JOSÉ CÉSAR Nonato - "Faturamento de Energia Reativa em Condomínios Residenciais", Revista Eletricidade Moderna, Fevereiro de 1998

KARL Johnson, Electric Power Research Institute Palo Alto, California, and Robert ZAVADIL, Electrotek Concepts, Inc. Knoxville, Tennessee - "Assessing the Impacts of Nonlinear Loads on Power Quality in Commercial Buildings - An Overview", IEEE Transactions 1991.

LINDERS, John R.; IEEE Transactions on Industry Aplications, Vol.IA-1 5, NO. 5, September/October 1979.

MOHALLEM, Carlos Alberto; "Apostila de Qualidade da Energia Elétrica - Harmônicos; Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - EFEI, 1997

PROCEL - Internet: http:\www.eletrobras\procel - 1998

R. Christiansen, Sansung Semiconductor, San Jose, California - "Effects of High Levels of Harmonics from Lighting Equipment and Systems", IEEE Transactions - 1991.

R. R. Verderber, et. alli., "Harmonics From Compact Fluorescent Lamps", IEEE Transactions - 1991

RAMOS, Álvaro J. P. – CHESF; Daniel de Lira – Politécnica/UPE; Hervelto S. Bronzeado – CHESF; "Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Práticos" – II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997

SAMIR Datta, Senior Member, IEEE California Polytechnic State University - "Power Pollution Caused by Lighting Control Systems", IEEE Transactions 1991.

SECRETARIA_SP, Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, Comissão de Serviços Públicos de Energia, "Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica – Indicadores, Padrões e Penalidades – Versão 2, Julho de 1997

TATIANA Nesralla Ribeiro; Alexandre Francisco Maia Bueno; "Monitoramento e Diagnóstico da Qualidade da Energia Elétrica Fornecida a um Consumidor Industrial Atendido em Tensão de Distribuição"; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997

THOMAS S. Key and Jih-Sheng Lai; "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building", IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.32, No.5, September/October, 1996.

TOM Shaughnessy, "Power Factor, Harmonics and Harmonic Filter", Power CET, Santa Clara, CA, 1998.

YAMACHITA, Roberto A.; "Conservação de Energia Elétrica Utilizando Sistemas de Iluminação"; Dissertação de Mestrado - EFEI, Março de 1998.

Artigo apresentado como Monografia no "Curso de Reestruturação do Setor Elétrico e Novos Negócios em Eficiência Energética" realizado no Instituto de Economia da UFRJ, Rio de Janeiro, em Junho de 1998.