

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

RAFAEL JORGE PORT

**"UMA ANÁLISE APLICADA SOBRE
MEDIÇÃO E FATURAMENTO
DE POTÊNCIAS E ENERGIAS NÃO ATIVAS"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia da Energia*

Orientador: Prof. Jamil Haddad, Dr

Co-orientador: Prof. C. A. M. Guimarães, PhD

**Itajubá, MG - Brasil
2006**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

P839a

Port, Rafael Jorge

Uma análise aplicada sobre medição e faturamento de potências e energias não ativas / por Rafael Jorge Port. -- Itajubá,(MG) : [s.n.], 2006.

145 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Jamil Haddad.

Co-orientador : Prof. PhD Carlos Alberto Mohallem Guimarães.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Medidores. 2. Energia. 3. Harmônicos. 4. Protocolos. I. Haddad, Jamil, orient. II. Guimarães, Carlos Alberto Mohallem, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

CDU 621.317(043)



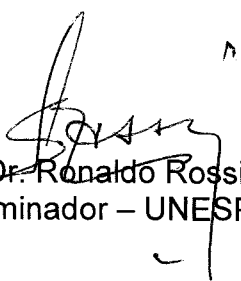
Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

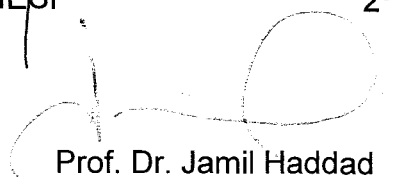
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 207, de 25 de maio de 2006, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Uma Análise Aplicada sobre Medição e Faturamento de Potências e Energias Não Ativas”**, apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia, na área de Concentração Planejamento Energético, satisfeitas as demais exigências regimentais a **Rafael Jorge Port.**

Itajubá, 26 de maio de 2006.


Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador – UNESP


Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni
2º Examinador – UNIFEI


Prof. Dr. Jamil Haddad
3º Examinador – UNIFEI – Orientador



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Uma Análise Aplicada sobre Medição e Faturamento de Potências e Energias Não Ativas”**

Autor: **RAFAEL JORGE PORT**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado R = Reprovado	
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: A ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 26 de maio de 2006.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador – UNESP

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Jamil Haddad
3º Examinador – UNIFEI – Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por conduzir-me em toda a minha trajetória durante este trabalho e por me abençoar nos momentos mais difíceis.

A Rita, minha noiva, por compreender e incentivar a realização de mais esta etapa em minha vida, sempre ao meu lado.

A minha mãe, Maria, pelo eterno apoio, acolhimento e bons pensamentos no intuito de colaborar para o alcance deste objetivo.

Aos amigos Domingos Sávio e Yvo, por me apoiarem em várias etapas desta jornada.

Ao meu irmão Gelson por incentivar-me ao iniciar este trabalho.

Ao meu primo Sérgio pelo auxílio nas tarefas mais difíceis.

Ao orientador Prof. Dr. Jamil Haddad pelos grandes ensinamentos.

Ao Prof. Hilton Moreno pela atenção sempre dedicada e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. MSc Roberto Akira pela atenção dedicada em todos os momentos.

Aos professores doutores Hector Arango, Paulo Márcio e Délvio pela disposição em auxiliar-me. Em especial, ao Prof. Dr. Mohallem pelos ensinamentos, empenho e dedicação no início deste trabalho.

A Dra. Mirabel pelo apoio e incentivo no término deste trabalho.

Ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) por incentivar a ampliação de meu conhecimento científico.

“A ciência está longe de conhecer o mundo de uma maneira perfeita e adequada; ela tem, no entanto, a pretensão legítima de descobrir para nós, em parte, a natureza e suas leis”

Jovielt

RESUMO

As cargas não lineares presentes em nosso cotidiano, tanto nas residências, como no comércio, trouxeram conforto para todas as classes da população, bem como facilitaram a operação e o controle de processos produtivos na indústria. Porém, este tipo de carga causa um fenômeno no sistema elétrico, a distorção harmônica, que provoca comprometimentos no controle da Qualidade de Energia Elétrica. Tal fenômeno, além de provocar o baixo fator de potência e, conseqüentemente, ocupar o sistema elétrico excessivamente, altera as formas de ondas dos sinais de tensão e corrente, perturbando o sistema de medição de energia elétrica. Primeiramente, este trabalho, evidencia a propagação da distorção harmônica nos sistemas elétricos apresentando dois estudos com vistas a cenários futuros. Em seguida, sob o enfoque dos novos protocolos de medição de energia que contabilizam a distorção harmônica, apresenta o desempenho dos medidores de energia quando submetidos a sinais distorcidos. É realizada uma análise de faturamento de um parque de medidores, por meio da comparação entre as medições feitas com a configuração atual instalada e um caso hipotético, no qual todos os medidores, diferentemente da configuração atual, contabilizam na metodologia de medição a presença das distorções harmônicas dos sinais. Após essa análise de faturamento, é estudada a possibilidade de substituição dos medidores.

ABSTRACT

The nonlinear loads presents in our daily, so much in the residences, as in the trade, brought comfort for all classes of the population, as well as facilitated the operation and the control of productive processes in the industry. However, this type of load causes a phenomenon in the electric system, the harmonic distortion, that causes losses in the control of the Power Quality. Such phenomenon, besides causing the low power factor and, consequently, to occupy the electric system excessively, it alters the waveforms of the voltage and current signals, disturbing the electric energy metering system. Firstly, this work, evidences the propagation of the harmonic distortion in the electric systems presenting two studies with views to future sceneries. Soon after, under the point of view of the new protocols of energy measurement that calculate the harmonic distortion, it presents the energy meters performance when submitted to the distorted signals. An Analysis of the meters park billing is accomplished through the comparison among the measurements done with the present configuration installed and a hypothetical case, in which all the meters, differently of the present configuration, calculate in the measurement methodology, the presence of the harmonic distortions of signals. After this billing analysis, it is studied the possibility of meters substitution.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiii
Introdução	xv
Capítulo I – O contexto da Qualidade de Energia Elétrica.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Proposição do trabalho.....	3
1.3 Apresentação de cada capítulo.....	4
 Capítulo II – Qualidade de Energia Elétrica.....	 5
2.1 Qualidade de Energia Elétrica.....	5
2.1.1 Perturbações.....	7
2.1.1.1 Sobretensões transitórias.....	7
2.1.1.2 Oscilações de tensão.....	8
2.1.1.3 Distorções na forma de onda.....	10
2.1.1.4 Flutuação de tensão e cintilação (<i>flicker</i>).....	11
2.1.1.5 Desbalanço de tensão.....	11
2.1.1.6 Variações de frequência.....	11
2.1.2 Distorção harmônica.....	12
2.1.3 Desbalanço de tensão.....	21
2.1.3.1 Fator de desbalanço.....	24
2.1.3.2 Métodos de mitigação.....	27
 Capítulo III – Propagação do fenômeno harmônico.....	 28
3.1 Abordagem preliminar.....	28
3.2 Normalização.....	30
3.3 Limites probabilísticos.....	34
3.4 Propagação do fenômeno harmônico.....	36

3.4.1 Caso 1.....	37
3.4.1.1 Metodologia do estudo.....	38
3.4.1.2 Resultados.....	42
3.4.2 Caso 2.....	43
3.4.2.1 Desenvolvimento do estudo.....	44
3.4.2.2 Metodologia de avaliação das distorções harmônicas.....	46
3.4.2.3 Simulações.....	48
3.4.2.4 Resultados.....	48
Capítulo IV – Novos protocolos de medição.....	51
4.1 Protocolo clássico.....	52
4.2 Novos protocolos.....	59
4.2.1 Potências em análise.....	62
4.2.1.1 A potência ativa “P”	64
4.2.1.2 A potência não ativa de deslocamento “Q”	65
4.2.1.3 A potência não ativa de distorção “D”	66
4.2.1.4 A potência não ativa de desequilíbrio “A”	68
4.2.2 Fator de potência global.....	71
Capítulo V – Desempenho dos medidores.....	72
5.1 Estado da arte.....	72
5.2 Abordagem sobre os medidores eletromecânicos e eletrônicos.....	74
5.2.1 Medidores eletromecânicos.....	75
5.2.1.1 Princípio de funcionamento.....	77
5.2.2 Medidores eletrônicos.....	79
5.2.2.1 Características técnicas gerais.....	80
5.2.2.2 Características construtivas.....	83
5.2.2.3 Características elétricas.....	84
5.2.2.4 Instalação dos medidores.....	85
5.2.2.4.1 Medição indireta.....	85
5.2.2.4.2 Medição direta.....	87
5.2.3 Comparação entre os medidores eletromecânicos e eletrônicos.....	88
5.3 Ensaios dos medidores.....	89

5.3.1 Medidores eletromecânicos.....	90
5.3.1.1 Metodologia dos testes.....	91
5.3.1.2 Resultados.....	94
5.3.1.3 Comentários.....	95
5.3.2 Medidores eletrônicos.....	96
5.3.2.1 Formas de onda.....	97
5.3.2.2 Resultados.....	99
5.3.2.3 Comentários.....	100
5.3.2.4 Erros globais prováveis.....	104
Capítulo VI – Análise de medição e faturamento.....	106
6.1 Parque de medição.....	106
6.1.1 Cálculo da distorção harmônica.....	108
6.1.2 Análise de faturamento.....	113
6.1.2.1 Cálculo do faturamento de excedente reativo.....	120
6.1.2.2 Análise econômica.....	121
6.1.2.3 Cenários futuros.....	124
6.1.3 Resultados.....	127
6.2 Considerações.....	135
Conclusão.....	136
Sugestões para trabalhos futuros.....	138
Referências bibliográficas.....	139
APÊNDICES	
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Problemas nas instalações elétricas
Figura 2.1	Crescimento de cargas não lineares nos Estados Unidos
Figura 2.2	Onda distorcida
Figura 2.3	Retificador monofásico
Figura 2.4	Forma de onda corrente x tempo
Figura 2.5	Espectro harmônico de corrente
Figura 2.6	Ponte retificadora com filtragem capacitiva
Figura 2.7	Corrente _(linha) x tempo
Figura 2.8	Espectro harmônico de corrente
Figura 2.9	Forma de onda da corrente de um televisor
Figura 2.10	Forma de onda da corrente de um forno de microondas
Figura 2.11	Forma de onda da corrente num dimmer (80%)
Figura 2.12	Forma de onda da corrente num dimmer (25%)
Figura 2.13	Contribuição dos equipamentos na demanda
Figura 2.14	Tensões desbalanceadas
Figura 2.15	Efeitos do fator de desbalanço em motores de indução trifásicos
Figura 3.1	Evolução da 5ª harmônica nas redes públicas européias
Figura 3.2	Formas de ondas das classes A, B e C
Figura 3.3	Caso IV (alimentador I)
Figura 3.4	Alimentador típico 11,9 kV
Figura 4.1	Formas de ondas da tensão, corrente e potência instantânea
Figura 4.2	Formas de ondas das parcelas da potência instantânea
Figura 5.1	Disco e núcleo do medidor eletromecânico
Figura 5.2	Bobina de potencial e bobina de corrente
Figura 5.3	Fluxos das bobinas de potencial e de corrente
Figura 5.4	Painel frontal de um medidor eletrônico
Figura 5.5	Painel traseiro de um medidor eletrônico
Figura 5.6	Bloco de terminais
Figura 5.7	Conexão 3 elementos com TC e TP
Figura 5.8	Conexão 2 elementos com TC e TP

Figura 5.9	Conexão 3 elementos
Figura 5.10	Conexão 2 elementos
Figura 5.11	Esquema dos ensaios dos medidores trifásicos eletromecânicos
Figura 5.12	Formas de ondas da tensão e corrente (terceiro ensaio)
Figura 5.13	Formas de ondas da tensão e corrente (quinto ensaio)
Figura 5.14	Formas de ondas (FO)
Figura 6.1	Histograma
Figura 6.2	Energia não ativa total, configurações A, B, C e D
Figura 6.3	Energia não ativa total, cenários 1, 2, 3
Figura 6.4	Gráfico FER x FP, configuração A
Figura 6.5	Gráfico FER x FP, configuração B
Figura 6.6	Gráfico FER x FP, configuração C
Figura 6.7	Gráfico FER x FP, configuração D
Figura 6.8	Gráfico FER x FP, cenário 1
Figura 6.9	Gráfico FER x FP, cenário 2
Figura 6.10	Gráfico FER x FP, cenário 3

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Influência dos harmônicos no fator de potência
Tabela 2.2	Contribuições (demanda) dos equipamentos de cons. residenciais
Tabela 3.1	Limites de distorção harmônica de tensão (IEEE 519)
Tabela 3.2	Limites de distorção harmônica de corrente (120 V a 69 kV) - IEEE 519
Tabela 3.3	Limites para a injeção de harmônicos de corrente - classe D ($I_F < 16$ A)
Tabela 3.4	Limites de DHI (IEC 61000-3-4)
Tabela 3.5	Limites de tensão por consumidor, em porcentagem da fundamental
Tabela 3.6	Limites globais de tensão, em porcentagem da fundamental
Tabela 3.7	Limites de curta duração
Tabela 3.8	Porcentagem de distribuição de carga não linear
Tabela 3.9	Porcentagem de carga energizada na pior situação
Tabela 3.10	Porcentagem de DHT_i por classe (casos hipotéticos)
Tabela 3.11	Crescimento de carga do alimentador, em kVA
Tabela 3.12	Quadro-resumo da evolução do crescimento das CNL's na demanda
Tabela 3.13	Contribuições na demanda das cargas dos cons. comerciais (ano 0)
Tabela 3.14	Quadro-resumo das simulações de DHT_v
Tabela 5.1	Comparação entre medidores eletrônicos e eletromecânicos
Tabela 5.2	Composição espectral da corrente (terceiro ensaio)
Tabela 5.3	Composição espectral da corrente (quinto ensaio)
Tabela 5.4	Erros dos medidores trifásicos eletromecânicos
Tabela 5.5	Ensaio realizados e resultados obtidos nos med. eletrônicos
Tabela 5.6	Ensaio realizados e resultados obtidos nos med. eletromecânicos
Tabela 6.1	Dados de potência
Tabela 6.2	Potência x DHT_i
Tabela 6.3	Valores totais das medições
Tabela 6.4	Erros e tecnologias dos medidores
Tabela 6.5	Faturamento de excedente reativo (A, B, C, D), em R\$
Tabela 6.6	Energia não ativa total (A, B, C, D), em kVArh
Tabela 6.7	Faturamento de excedente reativo (cenários futuros), R\$
Tabela 6.8	Energia não ativa total (cenários futuros), em kVArh

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASD	Adjustable Speed Drive
BT	Baixa tensão
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNL	Carga Não Linear
CL	Carga Linear
CC	Corrente Contínua
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
EFEI	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
Eurelectric	Union of the Electricity Industry
E. U. A.	Estados Unidos da América
FER	Faturamento de excedente reativo
FO	Forma de onda
FP	Fator de potência
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
In	Corrente nominal
Imáx	Corrente máxima
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MIT	Motor de Indução Trifásico
NBR	Norma Brasileira
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PC	Personal Computer
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SMD	Surface Mounted Devices

TC	Transformador de corrente
TDF	Transformada discreta de Fourier
TI	Tecnologia da Informação
TIR	Taxa interna de retorno
TP	Transformador de potencial
TRC	Tempo de retorno de capital
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
Unipede	União Internacional dos Produtores e Distribuidores de Energia Elétrica
UPS	Uninterruptible Power Supply
USP	Universidade de São Paulo

INTRODUÇÃO

O homem, desde a Revolução Industrial, por meio de suas pesquisas e experimentos, tem alcançado inúmeros avanços tecnológicos contribuindo com melhorias significativas para o bem-estar mundial. Ano após ano, a sociedade de um modo geral se beneficia das conquistas científicas nos mais variados campos do conhecimento: engenharia, medicina, espacial, lazer, estética, aeronáutica, genética, comportamento, materiais, etc.

Na engenharia elétrica, muito se tem estudado não só com o objetivo de projetar novos sistemas, criar novos produtos, materiais e processos, mas também no sentido de melhorar, otimizar o que já existe no setor elétrico mundial.

Diversos pesquisadores têm-se dedicado a compreender os fenômenos elétricos e suas causas, no intuito de propor soluções ou mitigar os problemas que atingem os consumidores e as empresas distribuidoras de energia elétrica. Dentre os inúmeros fenômenos presentes no sistema elétrico, aqueles que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica têm merecido grande atenção dos engenheiros especialistas e empresas do setor.

A distorção harmônica dos sinais de tensão e corrente é um dos fenômenos que está presente nos sistemas elétricos. Dentre os problemas que ela causa estão os erros na medição de energia elétrica. Isto ocorre porque nem todos os medidores fabricados atualmente estão preparados para a contabilização correta e discriminada desse fenômeno. Outra questão é que não existem balizas legais em nível mundial para que a medição e o faturamento possam ser efetivados. Porém, sabe-se que a distorção dos sinais provoca uma ocupação excessiva do sistema elétrico, através da poluição das redes de distribuição elétrica. Os consumidores também são responsáveis pela propagação dos efeitos prejudiciais às instalações elétricas por meio de seus equipamentos instalados.

Faz-se necessária então uma abordagem técnica a respeito do desempenho dos medidores de energia elétrica perante os sinais elétricos distorcidos, isto porque o ônus pela ocupação excessiva do sistema elétrico acaba sendo repartido igualmente entre pequenos e grandes consumidores, poluidores ou não do sistema elétrico.

CAPÍTULO I

O CONTEXTO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

1.1 Considerações iniciais

A diversidade de equipamentos elétricos empregados para a utilização da energia elétrica em todos os setores e ramos de atividades, além de proporcionar facilidades e melhorias ao cotidiano do ser humano, vem comprometendo a Qualidade da Energia Elétrica no cenário mundial.

A Qualidade da Energia Elétrica pode ser comprometida quando valores associados aos parâmetros que caracterizam um sinal de tensão ou corrente, em uma instalação elétrica, são alterados em função de muitos fatores, tais como partida de motores, utilização de retificadores eletrônicos, fornos a arco, entre outros. 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). Diversos são os fenômenos que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica.

Segundo Bronzeado (1997) e o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos americano (IEEE, 1995a), tais fenômenos podem ser chamados de Variações Instantâneas de Tensão (Transient Voltages), Variações Momentâneas de Tensão (Short Duration Voltage Variations), Variações Sustentadas de Tensão (Long Duration Voltage Variations), Variações Momentâneas de Frequência, Distorção Harmônica Total, Flutuação de Tensão, Cintilação e Desbalanço de Tensão.

O comprometimento da Qualidade da Energia Elétrica tem levado os países desenvolvidos a dispor de uma quantia estimada em bilhões de dólares para cobrir seus prejuízos (DKB, 1997). Em nosso país, estima-se que as perdas atinjam a marca de 3 bilhões de dólares por ano (Boas, 2001). Este vultoso valor está relacionado a:

- interrupção de processos produtivos;
- perdas de produção e insumos;
- despesas com reparos de equipamentos;
- má operação e falha de equipamentos eletroeletrônicos;
- degradação do isolamento dos equipamentos eletroeletrônicos;
- redução da vida útil de motores, geradores e transformadores;
- interferência em redes de comunicação;
- erro de medição e faturamento da energia elétrica, etc.

A eletrônica de potência ajudou a atenuar os problemas de controle e reduziu o consumo de energia, mas não totalmente sem custo. Os dispositivos eletrônicos poluem a rede elétrica em diversos níveis de intensidade.

Outro aspecto que merece destaque é a crescente sensibilidade dos dispositivos de tecnologia da informação (TI) com relação à energia elétrica. Os computadores são extremamente sensíveis aos afundamentos de tensão e aos surtos.

O custo da má qualidade de energia é razoavelmente bem conhecido no caso de eventos singulares, como interrupções e afundamentos de tensão. Já outros fenômenos que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica, como as harmônicas, estão causando perdas adicionais e, eventualmente, falhas prematuras de equipamentos, além de funcionamento incorreto de equipamentos de processamento de dados. Para estes fenômenos menos visíveis, há pouca informação disponível no Brasil com relação ao custo e à frequência das ocorrências.

Numa pesquisa realizada em 1400 instalações de oito países da Europa, Keulenaer (2004) analisou quais os tipos de problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica ocorrem nas instalações elétricas e a porcentagem daquelas que sofrem estes problemas.

A seguir, são mostrados os resultados da pesquisa:

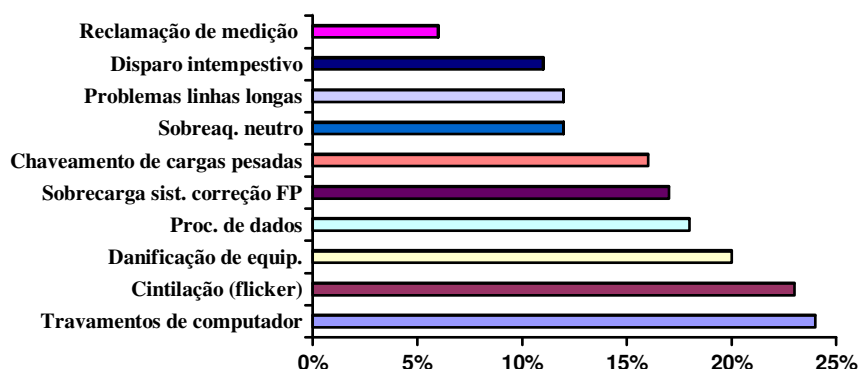


Figura 1.1 - Problemas nas instalações elétricas

Fonte: Keulenaer (2004)

A Figura 1.1 fornece uma visão geral dos problemas de Qualidade de Energia Elétrica que ocorrem com maior frequência nos países pesquisados. Segundo a amostra analisada, qualquer instalação na Europa tem uma probabilidade de 5% a 20% de sofrer algum dos tipos de problemas listados.

1.2 Proposição do trabalho

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dos principais medidores de energia elétrica comercializados no mercado nacional, considerando os erros metodológicos de medição de energia elétrica em ambientes com sinais não senoidais (distorcidos), e suas conseqüências no faturamento de energia.

Objetiva-se estimar o impacto (influência) do fenômeno da distorção de sinais num sistema de medição de energia elétrica, no que se refere à medição de energia reativa, sob o enfoque dos novos protocolos de medição propostos em tese de doutorado (Bernardes, 2003), que contabilizam, simultaneamente, os efeitos do deslocamento, da distorção dos sinais e desequilíbrios.

Espera-se que esta dissertação, ao focar os medidores de energia elétrica, juntamente com outros trabalhos científicos já desenvolvidos, possa chamar a atenção para a necessidade de uma tarifação mais equânime, no intuito de que os encargos nas contas de

energia elétrica sejam mais justos com aqueles que não são grandes portadores de cargas não lineares. Através da análise de um caso particular, é possível estimar a grandeza dos efeitos que afetam o sistema elétrico na presença de harmônicos, quanto à medição e ao faturamento de energia.

Também é válido e imprescindível mostrar as tendências mundiais quanto à propagação do fenômeno harmônico no sistema elétrico em geral. Este fenômeno contribui significativamente com perdas que afetam a Qualidade da Energia Elétrica nas redes de distribuição.

1.3 Apresentação de cada capítulo

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sobre os fenômenos presentes atualmente nos sistemas elétricos de um modo geral e que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica. Os fenômenos distorção harmônica e desbalanço de tensão são tratados de forma mais abrangente, uma vez que eles estão diretamente relacionados com os novos protocolos de medição que serão expostos no capítulo IV.

O Capítulo III trata do fenômeno harmônico ao apresentar as definições de distorção harmônica e a normalização pertinente ao assunto. Também faz uma abordagem da atual situação das redes elétricas em relação ao fenômeno com perspectivas futuras através de dois estudos de caso.

No Capítulo IV, é feita a apresentação de uma nova metodologia de medição, os novos protocolos, metodologia essa que contabiliza a distorção harmônica e o desbalanço de tensão simultaneamente em suas definições de potências e energias.

O Capítulo V traz o estado da arte dos medidores, bem como suas características construtivas, elétricas e também seus recursos tecnológicos existentes dos modelos à venda no mercado. Por último, são expostos os ensaios em laboratório que avaliam o desempenho dos medidores perante os sinais distorcidos.

Na parte final deste trabalho, o Capítulo VI realiza uma análise aplicada de faturamento de energia elétrica para um parque de medidores, através de uma comparação entre valores de energia medidos sem e com a contabilização da distorção harmônica, encerrando com uma análise econômica de troca dos medidores.

CAPÍTULO II

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Qualidade de energia elétrica

É cada vez mais crescente o interesse, tanto das empresas concessionárias de energia elétrica, como dos usuários, a respeito do controle e da eficiência da Qualidade de Energia. O assunto Qualidade de Energia adquiriu maior destaque e propagou-se no setor elétrico, a partir da década de 80, principalmente nos Estados Unidos. Pode-se dizer que é um assunto muito abrangente que engloba vários distúrbios que ocorrem no sistema elétrico.

O conceito de Qualidade de Energia Elétrica está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Entre muitos registros da literatura, pode-se então apresentar o assunto como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamento dos consumidores (Dugan, 1996). Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações dos consumidores ou no sistema alimentador da concessionária.

No passado, os problemas causados pela má qualidade no fornecimento de energia não eram tão expressivos, visto que os equipamentos existentes eram poucos sensíveis aos efeitos dos fenômenos ocorridos e não se tinham instalados, em grandes quantidades, dispositivos e equipamentos que causavam a perda da Qualidade de Energia. Tais equipamentos, que têm como princípio básico de funcionamento a eletrônica de potência, e serão ainda abordados neste capítulo, aumentaram significativamente a sua participação no sistema elétrico.

A Figura 2.1, a seguir, mostra um estudo feito nos Estados Unidos, num período de 40 anos, com objetivo de expor o crescimento das cargas não lineares em relação à potência instalada de um sistema típico até o ano 2000 (Oleskovicz, 2004).

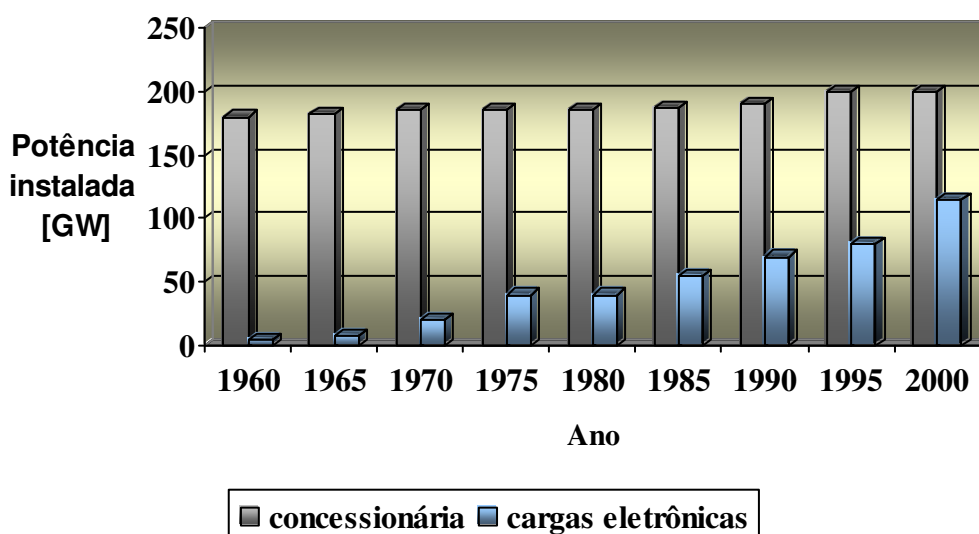


Figura 2.1 - Crescimento de cargas não lineares nos Estados Unidos

Fonte: Oleskovicz (2004)

Até bem pouco tempo, as concessionárias preocupavam-se com a frequência e a duração das interrupções, basicamente, quando o assunto era Qualidade de Energia. Atualmente, no entanto, outros indicadores de qualidade começam a ocupar espaço no vocabulário do setor elétrico brasileiro. Hoje a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, estabelece limites para a preservação da Qualidade de Energia Elétrica para o sistema elétrico no Brasil (ANEEL, 2000a).

No entanto, o consumidor final, o usuário da energia elétrica, também tem sua parcela de responsabilidade nesse assunto. Isso porque a utilização de cargas eletrônicas gera sinais de correntes elétricas com formas de ondas distorcidas, responsáveis pela distorção harmônica. Por isso, cada consumidor final, de acordo com suas instalações, contribui para o comprometimento da Qualidade de Energia Elétrica de um modo geral. Este trabalho também procura destacar o fato de que cada cliente de uma concessionária, em diferentes níveis de demanda, causa perturbações no sistema elétrico. Essas perturbações e efeitos provocam alterações na tensão, na corrente ou na frequência, conforme exposto anteriormente.

Na sequência, tem-se um resumo das principais causas e efeitos dos tipos de perturbações ou fenômenos mais relevantes que são frequentes no sistema elétrico (Teixeira, 2005).

2.1.1 Perturbações

2.1.1.1 Sobreensões transitórias

Transiente de impulso

Conceito: Perturbação súbita e de pequena duração, consistindo de uma mudança muito rápida nas condições estacionárias de tensão, corrente, ou ambos, e de polaridade unidirecional.

- Faixa de Frequência: acima de 5 kHz (frequência alta)
- Duração: 30-200 μ s
- Causas: descargas atmosféricas
- Efeitos: falhas em transformadores, falhas em pára-raios e danos em equipamentos de consumidores devido aos reflexos na baixa tensão.

Transiente oscilatório

Conceito: Rápida flutuação nas condições estacionárias de tensão, corrente, ou ambas, que incluem valores de polaridade positiva e negativa.

Transiente de baixa frequência

Frequência menor que 500 Hz, duração menor que 30 ciclos

- Causas: chaveamento de capacitores.
- Impactos: desligamento de equipamentos sensíveis, ampliação da tensão pelos capacitores dos consumidores.

Transiente de média frequência

Frequência entre 500 Hz e 2 kHz, duração menor que 3 ciclos

- Causas: ondas estacionárias decorrentes de impulsos causados por raios, transientes de chaveamento de capacitores e circuitos.

- Impactos: danos a equipamentos do consumidor.

Transiente de alta frequência

Frequência maior que 2 kHz, duração menor que 0,5 ciclo.

- Causas: chaveamento em sistemas secundários, ruído induzido por raio, ferro-ressonância local.

- Impactos: o sinal irradiado pode atingir equipamentos eletrônicos sensíveis.

2.1.1.2 Oscilações de tensão

Variações de tensão de curta duração

- Mergulhos de tensão (sags)

Conceito: Redução entre 0,1 e 0,9 pu no valor rms da tensão ou da corrente, na frequência nominal, com duração de 0,5 ciclo a 1 min.

- Causas: faltas locais e remotas.

- Impactos: falhas em equipamentos sensíveis do consumidor.

- Saltos de tensão (swells)

Conceito: Aumento entre 1,1 e 1,8 pu no valor rms da tensão ou corrente, na frequência nominal, com duração de 0,5 ciclo a 1 min.

- Causas: faltas monofásicas fase-terra.

- Impactos: sobretensão nos equipamentos e nos condutores.

Variações de tensão de longa duração

- Sobretensões

Conceito: Aumento da tensão rms maior que 110%, a frequência nominal, para uma duração maior que 1 min.

- Causas: desligamento de cargas, conexão de capacitores, sistemas de regulação de tensão.
- Impactos: problemas com equipamentos que necessitam de tensão de alimentação constante.

- Subtensões

Conceito: Redução da tensão rms menor que 90%, a frequência nominal, para uma duração maior que 1 min.

- Causas: conexão de cargas, desligamento de capacitores, sistemas de regulação de tensão.
- Impactos: problemas com equipamentos que necessitam de tensão de alimentação constante.

- Interrupções

Interrupção momentânea: 0,5 a 3 s

Interrupção temporária: 3 a 60 s

Interrupção de longa duração: > 1 min

- Causas: faltas temporárias, queda de raio, queda de galho de árvore sobre dois condutores; faltas não identificadas.
- Impactos: interrupção da operação, perda de produção e prejuízos.

2.1.1.3 Distorções na forma de onda

Harmônicos

Cargas não lineares, como equipamentos eletrônicos de potência, produzem formas de onda de corrente não senoidais quando alimentadas com tensão senoidal. Elas injetam correntes em frequências harmônicas (múltiplos inteiros da frequência fundamental) no sistema.

As correntes harmônicas e as distorções de tensão que elas criam ao circular através das impedâncias do sistema podem reduzir a confiabilidade do funcionamento dos equipamentos e a vida operacional (0 - 100° harmônico).

- Causas: cargas não lineares
- Impactos: mau funcionamento de equipamentos sensíveis, falhas de capacitores e aberturas de fusíveis, interferência telefônica.

Notching

Conceito: perturbação periódica de tensão causada pelo funcionamento normal de dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

- Causas: operação normal de equipamentos eletrônicos.
- Impactos: mau funcionamento de equipamentos, falhas de equipamentos.

Ruído

Conceito: Quaisquer sinais elétricos não desejados com conteúdo de largura de banda espectral menor que 200 kHz superpostos à tensão ou corrente de sistemas de energia, nos condutores fase, ou encontradas condutores neutro ou linhas de sinal.

- Causas: aterramento impróprio, operação normal de equipamentos eletrônicos, dispositivos a arco, chaveamento de fontes de energia.
- Impactos: distúrbios em equipamentos eletrônicos como microcomputadores e controladores programáveis.

2.1.1.4 Flutuação de tensão e cintilação (*Flicker*)

Conceito: O impacto dessa perturbação, flutuação de tensão, em luminárias é percebido pelo olho humano como uma cintilação (*flicker*). Isto é devido a equipamentos que exibem contínuas e rápidas variações na corrente de carga, particularmente na componente reativa.

- Causas: fornos a arco, cargas intermitentes.
- Impactos: flutuação na iluminação; mau funcionamento de cargas sensíveis.

2.1.1.5 Desbalanço de tensão

Conceito: Tensões de valores eficazes diferentes nas fases.

- Causas: cargas desequilibradas, impedâncias desequilibradas, maus contatos.
- Impactos: aumento das perdas em motores, falhas em equipamentos.

2.1.1.6 Variações de frequência

Conceito: Desvio da frequência fundamental do sistema de energia em relação a seu valor nominal especificado (por exemplo, 50 ou 60 Hz).

- Causas: má regulação de velocidade em gerador local, faltas em grandes sistemas de energia, grandes blocos de energia sendo desconectados, desligamento de grandes fontes de geração.

- Impactos: falhas de equipamento.

Dos fenômenos citados que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica, e portanto, provocam erros no sistema de medição e faturamento de Energia Elétrica, dois deles, abordados mais adiante neste trabalho, serão apresentados a seguir:

- i) Distorção harmônica
- ii) Desbalanço de tensão

2.1.2 Distorção harmônica

Este fenômeno tem maior significado dentro do escopo desta dissertação, devido ao fato de que os ensaios dos medidores, de forma predominante, foram realizados com sinais de correntes distorcidos.

A energia elétrica é produzida sob forma senoidal, em nosso país, na frequência de 60 Hz e uma grande parte das cargas conectadas à rede solicita correntes senoidais. Estas são as chamadas cargas lineares. Outras cargas, por característica intrínseca ao seu funcionamento, provocam distorções na forma de onda da corrente, tornando-a não senoidal, ainda que submetidas a uma tensão senoidal. Elas não mantêm a proporcionalidade entre a tensão de entrada e sua corrente de saída. Na falta de uma referência que exponha tal condição, estas cargas são usualmente chamadas de cargas não lineares, termo derivado do conceito de cargas lineares, concebido décadas atrás (Bernardes, 2003). Existem também outros tipos de fenômenos ou arranjos (saturação de núcleos de transformadores e corrente de *in rush*) que podem levar um dispositivo ou equipamento a se comportar como uma carga não linear (Rodrigues, 2000).

Podem ser citados como exemplos de cargas não lineares os seguintes equipamentos: conversores estáticos, inversores de frequência, fornos a arco e indução, máquinas de solda elétrica, lâmpadas fluorescentes, controladores de velocidade de motores (ASD), fotocopiadoras, televisores, *no-breaks* (UPS), fornos de microondas, reatores, computadores e impressoras, etc.

As distorções causadas pelas cargas não lineares no sistema elétrico podem ser interpretadas pela presença de componentes harmônicas nas ondas de tensão e corrente. Tais distorções podem ser causadas tanto pelos equipamentos do sistema elétrico como por equipamentos dos consumidores. Uma componente harmônica de tensão ou corrente pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação (Moreno, 2001).

A seguir, são mostrados os principais efeitos causados em instalações elétricas pelas cargas não lineares, através das componentes harmônicas de corrente provenientes das distorções:

- Aquecimentos excessivos: fios, cabos, transformadores, motores, etc;
- Disparos de dispositivos de proteção;
- Redução do fator de potência;
- Interferência em equipamentos de comunicação;
- Aumento da corrente de neutro;
- Alteração da vida útil de motores;
- Oscilações de torques nos motores e desgastes nos mancais;
- Aumento do erro em instrumentos de medição de energia elétrica;

Com o intuito de exemplificar melhor um dos efeitos mais relevantes causados pela distorção harmônica de corrente das cargas não-lineares nas instalações, é mostrada a seguir a Tabela 2.1 elaborada por Gama (1998), em sua pesquisa sobre Conservação e Qualidade de Energia Elétrica. Através dos resultados obtidos nos estudos, torna-se mais evidente a visualização do efeito dos harmônicos no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência de uma instalação.

Tabela 2.1 - Influência dos harmônicos no fator de potência

Distorção de corrente (%)	Acréscimo corrente (A)	Fator de Potência
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

*baseado numa corrente fundamental de 1 ampère

Em seu avanço tecnológico, juntamente com a ciência dos materiais, a eletrônica de potência disponibilizou, para os escritórios e indústrias, diversos equipamentos (cargas não lineares) capazes de controlar o produto final, como sistemas de iluminação variável e motores com velocidade ajustável. Desse modo, aproximadamente 50% da energia elétrica (Moreno, 2001) passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes que seja finalmente utilizada. Os principais dispositivos são diodos, transistores e tiristores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção. Isso significa que funcionam essencialmente em dois estados: estado de condução e estado de interrupção.

Em redes de alimentação industriais, as variações de corrente e tensão no tempo, com a presença das cargas não lineares citada anteriormente, são consideravelmente diferentes daquela de uma onda senoidal pura. É mostrado a seguir, um exemplo de uma onda distorcida.

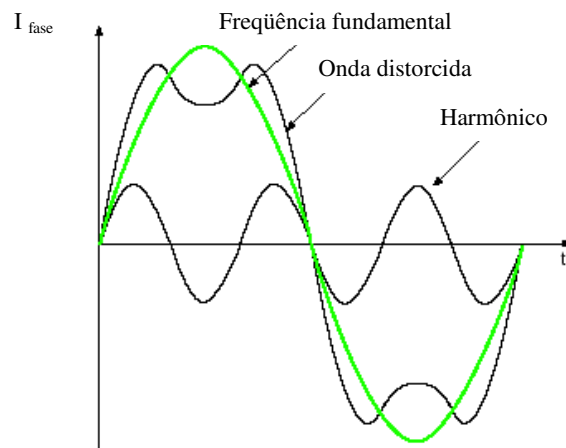


Figura 2.2 – Onda distorcida

Fonte: Collombet (1999)

Os tipos mais comuns de cargas não lineares são aquelas baseadas em circuitos retificadores, como mostrado na Figura 2.3. Para efeito de exemplificação, o gráfico da corrente x tempo de uma carga não linear monofásica, o retificador, é mostrado na Figura 2.4. Pode-se perceber a presença de componentes harmônicas pares e ímpares e, a seguir, o respectivo espectro harmônico.

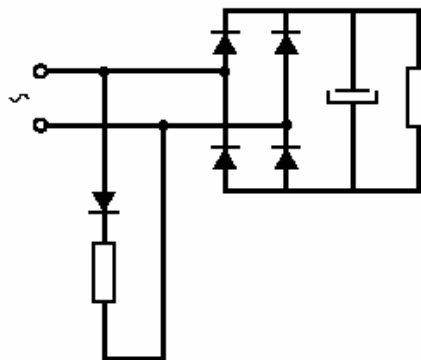


Figura 2.3 – Retificador monofásico

Fonte: Schonek (2001)

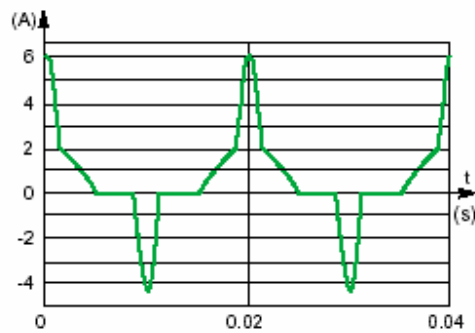


Figura 2.4 - Forma de onda corrente x tempo

Fonte: Schonek (2001)

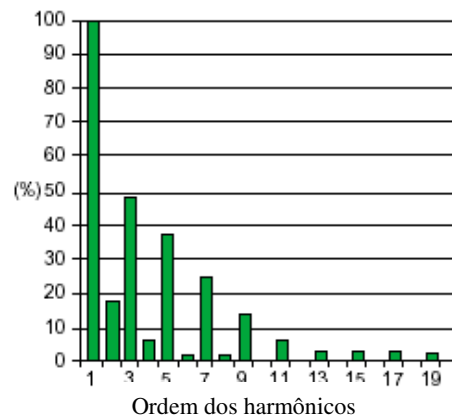


Figura 2.5 – Espectro harmônico de corrente

Fonte: Schonek (2001)

Já no caso de uma ponte retificadora trifásica com filtragem capacitiva, Figura 2.6, simétrica e equilibrada, não há geração de todas as ordens de componentes harmônicas. Em especial, é observada a ausência da terceira harmônica. Como no exemplo anterior, são mostrados, a seguir, a forma de onda da ponte retificadora e o respectivo espectro de frequência da corrente por ela solicitada.

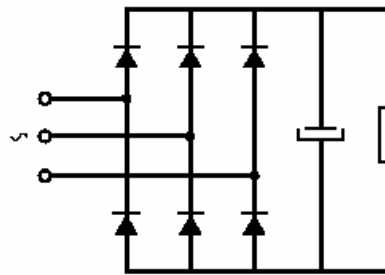


Figura 2.6 – Ponte retificadora com filtragem capacitiva

Fonte: Schonek (2001)

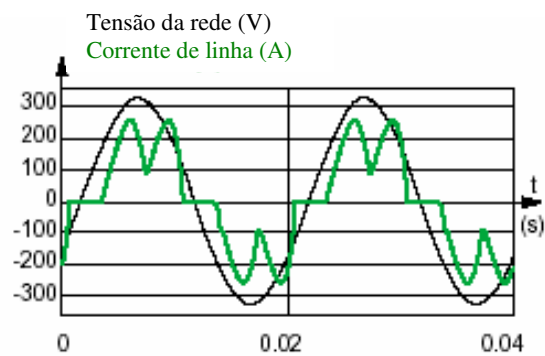


Figura 2.7 – Corrente_(linha) x tempo

Fonte: Schonek (2001)

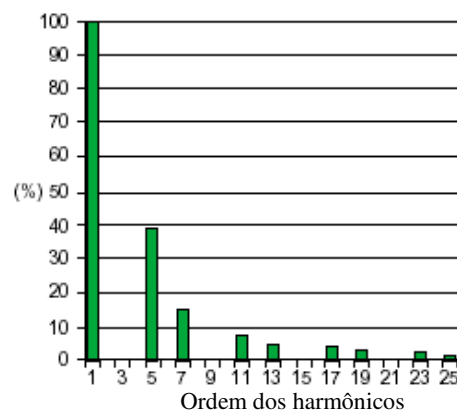


Figura 2.8 – Espectro harmônico de corrente

Fonte: Schonek (2001)

Nas instalações residenciais e comerciais, as harmônicas têm origem, principalmente, nas fontes dos equipamentos eletrônicos. Microcomputadores, impressoras, equipamentos de som, relógios digitais, aparelhos de fax, copiadoras e reatores eletrônicos são alguns dos equipamentos existentes nos consumidores conectados nos circuitos secundários de distribuição em baixa tensão. Nas redes de energia comerciais, já são freqüentes os problemas associados à grande concentração de tais equipamentos eletrônicos que introduzem níveis de distorção harmônica nos circuitos elétricos. Segundo Ignatowicz (2003), geralmente, nas redes de energia elétrica de concessionárias a quantidade de correntes harmônicas é pequena. O conteúdo harmônico é, em geral, desenvolvido pelos processos dos próprios consumidores.

Em estudo realizado por uma concessionária de energia elétrica brasileira, simulou-se computacionalmente o comportamento de algumas cargas não lineares residenciais e através de uma pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de consumo, pode-se estimar as contribuições na demanda das cargas lineares e não lineares nos dias atuais.

A seguir, nas Figuras 2.9 a 2.12, são mostradas as formas de ondas de algumas cargas não lineares residenciais (Abreu, 2001) e a Figura 2.13 mostra as contribuições de diversos equipamentos de uso doméstico, na demanda:

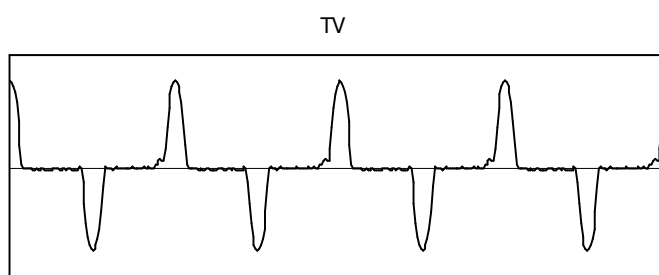


Figura 2.9 - Forma de onda da corrente de um televisor

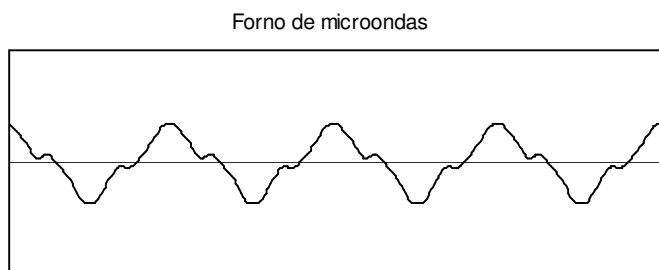


Figura 2.10 - Forma de onda da corrente de um forno de microondas

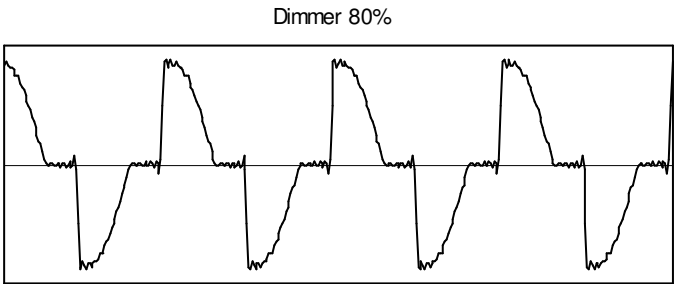


Figura 2.11 - Forma de onda da corrente num *dimmer* (80%)



Figura 2.12 - Forma de onda da corrente num *dimmer* (25%)

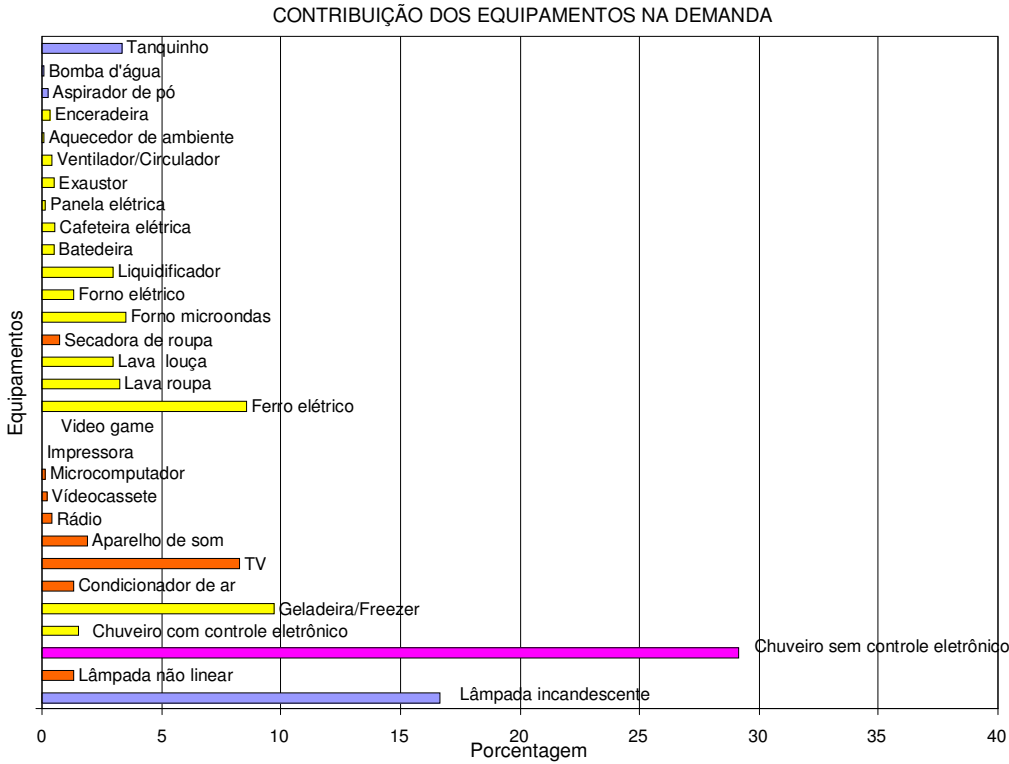


Figura 2.13 - Contribuição dos equipamentos na demanda

Pode-se dizer que, no caso das instalações residenciais, as cargas não lineares representam cerca de 17% da demanda total, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Contribuições (demanda) dos equipamentos de cons. residenciais

Tipo	Contribuição na demanda (%)		
Cargas lineares	Carga resistiva	60,13	82,7
	Força-motriz linear	22,53	
Cargas não lineares	TV	8,27	17,3
	Microcomputador	0,14	
	Impressora	0,05	
	Aparelho de som	1,90	
	Rádio	0,39	
	Videocassete	0,21	
	Vídeo game	0,03	
	Microondas	3,51	
	Lâmp. fluor. convencional	1,24	
	Lâmp. fluor. compacta	0,05	
	Chuveiro c/ contr.	1,53	
	Força-motriz não linear	0,00	
	Carga resistiva controlada	0,00	
TOTAL		100,0	

Dentre as cargas não lineares, destaca-se o aparelho de televisão, que contribui com cerca de 8% da demanda, sendo ela a carga não linear com maior contribuição na demanda residencial.

Como as cargas não lineares de pequeno porte estão presentes em grande quantidade no sistema elétrico, em breve, surgirá a necessidade de se controlar o grau de distorção harmônica não só no setor industrial, mas também no ambiente residencial.

Programas de Conservação de Energia são hoje imprescindíveis, mas devem ser implantados com cautela, porque podem comprometer a Qualidade da Energia fornecida pelo sistema elétrico. Como, por exemplo, pode ser citada a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas que geram harmônicas e distorcem a forma de onda da corrente que é fornecida pela rede. Cargas não lineares como estas, podem por sua vez, tornarem-se fontes de correntes harmônicas.

2.1.3 Desbalanço de tensão

O desbalanço de tensão é encontrado geralmente em todos os níveis da rede elétrica com valores inferiores a 2% (Iglesias, 2002), e satisfaz, portanto, os níveis de compatibilidade relacionados na norma internacional IEC - 61000-2-2 (1990). Podem ocorrer exceções em certos lugares, por exemplo, onde são instalados fornos a arco com uma conexão bifásica à rede de alimentação ou onde os segmentos significativos da carga local são conectados em uma única fase.

Sob operação normal, deseja-se que os sistemas elétricos forneçam tensões balanceadas no ponto de acoplamento comum (PAC) aos consumidores. Sendo assim, as tensões de alimentação são determinadas e influenciadas, basicamente, pelos seguintes parâmetros:

- tensão terminal dos geradores (fontes);
- impedância própria do sistema;
- correntes solicitadas pela carga.

Um sistema elétrico trifásico é denominado equilibrado, balanceado ou simétrico se as tensões e correntes em cada fase têm as mesmas amplitudes com defasagens exatas de 120° entre si. Se uma ou, simultaneamente, ambas condições anteriores não são satisfeitas, o sistema se encontra desequilibrado ou desbalanceado (Cogo, 1988). Um sistema torna-se desequilibrado, sob o ponto de vista de tensão, quando as potências distribuídas entre as fases não são perfeitamente iguais, fato também causado pela presença de cargas monofásicas e/ou bifásicas. Conseqüentemente, as correntes absorvidas são diferentes nas três fases, além disso, características distintas quanto às impedâncias próprias do sistema, acarretam quedas de tensão também diferenciadas. A impedância ao longo dos sistemas elétricos não é uniforme em todas as fases. A configuração geométrica de linhas aéreas, as assimetrias com relação ao potencial de terra e as características dos equipamentos instalados resultam em diferentes valores de impedância por fase. Neste caso, utiliza-se a transposição de fases para atenuar o desbalanço de tensão intrínseco à diferença entre as impedâncias do sistema. Esta alternativa é mais usual em sistemas de potência (AT) do que em sistemas de distribuição. Deve-se

considerar, também, que para tensões elevadas, normalmente as cargas são trifásicas e equilibradas.

Pelos motivos anteriores, os sistemas de distribuição tendem a permanecer com maior desbalanço do que sistemas de transmissão. Portanto, na maioria dos casos, a influência predominante se refere às características das cargas e dos níveis de desequilíbrios das correntes solicitadas. Naturalmente, uma fonte óbvia de desbalanço de tensão é o desequilíbrio de corrente causado por conexões de cargas monofásicas em circuitos trifásicos. A combinação de cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, principalmente cargas elétricas especiais como fornos a arco e máquinas de solda, também tendem a afetar o grau de desbalanço do sistema. O desbalanço de tensão também pode ser provocado por perturbações em bancos de capacitores, como ocorre durante a atuação de fusíveis em uma das fases do banco trifásico, transformadores conectados em delta aberto e sistemas sob faltas desequilibradas, sendo este último classificado como variação momentânea de tensão.

Outra causa que também pode ser citada, é a diferença entre tensões terminais nos geradores de pequena escala, como por exemplo, sistemas de cogeração fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão por unidades de inversores monofásicos.

Para se quantificar o grau de desbalanço ou desequilíbrio em sistemas trifásicos, utiliza-se o parâmetro chamado de “fator de desbalanço”. É bom lembrar que, usualmente, emprega-se o termo “desbalanço” quando se refere à tensão, e “desequilíbrio”, quando a corrente é o sinal analisado. Este trabalho procurou adotar a terminologia citada anteriormente.

Para analisar o fator de desbalanço (tensão) ou desequilíbrio (corrente) num sistema trifásico, são utilizadas as componentes simétricas, derivadas do *teorema de Fortescue*. Este teorema define que qualquer sistema desequilibrado de N fasores pode ser decomposto por N sistemas equilibrados. O sistema trifásico é decomposto então em três sub-sistemas, denominados componentes de seqüência positiva ou direta (seq.1), componentes de seqüência negativa ou inversa (seq. 2) e componentes de seqüência zero ou homopolar (seq. 0). Esses componentes são obtidos usando a matriz de transformação dos fasores trifásicos das tensões ou correntes (componentes das fases A, B e C), cujas expressões são mostradas abaixo, para o caso das tensões. Mas se a análise for sobre as correntes do sistema desequilibrado, o mesmo método é aplicável.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + aV_b + a^2V_c \\ V_a + a^2V_b + aV_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Equação 2.1 - Componentes de Fortescue

Onde o operador rotacional é dado por: $a = e^{j120^\circ}$

Essas transformações apresentam características constantes em relação à energia, deste modo, potências calculadas com as variáveis transformadas ou originais apresentarão o mesmo resultado. A transformação inversa, ou seja, componentes de seqüências positiva, negativa e zero, em componentes de fase é realizada como mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Equação 2.2 - Componentes de fase

A Figura 2.14 mostra, como exemplo, as tensões desbalanceadas nas fases A, B e C, expressas graficamente pelas componentes simétricas. Observa-se que as tensões desbalanceadas das três fases podem ser decompostas em tensões de um sistema balanceado, conforme demonstrou Fortescue, em 1918.

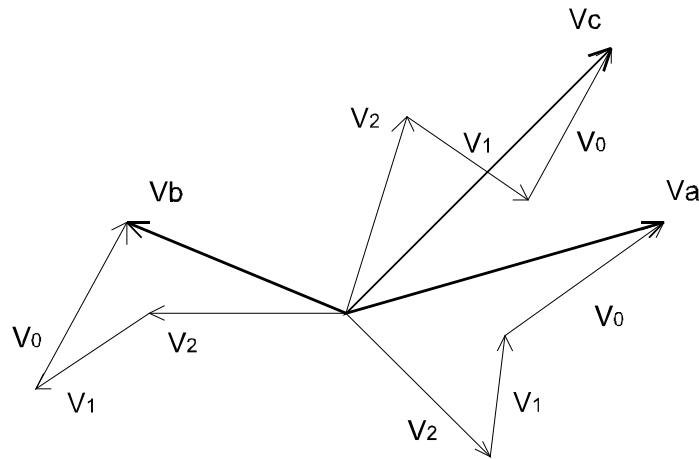


Figura 2.14 - Tensões desbalanceadas

2.1.3.1 Fator de desbalanço

Os efeitos nocivos a uma instalação elétrica, causados pelo desbalanço de tensão, dependem de sua intensidade. Essa intensidade de desbalanço é expressa pelo chamado fator de desbalanço F_d . Serão mostrados a seguir três modos distintos para se determinar o fator de desbalanço.

Método I - Componentes simétricas

A partir das componentes simétricas, pode-se definir o grau de desbalanço das tensões, uma vez que, para tensões balanceadas, o resultado apresenta somente componentes de sequência positiva. As razões entre as componentes de sequência negativa ou zero em relação à sequência positiva, quantificam o fator de desbalanço. Em termos percentuais, têm-se as seguintes equações:

$$F_{d2}(\%) = k = 100 \cdot \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$F_{d0}(\%) = 100 \cdot \frac{|V_0|}{|V_1|} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde:

$Fd_{2(\%)}$ - Fator de desbalanço de tensão (seqüência negativa);

$Fd_{0(\%)}$ - Fator de desbalanço de tensão (seqüência zero);

$|V_2|$ - Módulo da tensão de seqüência negativa;

$|V_0|$ - Módulo da tensão de seqüência zero;

$|V_1|$ - Módulo da tensão de seqüência positiva.

Método II - NEMA

Visando quantificar o impacto sobre o desempenho e operação de motores de indução sob condições desbalanceadas, a norma NEMA MG1/14.34 define o fator de desbalanço como o máximo desvio da tensão média trifásica, dividido pela média das três fases, expresso em valores percentuais, tomando-se como referência as tensões de linha.

$$Fd_{(\%)} = \frac{[V_{\max(A,B,C)} - V_{\text{média}}]}{V_{\text{média}}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

$V_{\max(A,B,C)}$ = valor máximo do desvio de tensão trifásica;

$V_{\text{média}}$ = tensão média trifásica

Método III - Método IEEE

O método proposto pelo IEEE estabelece que o fator de desbalanço seja determinado pela seguinte equação:

$$Fd_{(\%)} = \frac{3 \cdot (V_{\max} - V_{\min})}{V_A + V_B + V_C} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

$V_{\max}$ - valor máximo de desvio de tensão trifásica;

$V_{\min}$ - valor mínimo de desvio de tensão trifásica;

V_A, V_B, V_C - valores de tensão eficazes nas fases A, B e C, respectivamente.

O desbalanço de tensão pode gerar efeitos que venham a ocasionar a operação inadequada de equipamentos e, conseqüentemente, a redução de sua vida útil, e ainda o aumento de esforços mecânicos em motores, vibrações e ruídos e também a redução da capacidade de transformadores, cabos e linhas elétricas.

Para exemplificar, será destacado, a seguir, um problema indesejável na operação de um motor de indução trifásico, ocasionado pelo desbalanço de tensão na instalação elétrica de um consumidor.

Para as análises dos efeitos de tensões desbalanceadas aplicadas a um motor de indução trifásico, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de seqüência negativa, somados aos resultados da tensão de seqüência positiva (Oleskovicz, 2004). Tal aproximação é razoável, uma vez que a maioria dos motores de indução não possui caminho para circulação das correntes de seqüência zero, seja pela conexão estrela isolada ou pela conexão delta destes motores. Sendo assim, os efeitos das tensões e correntes de seqüência zero não são comumente considerados.

Tensões de seqüência negativa quando são aplicadas no motor fazem surgir um campo magnético correspondente que, por sua vez, gira no sentido contrário ao sentido de rotação do motor. A interação destes dois campos dá origem a um conjugado pulsante no eixo da máquina com frequência $2.f_n$.

Ao mesmo tempo, as correntes de seqüência negativa causam um sobreaquecimento no motor. É sabido que, com essa elevação de temperatura, a vida útil do motor fica comprometida a partir do desgaste dos enrolamentos.

Os efeitos resultantes do desbalanço de tensão em motores de indução trifásicos podem ser observados na Figura 2.15 (Cogo, 1988), utilizando-se, como exemplo, um motor de pequeno porte. Dessa maneira, um fator de desbalanço de 2% nas tensões provoca um desequilíbrio de corrente de 17%, aproximadamente, e uma elevação de temperatura de 65°C, quando normalmente seria de 40°C.

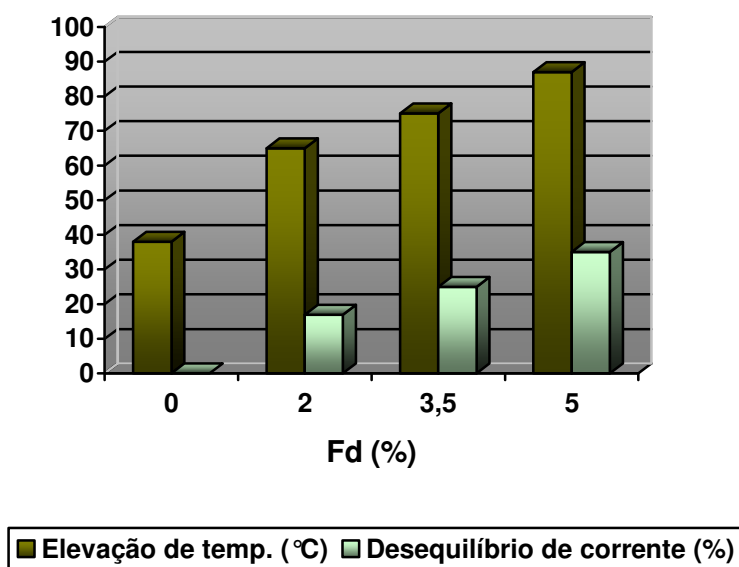


Figura 2.15 - Efeitos do fator de desbalanço em motores de indução trifásicos

Fonte: Cogo (1988)

2.1.3.2 Métodos de mitigação

Existem diversas técnicas de redução do desbalanço de tensão quando se trata da fase de planejamento de uma rede de alimentação de circuitos elétricos, quer seja numa grande cidade, indústria ou empresa. Dentre as mais comuns, podem ser citadas:

- mudança da configuração das cargas ou das suas condições de operação;
- rearranjo das conexões às fases;
- transformadores especiais.

CAPÍTULO III

PROPAGAÇÃO DO FENÔMENO HARMÔNICO

3.1 Abordagem preliminar

Há alguns anos, a distorção harmônica se tornou um aspecto importante no momento da especificação e da compra de equipamentos elétricos ou no projeto de sistemas de distribuição de energia elétrica.

A distorção harmônica de corrente é resultado da característica não linear da carga. Já a distorção harmônica de tensão é resultado da interação de correntes distorcidas com a impedância do sistema, através da operação de cargas e equipamentos não lineares do sistema de potência.

É importante ressaltar que as cargas não lineares não agem como fontes de tensões harmônicas, mas como fontes de correntes harmônicas. A amplitude das correntes harmônicas só depende da carga. Esta última é mais importante, quanto mais elevadas são as correntes harmônicas. Contrariamente à corrente fundamental, as correntes harmônicas não circulam da fonte em direção à carga, mas da carga em direção à fonte (Abreu, 2001).

Para se quantificar o grau de influência da distorção harmônica de corrente nos sistemas de distribuição de energia elétrica e nas instalações, são utilizados modernos equipamentos chamados analisadores de energia. Existe no mercado, uma grande variedade destes produtos que dispõem de vários recursos de análise da Qualidade da Energia. Os analisadores são fabricados nos modelos monofásico e trifásico. São capazes de fornecer diversos parâmetros sobre a taxa de distorção harmônica, espectro harmônico, distúrbios de tensão, fator de potência, frequência, etc. Grande parte dos modelos possui também as funções de multímetro, registradores e osciloscópio.

Após a coleta dos dados dos sinais de tensão e corrente, na fase de processamento digital de sinais, estes instrumentos fazem uso da chamada Transformada Rápida de Fourier (FFT) para posterior cálculo da potências e energias contabilizadas na medição.

A técnica matemática clássica para o tratamento de componentes harmônicas que deu origem a FFT é a Série Trigonométrica de Fourier, a qual possibilita que qualquer função periódica seja decomposta numa somatória de funções senoidais e/ou cossenoidais.

A expressão geral da Série Trigonométrica de Fourier é mostrada na Equação 3.1, a seguir:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(nx) + b_n \cdot \text{sen}(nx)] \quad (\text{Equação 3.1})$$

onde a_0 , a_n e b_n são os coeficientes de Fourier de $f(t)$ e definidos por:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot dx \quad (\text{Equação 3.2})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos(nx) \cdot dx \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \text{sen}(nx) \cdot dx \quad (\text{Equação 3.4})$$

Freqüentemente, seja nos programas de computador ou nos instrumentos de medição, a amplitude e a fase das componentes harmônicas são expressas na forma de uma série de senos, ao invés de uma série de cossenos. A escolha do tipo de série é, em princípio, arbitrária, mas algumas funções se enquadram melhormente a um determinado tipo, e a escolha errada, além de proporcionar um trabalho mais difícil, pode apresentar discrepâncias. Através da série trigonométrica de Fourier, obtém-se o chamado espectro harmônico que permite decompor um sinal de corrente ou tensão em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua freqüência, valor eficaz e defasagem. O espectro harmônico é uma representação da

forma de onda no domínio da frequência. Teoricamente, o espectro harmônico de um sinal deformado qualquer chegaria a um número infinito de componentes. Na prática, geralmente limita-se o número de harmônicas a serem medidas e analisadas por volta de 40 valores, uma vez que, raramente, os sinais acima dessa ordem são significativos a ponto de causarem perturbação ao funcionamento de uma instalação (Moreno, 2001).

Por definição (IEEE, 1992), as distorções harmônicas totais das tensões e correntes são expressas nas equações abaixo:

$$DHT_v = \frac{V_h}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 3.5})$$

$$DHT_i = \frac{I_h}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \cdot 100\% \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

DHT_v - taxa de distorção harmônica total de tensão;

V_h - valor eficaz total das tensões harmônicas;

V_1 - valor eficaz da tensão de frequência fundamental;

$V_2, V_3, \dots$ - valores eficazes das amplitudes das tensões harmônicas;

DHT_i - taxa de distorção harmônica total de corrente;

I_h - valor eficaz total das correntes harmônicas;

I_1 - valor eficaz da corrente de frequência fundamental;

$I_2, I_3, \dots$ - valores eficazes das amplitudes das correntes harmônicas.

3.2 Normalização

No Brasil não existe uma norma que estabeleça os limites de geração de harmônicos de corrente nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, CCEE, antigo Mercado Atacadista de Energia, em seu documento de especificação técnica do Sistema de Medição para Faturamento de Energia (MAE, 2000) destaca a não obrigatoriedade de medição de valores dos indicadores de distorção harmônica, cintilação e desequilíbrio.

Estudos realizados recentemente (ABNT, 2000a) mostram a necessidade da normalização dos limites relacionados aos fenômenos que afetam a Qualidade da Energia Elétrica em nosso país. Percebe-se que, de uma forma muito lenta e gradativa, surgem iniciativas para se balizar os níveis de influência dos fenômenos que afetam o sistema elétrico. Pode ser citada a iniciativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT em estabelecer limites, através de suas normas, para os fabricantes de reatores de lâmpadas fluorescentes, no que se refere ao comprometimento da Qualidade de Energia Elétrica nas instalações (ABNT, 2000a).

Nos E.U.A., a norma IEEE 519/92 limita a distorção harmônica no PAC, sem levar em consideração cada consumidor individualmente. Ela estabelece que os limites de distorção de tensão no ponto de conexão são de responsabilidade da concessionária e, os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores.

Seguem, abaixo, os valores estabelecidos por esta norma americana:

Tabela 3.1 - Limites de distorção harmônica de tensão - IEEE 519

Tensão PAC	Distorção harmônica de tensão	
	Por consumidor (%)	Total (%)
Abaixo de 69 kV	3,0	5,0
69 a 161 kV	1,5	2,5
161 kV e acima	1,0	1,5

Tabela 3.2 - Limites de distorção harmônica de corrente (120 V a 69 kV) - IEEE 519

Corrente harmônica máxima em porc. (%) da fundamental						
Ordem das harmônicas (harmônicas ímpares)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT ₁
< 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

Onde:

I_{sc} - é a corrente de curto-circuito máxima no PAC;

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

Já a norma internacional IEC 1000-3-2 foi a primeira a limitar a injeção de harmônicos por equipamentos de baixa tensão e potência (correntes até 16 A por fase) que podem ser comercializados no Mercado Comum Europeu. Os equipamentos com potência de entrada entre 50 W e 600 W e tensões nominais entre 220 V e 415 V são enquadrados nesta norma da seguinte forma:

Classe A: Equipamentos trifásicos equilibrados, não incluídos nos indicados nas classes B, C ou D.

Classe B: Ferramentas portáteis.

Classe C: Equipamentos de iluminação.

Classe D: Equipamentos cuja corrente de entrada apresenta uma forma de onda como a gerada por retificador monofásico com filtro capacitivo.

A Tabela 3.3, a seguir, mostra os limites de acordo com a citada norma.

Tabela 3.3 - Limites - injeção de harmônicos de corrente - classe D ($I_F < 16$ A)

Ordem dos harmônicos	Limite relativo (mA/W)	Limite absoluto (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	3,85/h	0,15

Onde: I_F - é a corrente por fase do equipamento

Para correntes acima de 16 A por fase, as recomendações são estabelecidas pelo documento IEC/TS 61000-3-4. De um modo geral, para equipamentos conectados na baixa tensão em 220 V, têm-se os seguintes limites quanto a máxima distorção de corrente recomendada por faixas de potência do equipamento:

Tabela 3.4 - Limites de DHI (IEC 61000-3-4)

Potência (W)	Limite DHI (%)
< 600	90
1000 - 1500	60
> 1500	26

Já em nosso país, a ELETROBRAS (1993), Tabelas 3.5 e 3.6, recomenda limites para as distorções harmônicas de tensão para consumidores especiais, portanto, não contempla outras cargas. Os limites são globais e por consumidor, para sistemas de tensões inferiores e superiores a 69 kV, conforme a seguir:

Tabela 3.5 - Limites de tensão por consumidor, em porcentagem da fundamental

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
ordem	valor	ordem	valor	ordem	valor	ordem	valor
3 a 25	1,5 %	todas	0,6 %	3 a 25	0,6 %	todas	0,3 %
≥ 27	0,7 %			≥ 27	4,0 %		
DHT _V = 3 %				DHT _V = 1,5 %			

Tabela 3.6 - Limites globais de tensão, em porcentagem da fundamental

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 %		
DHT _V = 6 %				DHT _V = 3 %			

3.3 Limites probabilísticos

Comitês de estudos elaboradores de normas relativas à fixação de limites harmônicos, em países da Europa e E.U.A., já se preocupam em inserir um enfoque probabilístico nas revisões de suas respectivas normas a serem publicadas.

A forma variável no tempo, dos sinais harmônicos em sistemas de potências, requer um tratamento probabilístico em relação aos níveis de tolerância, uma vez que mudanças nas configurações do sistema elétrico, nos níveis de cargas lineares e nos modos de operação das cargas não lineares, ocorrem com uma determinada frequência.

A norma IEC 1000-3-6 utiliza limites probabilísticos para tensões e correntes harmônicas, enquanto a IEEE Std 519-1992 apenas faz referência ao fenômeno. É sabido que este tipo de enfoque que leva em conta a variação no tempo das componentes harmônicas já está sendo incorporado na nova versão da norma americana IEEE Std 519.

As normas atuais consideram apenas os índices de emissão de harmônicas em condições de carga constante e regime permanente do sistema elétrico. Com isso, surge a

dificuldade em se tratar este fenômeno como variante no tempo. Alguns detalhes técnicos ilustram a dificuldade em se implementar tal metodologia no que se refere à utilização de uma modelagem mais próxima da realidade. Um deles é a dificuldade em se determinar qual função de probabilidade caracterizaria fielmente o fenômeno das harmônicas em cada situação. Outro detalhe é como avaliar a impedância harmônica da rede: de forma estatística ou determinística?

A IEEE Std 519-1992 introduziu o conceito de gráficos de distribuição de probabilidades para caracterizar variações em níveis de harmônicos. Um método razoável de uso destes tipos de gráficos para avaliar níveis harmônicos seria comparar os limites de harmônicos em regime permanente com o nível harmônico medido que não foi ultrapassado de um valor correspondente à probabilidade de 95%, no tempo considerado (Ribeiro, 2001). Essa forma concorda com a avaliação de limites de compatibilidades nas normas da IEC.

Vale lembrar que a soma dos efeitos acumulados dos níveis de harmônicos ao longo do tempo acarreta envelhecimento de equipamentos e erros de medição, tais efeitos diferem daqueles que surgem instantaneamente, sendo assim também uma justificativa para a necessidade do enfoque probabilístico na determinação dos limites de emissão de harmônicos no sistema elétrico.

A Tabela 3.7 incorpora a variação no tempo admitindo que o valor semanal máximo de tensão harmônica em períodos muito curtos de 3 s não deve ultrapassar “A” vezes os limites contínuos de planejamento e ou de projeto, determinados. Tais limites são fixados em termos de percentil (Ribeiro, 2001).

Tabela 3.7 - Limites de curta duração

Limites de curta duração	
Limites de curta duração	Duração do distúrbio
A x limites contínuos	$a1 \text{ (s)} < T < b1 \text{ (s)}$
B x limites contínuos	$b1 \text{ (s)} < T < a2 \text{ (min)}$
C x limites contínuos	$a2 \text{ (min)} < T < b2 \text{ (min)}$

3.4 Propagação do fenômeno harmônico

É sabido que, com o surgimento de novas tecnologias e a conseqüente expansão da eletrônica de potência, há um crescimento acelerado do emprego de cargas não lineares no sistema de distribuição elétrica, nos setores industrial, comercial e residencial. Faz-se necessária, então, a visualização da progressão do fenômeno harmônico causada pela disseminação das cargas não lineares com o intuito de se tomar ciência e, quando cabível, adotar medidas prévias para a mitigação dos respectivos efeitos.

Muitas pesquisas são dedicadas ao estudo da evolução desse fenômeno e recentemente a Eurelectric (Iglesias, 2002) divulgou, na parte 2 de seu relatório, a evolução, nos últimos 20 anos, do conteúdo de harmônicas de tensão nas instalações de consumidores em 3 países da Europa. A Figura 3.1 mostra a evolução da 5ª harmônica de tensão desde 1977 até 1999 nas redes públicas européias.

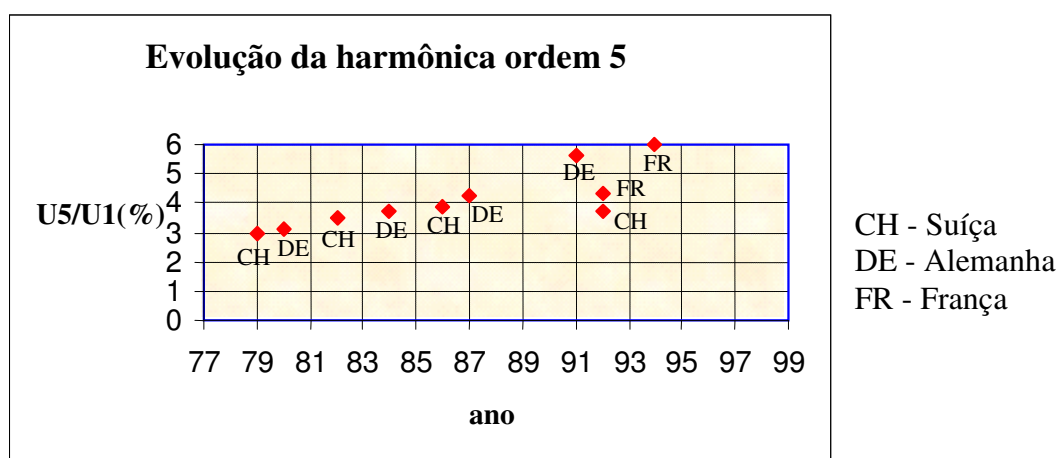


Figura 3.1 - Evolução da 5ª harmônica nas redes públicas européias

Fonte: Iglesias (2002)

Pode-se perceber que, nos países Alemanha e França, os níveis de distorção harmônica de tensão ultrapassaram os 5%, em 1991 e 1994, respectivamente. Já em anos anteriores, os mesmos países, juntamente com a Suíça, atingiram valores muito próximos dos limites estabelecidos pela norma americana IEEE Std 519.

Na sequência serão apresentados dois trabalhos que tiveram como propósito comum a análise da atual situação do fenômeno harmônico, através de dados reais, para se chegar a uma estimativa realística da propagação de tal fenômeno ao longo dos próximos anos. O primeiro realizado no nordeste dos Estados Unidos da América, E.U.A., por A. E. Emanuel, em 1995, analisa os alimentadores de distribuição com cargas não lineares, e o segundo, realizado em 2003 no Brasil, também na área de Qualidade de Energia Elétrica, desenvolve uma estratégia análoga.

3.4.1 Caso 1

A pesquisa realizada por Emanuel (1995), publicada no IEEE Transactions on Power Delivery em 1995, intitulada “Distributions Feeders With Nonlinear Loads In The Northeast U.S.A.”, faz a previsão do nível de Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_v) para um cliente típico durante as próximas duas décadas. A pesquisa foi baseada em uma projeção de crescimento de cargas residenciais, comerciais e industriais com a absorção de novas tecnologias como reguladores de velocidade ajustáveis (ASD's) e reatores eletrônicos. O fluxo de potência harmônica foi determinado para cada alimentador sob a suposição da existência de diferentes níveis de distorção de corrente e cargas não lineares diversificadas. Foi observado que alimentadores curtos, com distância menor que 4,8 km entre eles e a carga, são mais imunes a efeitos de correntes harmônicas do que para distâncias maiores que 8 km.

O objetivo principal da pesquisa foi estimar a que nível de distorção de tensão, um cliente típico poderia ser submetido, desde então, nos próximos 20 anos.

Três alimentadores de distribuição, 13,8 kV, foram estudados para fins de análise, sendo mostrado a ordem de comprimento de cada um:

Alimentador I: acima 8046 m;

Alimentador II: entre 1383 m e 28967 m;

Alimentador III: entre 1222 m e 3604 m.

A carga total em cada alimentador, no ano 1990, era cerca de 8 MVA e cresce ao longo do período de estudo a um limite de 10 MVA. Os consumidores que foram objeto do estudo para as previsões de demanda foram divididos em três classes: residenciais (64% a 86% da carga total), comerciais (6% a 9,5%) e industriais (6% a 28%).

Seguem abaixo as considerações sobre cada classe:

i) Residencial

A previsão de carga foi baseada no conhecimento das médias de consumo por mês (kWh/mês), potência por consumidor (kW/consumidor) e no crescimento do número de aparelhos de TV, computadores pessoais e lâmpadas incandescentes. O aumento esperado do número de residências em Massachusetts foi também um aspecto de grande relevância. Neste estudo não foi previsto nenhum crescimento significativo de ASD's nas próximas décadas na região do estudo.

ii) Comercial

Com relação a esta classe, a previsão foi baseada no aumento de equipamentos para escritórios, como: condicionadores de ar de janela, ventiladores, copiadoras, computadores pessoais, caixas registradoras, luminárias com reatores eletrônicos ou magnéticos, iluminação incandescente, etc.

iii) Industrial

Os picos de demanda industrial, a projeção das vendas industriais e as partidas de motores com ou sem ASD's foram levados em conta na previsão de demanda para esta classe, uma vez que estes fatores influenciam significativamente o aumento de carga.

3.4.1.1 Metodologia do estudo

O estudo utilizou as análises de um outro anterior (Emanuel, 1993) realizadas para 3 alimentadores de 13,8 kV localizados na Eastern Utilities Associates, nos E.U.A., por meio de simulações computacionais. No estudo anterior, foi admitido que havia apenas um tipo de carga não linear (CNL) distribuída e conectada nos barramentos dos alimentadores.

Já para este estudo em questão, ele considerou a situação de forma mais realística e as CNL's foram divididas em três classes diferentes de acordo com as formas de onda das correntes que os equipamentos poderiam apresentar.

Classe A:

Esta classe se caracteriza por ter uma pulsação típica para cada meio ciclo. Este formato de onda é característico em computadores pessoais, televisores, carregadores de baterias de veículos elétricos, ASD's monofásicos e certos reatores eletrônicos. Dependendo da largura da pulsação, o DHT_i pode variar tipicamente de 40% a até 140%, ou mais.

Classe B:

A forma de onda desta classe é trapezoidal ou quase quadrada. O retificador monofásico com indutâncias alisadoras grandes do lado CC possui essa característica de forma de onda. Alguns carregadores de bateria, ASD's (motores CC), reatores eletrônicos (com filtros especiais) e fontes de corrente do tipo inversor são enquadrados nesta classe.

Classe C:

O formato de onda que caracteriza esta classe é o apresentado pelos ASD's trifásicos encontrados em cargas industriais e comerciais. O DHT_i pode alcançar valores muito altos, como 100%, mas a ausência do terceiro harmônico e o uso de reatâncias de entrada reduzem o DHT_i para 60% ou menos.

Um esboço das formas de ondas das três classes é mostrado na Figura 3.2.

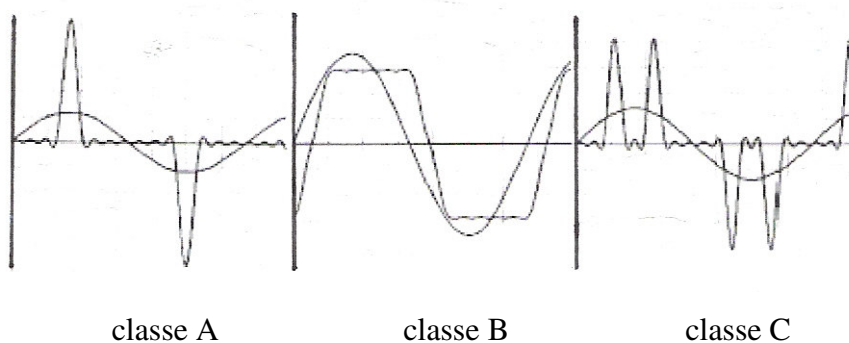


Figura 3.2 - Formas de ondas classes A, B e C

Fonte: Emanuel (1995)

As classes de cargas não lineares foram distribuídas entre os consumidores de acordo com a Tabela 3.8:

Tabela 3.8 - Porcentagem de distribuição de carga não linear

	Classes		
	A	B	C
Residencial	100		
Comercial	70	10	20
Industrial		20	80

A pior situação, que levava a um DHT_v mais alto, era conhecida e acontecia durante o período e o momento quando a relação entre cargas não lineares e cargas lineares era máxima e quando os capacitores de correção do fator de potência eram energizados. Foi concluído que o pior cenário aconteceria durante as horas iniciais da noite, quando os consumidores comerciais estavam operando, os residenciais utilizando a maior parte das CNL's e os industriais trabalhando em segundo turno naquela região americana.

A Tabela 3.9 mostra a distribuição de cargas lineares e não lineares por categoria de consumidores para a pior situação considerada.

Tabela 3.9: Porcentagem de carga energizada na pior situação

	Linear	Não linear
Residencial	25	100
Comercial	100	100
Industrial	25 50	25 50

Como as cargas industriais durante, as horas dos piores casos estudados, podiam variar significativamente os perfis de carga sazonais e diários, optou-se por observar o máximo DHT_v quando os consumidores industriais operariam com 25% e 50% da potência total.

Como o objetivo principal do grupo de trabalho era obter uma projeção do máximo DHT_v nos três alimentadores e considerando que a distorção das formas de onda da corrente era o parâmetro mais importante no estudo, foi decidido considerar quatro casos hipotéticos para os níveis de distorção de corrente. Esses quatro casos são apresentados na Tabela 3.10.

O caso I retrata uma situação em que os níveis de distorção de corrente excedem os limites recomendados pela norma IEEE 519/1992 (IEEE,1992). Já o último caso, o IV, foi considerado um extremo de situação fora de controle.

Tabela 3.10 - Porcentagem de DHT_i por classe (casos hipotéticos)

Casos	Classes de CNL's		
	A	B	C
I	40	23	30
II	80	25	60
III	100	30	80
IV	120	40	100

As simulações de fluxo harmônico foram realizadas com programas comerciais e a tensão da subestação foi considerada distorcida de acordo com as medições feitas no início do estudo, na década de 90. Num dos casos, a tensão da subestação foi mantida constante e com

uma DHT_v de 1,0%. Em outro caso, o DHT_v foi linearmente aumentado de 1% até 2% a uma taxa de 0,05% por ano, enquanto o espectro harmônico permaneceu inalterado.

3.4.1.2 Resultados

A pesquisa apresentou os resultados iniciando com o caso mais simples e finalizando com o caso mais crítico, mostrando tais resultados através de gráficos dos valores máximos de DHT_v por alimentador.

A seguir é mostrado o gráfico do alimentador I, com a carga industrial de 25% e um DHT_v de 1% na subestação.

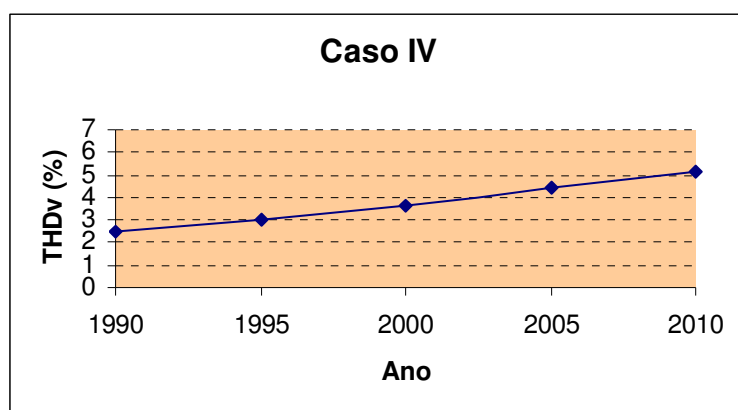


Figura 3.3 - Caso IV (alimentador I)

Fonte: Emanuel (1995)

Percebe-se na Figura 3.3 que, no final do período de 20 anos (2010), o máximo DHT_v atinge 5% para o caso IV, na situação supracitada.

No alimentador III, a distorção permaneceu menor que 5% em todos os barramentos, com exceção do caso IV, quando, depois do ano de 2008, o DHT_v ultrapassou 5% em algumas barras quando a tensão da subestação diminuiu e a carga industrial total durante o tempo crítico era de 50%. Com esses resultados, reafirmou-se a conclusão prévia de que alimentadores curtos são completamente imunes à poluição harmônica. O mesmo tipo de

análise foi feito para os outros alimentadores, porém esta dissertação optou por focar os casos mais críticos.

Da análise dos resultados obtidos no estudo, o DHT_v pode aumentar 0,01% por ano para uma taxa lenta de crescimento, e 0,35%, para uma taxa rápida. Enquanto que 0,01% por ano não é uma taxa alarmante, por outro lado, 0,35% por ano resulta em um incremento de 2% após 5,7 anos, concluiu o estudo. A partir de um razoável $DHT_v = 1,5\%$ (nível comum no final dos anos 80 no local estudado), seriam requeridos sistemas de mitigação dentro de dez anos para o caso de uma taxa de crescimento rápido.

A taxa de aumento de DHT_v /ano é função da taxa de aumento das CNL's (em kVA/ano), e é dependente da topologia do alimentador e também da amplitude e fase dos harmônicos. Os resultados obtidos no estudo apresentado descrevem as tendências para os três alimentadores que abastecem as cargas em Massachusetts. Tais conclusões não são genéricas, mas podem ser utilizadas como referência em outros estudos.

Na segunda parte do trabalho que trata sobre a avaliação econômica dos efeitos dos harmônicos nos alimentadores de distribuição Pileggi (Pileggi, 1995), do mesmo grupo de Emanuel, concluiu-se que o valor presente acumulado do custo com harmônicos nesses alimentadores tinham uma importância abaixo de US\$1.990,00 por unidade de potência aparente (kVA) para aqueles alimentadores que não precisavam de mitigação. Mas, quando filtros eram instalados naqueles que se faziam necessários, o custo poderia saltar uma ou duas unidades de magnitude.

3.4.2 Caso 2

Concessionária

Devido à crescente proliferação de cargas não lineares associada a uma previsão pouco otimista para a redução de seus efeitos, muitos setores prejudicados têm procurado se debruçar de forma realística sobre o assunto em busca de soluções economicamente factíveis. Neste sentido, uma concessionária brasileira realizou estudos na área de qualidade da energia com o objetivo de obter resultados que enriquecessem ainda mais a visualização da situação da Qualidade da Energia nos sistemas elétricos de distribuição.

relativamente baixo, considerando que o carregamento final nominal de planejamento do alimentador de 11,9 kV seria 5000 kW e a capacidade máxima de potência aparente, aproximadamente 10000 kVA. Com essa taxa de crescimento utilizada, chegou-se aos valores mostrados na Tabela 3.11. No final do ano 10, o alimentador teria um carregamento um pouco abaixo do carregamento final de planejamento ou em torno da metade da sua capacidade total.

Tabela 3.11 - Crescimento de carga do alimentador, em kVA

ano 0	ano 5	ano 10
2850	3640	4660

Assim como no caso 1, foi realizada uma projeção das contribuições das cargas não lineares (CNL's) baseada em hábitos de consumo através de pesquisa feita na região dos consumidores da concessionária. É mostrado abaixo o resumo dos valores considerados:

Tabela 3.12 - Quadro-resumo da evolução do crescimento das CNL's na demanda

Nível de crescimento de CNLs	Consumidores	Contribuição das CNLs na demanda (%)		
		Atual	Ano 5	Ano 10
Baixo	Residenciais	17,3	24,9	34,3
	Comerciais	27,8	33,4	38,4
	Industriais	20,0	27,5	35,0
Médio	Residenciais	17,3	33,3	50,9
	Comerciais	27,8	39,7	50,1
	Industriais	20,0	35,0	50,0
Alto	Residenciais	17,3	43,7	71,0
	Comerciais	27,8	49,8	68,2
	Industriais	20,0	45,0	70,0

Para as simulações, foi considerado que existia, conectado ao mesmo barramento onde estava ligado o alimentador em análise, na subestação, um outro alimentador com configuração e características exatamente iguais àquele.

3.4.2.2 Metodologia de avaliação das distorções harmônicas

O procedimento utilizado para a obtenção das informações sobre a composição das cargas de BT compreendeu a determinação da participação percentual de diversos tipos de equipamentos na demanda, classificação em cargas lineares (CLs) e não lineares (CNLs), identificação dos harmônicos característicos das diferentes CNLs e classificação das CLs. Foi considerada a demanda de ponta do sistema.

Cargas Residenciais

A composição das cargas residenciais foi determinada a partir dos dados de pesquisa de posse de equipamentos de uso final da concessionária e do estudo de hábito de consumo com levantamento de curvas de carga de consumidores residenciais.

A partir do estudo do hábito de consumo, é possível obter uma relação entre o consumo e a demanda, por faixa de consumo.

As contribuições dos equipamentos na demanda foram calculadas atribuindo um fator de demanda a cada equipamento, ajustando os valores de forma a obter resultado global próximo ao do estudo de hábito de consumo. A Tabela 2.2, apresenta o sumário do resultado e nela pode ser observado que as cargas não lineares representam cerca de 17% da demanda total. Os valores obtidos foram considerados válidos para a situação atual (ano 0).

Cargas Comerciais

A composição das cargas comerciais que contempla diversas modalidades de consumidores, por ramo de atividade, foi determinada a partir do estudo de posse de equipamentos e hábito de consumo de consumidores comerciais. Para as simulações, foi utilizada a composição média ponderada de todas as modalidades. Como não havia informações precisas sobre cargas lineares e não lineares, a classificação foi baseada em opiniões de fabricantes e especialistas no setor, bem como referências de literatura técnica. A composição resultante, utilizada nas simulações, é apresentada na Tabela 3.13. A porcentagem de resultante de CNLs de 27,8% para as cargas comerciais é um valor menor do que os utilizados no estudo norte americano mencionado anteriormente.

Tabela 3.13 - Contribuições na demanda das cargas de cons. comerciais - (ano 0)

Tipo		Contribuição na demanda (%)	
Cargas lineares	Carga resistiva		14,590
	Força-motriz linear		57,577
Cargas não lineares	Iluminação LF	3,328	27,833
	Motor com conversor monofásico	2,919	
	Motor com conversor trifásico	12,341	
	Aquecimento	8,895	
	Equipamento A *	0,252	
	Equipamento B **	0,097	
TOTAL			100,0

Notas: (*) TV, vídeo, fax, som, computador, impressora

(**) microondas, copiadora

Cargas Industriais

Para as cargas industriais, foi admitido no estudo, o valor de 20% para a porcentagem de CNLs, que é um valor menor do que os utilizados no estudo norte-americano.

As cargas não lineares industriais foram admitidas como compostas de conversores, nas seguintes proporções:

- conversor trifásico com carga RC: 50%;
- conversor trifásico com carga RL: 20%;
- conversor monofásico com carga RC: 10 %;
- conversor monofásico com carga RL: 20%.

3.4.2.3 Simulações

Para as simulações, foram elaborados modelos matemáticos para a representação das cargas lineares e não lineares, bem como a rede.

As cargas lineares de consumidores BT foram agrupadas em dois tipos: carga resistiva e carga de força-motriz. Já as cargas não lineares foram representadas por fontes de correntes harmônicas. As correntes harmônicas vindas do resto do sistema foram representadas por meio de uma outra fonte de correntes harmônicas.

3.4.2.4 Resultados

O resumo dos resultados das simulações realizadas pelo estudo, é apresentado a seguir, na Tabela 3.14:

Tabela 3.14 - Quadro-resumo das simulações de DHTv

Condições	Cresc. baixo de CNLs			Cresc. médio de CNLs			Cresc. Alto de CNLs		
Condição 1	Ano			Ano			Ano		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
DHTv subestação (%)	1,8	3,0	4,6	1,8	3,9	7,1	1,8	4,8	8,7
	0,0%	66,7%	155,6%	0,0%	116,7%	294,4%	0,0%	166,7%	383,3%
DHTv máx. alimentador (%)	2,6	4,4	6,8	2,6	5,7	10,3	2,6	6,9	12,6
	0,0%	69,2%	161,5%	0,0%	119,2%	296,1%	0,0%	165,4%	384,6%
Condição 2	Ano			Ano			Ano		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
DHTv subestação (%)	1,7	3,4	4,1	1,7	4,7	7,5	1,7	6,0	14,6
	0,0%	100,0%	141,2%	0,0%	176,5%	341,2%	0,0%	252,9%	758,8%
DHTv máx. alimentador (%)	2,5	4,8	5,7	2,5	6,5	10,2	2,5	8,4	19,6
	0,0%	92,0%	128,0%	0,0%	160,0%	308,0%	0,0%	236,0%	684,0%
Condição 3	Ano			Ano			Ano		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
DHTv subestação (%)	0,9	1,4	2,1	0,9	2,0	3,6	0,9	2,7	4,6
	0,0%	55,6%	133,3%	0,0%	122,2%	300,0%	0,0%	200,0%	411,1%
DHTv máx. alimentador (%)	1,5	2,4	3,7	1,5	3,4	6,0	1,5	4,5	7,6
	0,0%	60,0%	146,7%	0,0%	126,7%	300,0%	0,0%	200,0%	406,7%
Condição 4	Ano			Ano			Ano		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
DHTv subestação (%)	1,2	1,6	2,2	1,2	1,8	2,7	1,2	2,1	3,6
	0,0%	33,3%	83,3%	0,0%	50,0%	125,0%	0,0%	75,0%	200,0%
DHTv máx. alimentador (%)	1,8	2,4	3,3	1,8	2,7	4,1	1,8	3,2	5,5
	0,0%	33,0%	83,3%	0,0%	50,0%	127,8%	0,0%	77,8%	205,6%
Condição 5	Ano			Ano			Ano		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
DHTv subestação (%)	0,8	1,2	2,1	0,8	1,8	3,7	0,8	2,7	6,4
	0,0%	50,0%	162,5%	0,0%	125,0%	362,5%	0,0%	237,5%	700,0%
DHTv máx. alimentador (%)	1,2	1,9	3,1	1,2	2,7	5,6	1,2	4,1	9,7
	0,0%	58,3%	158,3%	0,0%	125,0%	366,7%	0,0%	241,7%	708,3%

Nota: Os valores percentuais (%) da tabela indicam os aumentos em relação aos valores do ano 0.

Onde:

Condição 1 - Rede em situação normal com banco de capacitores;

Condição 2 - Rede em situação normal, com banco de capacitores, mas sem considerar chuveiros com controle eletrônico;

Condição 3 - Rede em situação normal, sem banco de capacitores, mas sem considerar chuveiros com controle eletrônico;

Condição 4 - Rede residencial, sem banco de capacitores, sem considerar chuveiros com controle eletrônico;

Condição 5 - Rede residencial e rede comercial, sem banco de capacitores.

Os casos simulados sem os bancos de capacitores permitiram verificar, de forma mais simples, a resposta da rede às cargas não lineares, devido ao comportamento mais regular do que os dos casos com bancos de capacitores.

Por exemplo, para a Condição 1, rede normal, com banco de capacitores, os resultados indicam que DHT_V no alimentador já atingiria o valor limite de 5% no final do ano 10 e na hipótese de crescimento baixo de CNLs. Por outro lado, a ultrapassagem do limite na subestação é prevista no final do ano 10 para crescimento médio e alto de CNLs. As simulações com bancos de capacitores revelaram níveis de distorções consideravelmente maiores do que nos casos sem bancos de capacitores.

As simulações realizadas possibilitaram uma avaliação de como poderá ser a evolução das distorções harmônicas em um alimentador típico de distribuição no futuro próximo, indicando possibilidade de ultrapassagem do limite de DHT_V de 5% no ano 5 ou 10 em rede sem e com bancos de capacitores, dependendo do caso e do crescimento de carga não linear.

Se for considerada a rede com banco de capacitores, os níveis de distorção de tensão serão muito mais elevados. Isso indica que, ao usar bancos de capacitores na rede para a compensação reativa, serão necessários cuidados especiais para evitar elevadas distorções harmônicas.

CAPÍTULO IV

NOVOS PROTOCOLOS DE MEDIÇÃO

Os medidores de energia elétrica mais antigos e convencionais, aqueles com disco de indução, foram projetados e ajustados para atuarem em sistemas elétricos com ondas de tensão e corrente senoidais na frequência de 60 Hz.

A avaliação de desempenho destes medidores, há décadas atrás, era focada apenas nos erros metrológicos apresentados pelo *hardware* que compunha tais instrumentos. O foco principal era a classe de exatidão. Tal erro é conhecido como erro intrínseco do equipamento de medição, que varia de acordo com suas características construtivas e limitações físicas.

Já os medidores mais modernos, em sua forma construtiva, receberam o avanço tecnológico da informática, ao serem providos de recursos que podem ser programados na sua fabricação. Ou seja, além das características eletrônicas e mecânicas, o medidor eletrônico atual possui o recurso da programação, o *software*.

Essa programação define uma metodologia de cálculo das energias, após a coleta dos dados referentes aos sinais de tensão e corrente adquiridos ao longo do tempo no sistema elétrico no qual foi conectado. Portanto, o *software* dos medidores eletrônicos possui o modelamento matemático conhecido como protocolo de medição e cálculo dos diversos parâmetros elétricos (potência, energia, fator de potência, etc), para os quais são fabricados. Este protocolo pode ser alterado de acordo com a programação realizada na fabricação, ao contrário dos medidores antigos, eletromecânicos, que sempre fizeram uso do protocolo clássico de medição.

Este trabalho se dedica exclusivamente a analisar o erro metodológico dos medidores, o qual é função do modelamento matemático, sob o enfoque dos novos protocolos de medição, conforme dito anteriormente. Ou seja, preocupa-se em observar qual o comportamento dos medidores, eletromecânicos e eletrônicos, em termos de medição e faturamento, quando na presença de sinais distorcidos, realizam a contabilização da energia elétrica reativa segundo a metodologia dos novos protocolos, que foram apresentados e validados por Bernardes em sua tese de doutorado (Bernardes, 2003).

A seguir, tem-se uma abordagem sobre os dois protocolos de medição em questão: o clássico e o novo.

4.1 Protocolo clássico

Na sequência, serão mostrados os conceitos clássicos de potências elétricas em ambientes não distorcidos, puramente senoidais.

Quando a forma de onda é senoidal, os valores instantâneos de corrente (i) e de tensão (v) podem ser, respectivamente, representados pelas seguintes expressões (Bernardes, 2003):

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$v = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde:

I – valor eficaz da corrente;

V – valor eficaz da tensão;

ω - frequência angular;

t – tempo;

φ - ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

A fonte é a responsável pela manutenção dos valores eficazes da tensão e da corrente (V e I), ou seja, pela potência aparente (S). Essa potência é definida pelo Dr. Alexander Emanuel, em sua nota de aula "Apparent Power: Part I - Components and Physical Interpretation", Worcester Polytechnic Institute, Worcester - MA - USA, como sendo a máxima potência ativa que pode ser fornecida por uma fonte enquanto se mantiver invariante

a sua tensão de saída e forem constantes suas perdas internas. Seu valor é expresso em volt-ampère e, geralmente, define o valor da potência nominal da fonte que, em sistemas monofásicos, é dado por:

$$S = V \cdot I \quad (\text{Equação 4.3})$$

É sabido que, em um circuito com sinais alternados, a potência também é alternada. O valor instantâneo dessa potência, em um instante (t) qualquer, denominado potência instantânea (p), pode ser obtido através da expressão:

$$p = v \cdot i \quad (\text{Equação 4.4})$$

Sendo as formas de onda dos sinais de tensão e de corrente senoidais, então seus valores instantâneos podem ser expressos conforme a Equação 4.1 e a Equação 4.2, sendo assim, a potência instantânea será dada por:

$$p = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (\text{Equação 4.5})$$

Por outro lado, utilizando-se os recursos da trigonometria, obtém-se a expressão da potência p dada na Equação 4.6 logo a seguir:

$$\sin a \cdot \sin b = \frac{1}{2} \cdot \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cdot \cos(a + b)$$

Conseqüentemente, tem-se:

$$\text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)$$

$$p = V \cdot I \cdot \cos \varphi - V \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi) \quad (\text{Equação 4.6})$$

A partir da Equação 4.6, percebe-se que ela possui duas parcelas que a compõem: uma primeira constante no tempo, e outra, variante no tempo.

A Figura 4.1 mostra, para dois sinais senoidais arbitrários de mesma frequência, as formas de onda da tensão (em vermelho), da corrente (em azul) e da potência instantânea (em verde) em função do tempo.

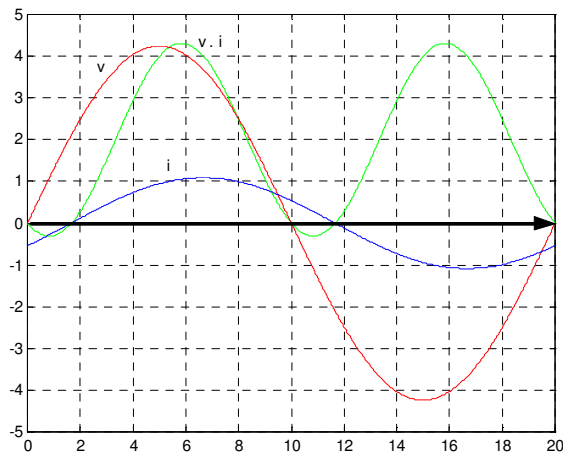


Figura 4.1 - Formas de ondas da tensão, corrente e potência instantânea

Fonte: Bernardes (2003)

Uma parcela da potência aparente, denominada potência ativa (P), é a responsável pela realização de trabalho. Essa parcela corresponde ao valor médio da potência instantânea e pode ser calculado pela expressão:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (\text{Equação 4.7})$$

Quando a tensão e a corrente são senoidais, o valor médio da potência instantânea, a chamada ativa, corresponde à parcela da potência instantânea, expressa na Equação 4.6, que não varia no tempo, ou seja:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{Equação 4.8})$$

Se a carga é um resistor ideal, então $\varphi = 0$, e a potência instantânea (p) e a energia (w) são:

$$p = V \cdot I \cdot [1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)] \quad (\text{Equação 4.9})$$

$$w = \int_0^t p \cdot dt = V \cdot I \cdot t - \frac{V \cdot I}{2 \cdot \omega} \sin(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (\text{Equação 4.10})$$

Como pode ser observado, na Equação 4.9, em qualquer momento em que se analise a potência instantânea, verifica-se que seu valor é sempre maior ou igual a zero. Este resultado é bastante significativo, uma vez que mostra que, embora a corrente e a tensão tenham formas de onda alternadas, o fluxo de energia mantém-se sempre na mesma direção, obviamente da fonte para a carga.

Agora, para o caso geral expresso pela Equação 4.6, quando $\varphi \neq 0$, a potência instantânea é alternada, assumindo valores positivos e negativos. Conseqüentemente, a energia também flui em ambas as direções. Por exemplo, no intervalo de tempo onde $k\pi < \omega t < (k\pi + \varphi)$, para $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a energia flui da carga para a fonte.

A raiz quadrada da diferença entre os valores ao quadrado da potência aparente e da potência ativa é denominada por potência reativa de deslocamento (Q) e pode ser interpretada como sendo uma parcela da potência aparente que, apesar de não produzir trabalho, contribui com o aumento do valor eficaz da corrente da fonte. Esse fenômeno foi explicado em 1888, ocasião em que foi denominado deslocamento de fase da corrente (Shallenberger, 1988; Stanley, 1988). Essa parcela adicional de potência deve-se a características da carga que fazem com que seja estabelecida uma alternância no fluxo de potência entre a fonte e a carga: ora fluindo da fonte para a carga, ora no sentido inverso. Seu valor pode ser calculado através da expressão:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{Equação 4.11})$$

ou ainda:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{Equação 4.12})$$

A taxa de variação da energia que é transferida entre a fonte e a carga, em função do tempo, define a grandeza conhecida por potência instantânea (p), que é dada por:

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (\text{Equação 4.13})$$

onde $\frac{dw}{dt}$ é a taxa de variação da energia no tempo.

Embora esteja em perfeito acordo com o conceito físico de potência, a potência instantânea, sendo função do tempo, não se mostra conveniente para retratar o fenômeno de transferência de energia. Contudo, ela pode ser decomposta em duas parcelas, também senoidais, mostradas na Figura 4.2.

Para tanto, toma-se a equação da potência instantânea expressa na Equação 4.6 e faz-se uso da conhecida relação trigonométrica dada por:

$$\cos(a + b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b$$

obtem-se:

$$p = V \cdot I \cdot \cos \varphi - V \cdot I \cdot [\cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot \cos \varphi + \sin(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot \sin \varphi] \quad (\text{Equação 4.14})$$

ou

$$p = P - P \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - Q \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (\text{Equação 4.15})$$

Uma das parcelas, ora designada por p_{un} , mostrada em vermelho na Figura 4.2, é a unidirecional. Seu valor médio corresponde à potência ativa que flui da fonte para a carga. É dada por:

$$p_{un} = P \cdot (1 - \cos 2 \cdot \omega \cdot t) \quad (\text{Equação 4.16})$$

A outra, ora denominada por p_{al} , mostrada em azul na Figura 4.2, é a alternada. Seu valor de pico corresponde à potência reativa trocada entre a carga e fonte. É dada por:

$$p_{al} = Q \cdot \sin 2 \cdot \omega \cdot t \quad (\text{Equação 4.17})$$

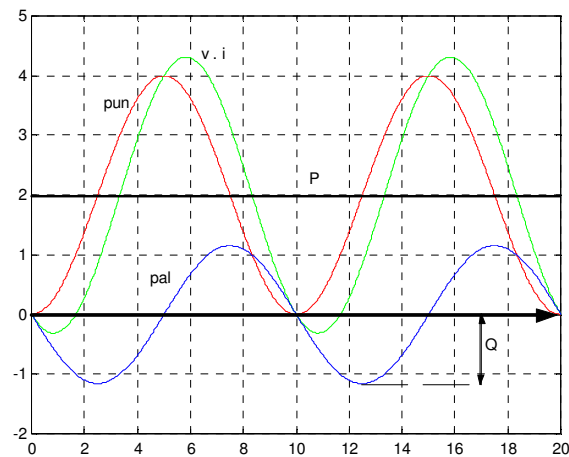


Figura 4.2 - Formas de ondas das parcelas da potência instantânea

Fonte: Bernardes (2003)

A abrangência desses conceitos pode ser facilmente estendida para sistemas trifásicos equilibrados, resultando em:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (\text{Equação 4.18})$$

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (\text{Equação 4.19})$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (\text{Equação 4.20})$$

onde:

V – valor eficaz das tensões de linha;

I – valor eficaz das correntes de linha.

Na definição clássica de potência aparente, sabe-se que, na forma complexa, temos:

$$S = P + j.Q \quad (\text{Equação 4.21})$$

onde:

S - Potência aparente [VA];

P - Potência ativa [kW];

Q - Potência reativa [kvar].

sendo que o módulo da potência aparente é dado pela expressão:

$$\text{Protocolo clássico} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{Equação 4.22})$$

É a partir dos valores das potências medidas, que em seguida são integrados no tempo, no caso dos medidores eletrônicos, que se obtêm os valores das energias a serem faturadas. Portanto, este trabalho requer uma abordagem tanto para as potências como para as energias que serão tratadas nas análises.

4.2 Novos protocolos

Observa-se que em determinados sistemas, ausentes de deslocamento de corrente em relação à tensão (potência reativa de deslocamento nula), há uma solicitação de potência aparente ligeiramente maior que a potência ativa demandada. Esse acréscimo de potência aparente causado pelas cargas não lineares foi denominado potência de distorção (D), conforme Equação 4.23 e tratado inicialmente por Budeanu, na década de 20 (Budeanu, 1927), e definido como (Czarnecki, 1990):

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{Equação 4.23})$$

No início do século passado, Budeanu (1927) propôs uma equação para o cálculo de potência de distorção (D) que adotava como parâmetros os componentes harmônicos da série de Fourier e seus respectivos ângulos. A expressão resultante do desenvolvimento do somatório, chamada Budeanu Modificada, conduz a resultados validados experimentalmente no trabalho de Bernardes, (2003). Yildirim (1999) conclui que a expressão *Budeanu Modificada* seria rigorosamente a mais correta.

Ambientes não equilibrados

Da mesma forma que a potência de distorção “D”, mais recentemente, a potência de desequilíbrio “A” tem despertado fortes interesses, embora ainda não tenha sido discutida devido à provável complexidade de seu conceito e medição (Bernardes, 2003).

Durante muito tempo, na história da engenharia elétrica, considerou-se o sistema trifásico como a composição de três monofásicos, para se determinar a potência aparente:

$$\dot{S}_{(\text{antigo})} = \dot{V}_{AN} \dot{I}_A^* + \dot{V}_{BN} \dot{I}_B^* + \dot{V}_{CN} \dot{I}_C^* \quad (\text{Equação 4.24})$$

onde:

$\dot{S}_{(\text{antigo})}$ - é a potência aparente determinada pelo processo convencional;

$\dot{V}_{AN}$, $\dot{V}_{BN}$, e $\dot{V}_{CN}$ - são fasores das tensões de fase;

$\dot{I}_A^*$, $\dot{I}_B^*$ e $\dot{I}_C^*$ - são os fasores conjugados das correntes de linha.

Da Equação 4.24, resulta que:

$$P = V_{AN} I_A \cdot \cos \varphi_A + V_{BN} I_B \cdot \cos \varphi_B + V_{CN} I_C \cdot \cos \varphi_C \quad (\text{Equação 4.25})$$

$$Q = V_{AN} I_A \cdot \sin \varphi_A + V_{BN} I_B \cdot \sin \varphi_B + V_{CN} I_C \cdot \sin \varphi_C \quad (\text{Equação 4.26})$$

No entanto, em 1922, Buchholz sugeriu um modo diferente de conceituar a potência aparente. Segundo essa nova conceituação, um circuito trifásico com tensões e/ou correntes desequilibradas poderia ser representado por um circuito equivalente com tensões e/ou correntes equilibradas que promovessem o mesmo fluxo de potência ativa, situação na qual ocorre a minimização das perdas que são inerentes a qualquer processo de transmissão de energia elétrica. O equacionamento do novo conceito proposto é mostrado na Equação 4.27, que contabiliza o efeito do desequilíbrio de tensão, de corrente, ou de ambos acontecendo simultaneamente. Posteriormente, o IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situation (IEEE, 1995b), adotou essa definição, expressa na Equação 4.27, a seguir:

$$S = \sqrt{(V_{AN})^2 + (V_{BN})^2 + (V_{CN})^2} \cdot \sqrt{(I_A)^2 + (I_B)^2 + (I_C)^2} \quad (\text{Equação 4.27})$$

Pode ser demonstrado que as Equações 4.24 e 4.27 conduzem a resultados idênticos de potência aparente quando o sistema em análise é equilibrado e possui sinais de corrente e tensão senoidais, mas apresentam resultados diversos quando aplicadas em sistemas com características de equilíbrio e pureza de sinais comprometidos (Bernardes, 2003).

A potência aparente

Há muito se tem discutido sobre a melhor forma de definir o que é potência aparente, pois dela deriva toda a noção de ocupação do sistema elétrico por uma determinada carga.

Parte dos profissionais que trabalha no setor elétrico já aceita que a potência aparente deve ser calculada pela multiplicação da tensão trifásica equivalente pela corrente trifásica equivalente, como na Equação 4.27. Essa aceitação representa uma significativa evolução no cálculo desta potência, uma vez que considera os efeitos da ocupação excedente causada pelas potências não ativas de distorção e desequilíbrio.

Por outro lado, a potência aparente é a composição de todas as potências envolvidas na ocupação do sistema elétrico e é expressa por (Bernardes, 2003):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + A^2} \quad (\text{Equação 4.28})$$

onde,

P - potência ativa;

Q - potência não-ativa de deslocamento;

D - potência não-ativa de distorção;

A - potência não-ativa de assimetria ou de desequilíbrio.

4.2.1 Potências em análise

Para determinar-se a expressão de cada potência, ativa e não-ativa, é necessário, inicialmente, discriminar cada componente harmônica dos sinais elétricos envolvidos na medição. Sendo assim, a transformada discreta de Fourier (TDF) é a ferramenta básica para

essa tarefa e pode ser aplicada aos sinais trifásicos de tensão e de corrente de um circuito elétrico. Desta forma, esses sinais podem ser caracterizados pelas expressões abaixo:

Tensões

$$v_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{An} \sin(n\omega t + \phi_{An})$$

$$v_B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{Bn} \sin(n\omega t + \phi_{Bn}) \quad (\text{Equação 4.29})$$

$$v_C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{Cn} \sin(n\omega t + \phi_{Cn})$$

Correntes

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{An} \sin(n\omega t + \phi_{An})$$

$$i_B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Bn} \sin(n\omega t + \phi_{Bn}) \quad (\text{Equação 4.30})$$

$$i_C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Cn} \sin(n\omega t + \phi_{Cn})$$

onde V_{An} , V_{Bn} , V_{Cn} , e I_{An} , I_{Bn} , I_{Cn} são, respectivamente, os valores eficazes dos harmônicos de ordem “n” das tensões e correntes nas fases A, B e C.

4.2.1.1 A potência ativa “P”

A potência ativa total P é definida como o valor médio da potência em função do tempo. No caso do sistema trifásico, é expressa como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v_A(t) i_A(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_B(t) i_B(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_C(t) i_C(t) dt \quad (\text{Equação 4.31})$$

Por outro lado, sabe-se que os harmônicos de ordens diferentes são regidos pelo princípio da ortogonalidade (Bernardes, 2003), que pode ser traduzido por:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin(n\omega t + \theta_n) \cdot \sin(m\omega t + \theta_m) dt = 0 \quad (\text{Equação 4.32})$$

onde:

T é o período da fundamental dos dois sinais harmônicos;

θ_n e θ_m são ângulos de fase quaisquer;

n e m são inteiros positivos e $n \neq m$.

Então, aplicando-se na Equação 4.31 as Equações 4.29 e 4.30 e ainda levando-se em conta o princípio da ortogonalidade entre harmônicos de tensão e corrente de ordens diferentes, obtém-se:

$$\begin{aligned}
P = & V_{A1} I_{A1} \cos(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{A2} I_{A2} \cos(\phi_{A2} - \varphi_{A2}) + \dots + \\
& V_{B1} I_{B1} \cos(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{B2} I_{B2} \cos(\phi_{B2} - \varphi_{B2}) + \dots + \\
& V_{C1} I_{C1} \cos(\phi_{C1} - \varphi_{C1}) + V_{C2} I_{C2} \cos(\phi_{C2} - \varphi_{C2}) + \dots
\end{aligned} \quad (\text{Equação 4.33})$$

A Equação 4.33 pode ser simplificada resultando em:

$$P = P_{A1} + P_{A2} + \dots + P_{B1} + P_{B2} + \dots + P_{C1} + P_{C2} + \dots \quad (\text{Equação 4.34})$$

o que resulta em:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_{An} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{Bn} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{Cn} = \sum_{\substack{n=1 \\ j=A,B,C}}^{\infty} P_{jn} \quad (\text{Equação 4.35})$$

Neste ponto do desenvolvimento, cabe ressaltar que em sistemas elétricos é usual que a tensão possua uma forte característica senoidal, ou seja, as distorções nos sinais de tensão são pequenas e, portanto, normalmente os valores das potências ativas dos harmônicos (P_{A2} , P_{A3} , ..., P_{B2} , P_{B3} , ..., P_{C2} , P_{C3} , ...) são também pequenos (Bernardes, 2003), podendo muitas vezes ser desprezados. Apesar disso, neste trabalho, em uma primeira análise, eles serão considerados.

4.2.1.2 A potência não ativa de deslocamento “Q”

Analogamente à potência ativa “P”, a potência não ativa de deslocamento “Q” pode ser expressa por (Bernardes, 2003):

$$Q = Q_{A1} + Q_{A2} + \dots + Q_{B1} + Q_{B2} + \dots + Q_{C1} + Q_{C2} + \dots \quad (\text{Equação 4.36})$$

Então;

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{An} + \sum_{n=1}^{\infty} Q_{Bn} + \sum_{n=1}^{\infty} Q_{Cn} = \sum_{\substack{n=1 \\ j=A,B,C}}^{\infty} Q_{jn} \quad (\text{Equação 4.37})$$

Vale observar que as parcelas de potência de deslocamento são grandezas oriundas do mesmo fenômeno elétrico, ou seja, o deslocamento angular entre a tensão e a corrente de mesma ordem harmônica, para uma mesma fase, refletindo portanto a mesma natureza. Desta forma, o valor total da grandeza é obtido pela soma escalar das parcelas, da mesma maneira que as parcelas da potência ativa.

4.2.1.3 A potência não ativa de distorção “D”

A maneira de se chegar à expressão de “D” consiste em partir de um sistema monofásico fazendo, portanto, com que a potência não ativa de desequilíbrio “A” seja igual a zero. Através de manipulações algébricas na Equação 4.38, obtém-se a Equação 4.39 :

$$S^2 = V^2 \cdot I^2 \Rightarrow S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{Equação 4.38})$$

$$D^2 = V^2 \cdot I^2 - P^2 - Q^2 \quad (\text{Equação 4.39})$$

Onde, V e I são os valores eficazes totais dos sinais de tensão e corrente de apenas uma fase, incluindo os harmônicos:

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots \Rightarrow V^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \quad (\text{Equação 4.40})$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots \Rightarrow I^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (\text{Equação 4.41})$$

O que resulta na expressão da potência “D” para uma única fase:

$$D_{(\text{uma fase})}^2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m I_n V_n I_m \cos(\gamma_m - \gamma_n) \quad (\text{Equação 4.42})$$

Onde γ_m e γ_n são os ângulos formados entre a tensão e a corrente de mesma ordem harmônica:

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \phi_m - \varphi_m \\ \gamma_n &= \phi_n - \varphi_n \end{aligned} \quad (\text{Equação 4.43})$$

De maneira idêntica à que ocorre com as outras potências (P e Q), as parcelas de potência de distorção são grandezas oriundas do mesmo fenômeno elétrico, ou seja, a distorção na tensão e/ou na corrente refletindo, portanto, a mesma natureza. Desta forma, o valor total da grandeza trifásica pode ser obtido pela soma escalar das parcelas das outras fases. A expressão trifásica de “D” pode ser escrita como:

$$D = \sum_{k=A,B,C} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_{km}^2 I_{kn}^2 + V_{kn}^2 I_{km}^2 - 2 \cdot V_{km} I_{kn} V_{kn} I_{km} \cos(\gamma_{km} - \gamma_{kn})} \quad (\text{Equação 4.44})$$

Na Equação 4.44, a potência de distorção “D” é função apenas dos harmônicos de tensão, de corrente e dos respectivos ângulos. Em razão disso, ela permite que o valor dessa potência seja calculado diretamente, sem que haja a necessidade de que sejam calculados os valores de S, P e Q.

4.2.1.4 A potência não ativa de desequilíbrio “A”

Para o entendimento e o equacionamento inicial deste fenômeno, há a necessidade de se trabalhar com um sistema trifásico sem distorção, porém desequilibrado. Em seguida, para agregarem-se harmônicos e desequilíbrios ao mesmo tempo, será necessário tratar cada ordem harmônica separadamente (por exemplo: 3º harmônico de tensão e 3º de corrente, para as três fases) como um sistema trifásico desequilibrado, desacoplado das outras ordens harmônicas. Ao final, os resultados das potências de desequilíbrio, um para cada ordem harmônica, são reunidos para formar a potência de desequilíbrio total.

Inicialmente, toma-se um sistema com carga linear (somente sinais fundamentais), porém desequilibrado tanto em tensão quanto em corrente. Como existem somente as componentes fundamentais dos sinais envolvidos, a partir das Equações 4.29, 4.30, 4.35 e 4.37, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} S_1^2 &= V_{EQ1}^2 \cdot I_{EQ1}^2 \\ S_1^2 &= (V_{A1}^2 + V_{B1}^2 + V_{C1}^2) \cdot (I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2) \\ S_1^2 &= P_1^2 + Q_1^2 + A_1^2 \end{aligned} \quad (\text{Equação 4.45})$$

onde:

$$\begin{aligned} P_1^2 &= (P_{A1} + P_{B1} + P_{C1})^2 \\ P_1^2 &= [V_{A1} I_{A1} \cos(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{B1} I_{B1} \cos(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{C1} I_{C1} \cos(\phi_{C1} - \varphi_{C1})]^2 \end{aligned} \quad (\text{Equação 4.46})$$

e:

$$Q_1^2 = (Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1})^2 \quad (\text{Equação 4.47})$$

$$Q_1^2 = [V_{A1} I_{A1} \sin(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{B1} I_{B1} \sin(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{C1} I_{C1} \sin(\phi_{C1} - \varphi_{C1})]^2$$

aplicando-se as Equações 4.46 e 4.47 na Equação 4.45 chega-se a:

$$A_1 = \sqrt{\Lambda_1 + \Gamma_1 + \Psi_1 + \Theta_1} \quad (\text{Equação 4.48})$$

onde:

$$\Lambda_1 = V_{A1}^2 I_{B1}^2 + V_{A1}^2 I_{C1}^2 + V_{B1}^2 I_{A1}^2 + V_{B1}^2 I_{C1}^2 + V_{C1}^2 I_{A1}^2 + V_{C1}^2 I_{B1}^2$$

$$\Gamma_1 = -2 \cdot V_{A1} V_{B1} I_{A1} I_{B1} \cos(\gamma_{A1} - \gamma_{B1})$$

$$\Psi_1 = -2 \cdot V_{B1} V_{C1} I_{B1} I_{C1} \cos(\gamma_{B1} - \gamma_{C1})$$

$$\Theta_1 = -2 \cdot V_{C1} V_{A1} I_{C1} I_{A1} \cos(\gamma_{C1} - \gamma_{A1})$$

Bernardes (2003), após resultados de validação, observou que:

- a expressão (4.48) foi desenvolvida somente para a potência não ativa de desequilíbrio para os sinais fundamentais;
- a expressão revela que a potência de desequilíbrio “A” é oriunda do produto cruzado dos sinais de tensão e corrente de fases diferentes;
- pelo fato de serem fenômenos de mesma natureza, a potência fundamental de desequilíbrio e as harmônicas de desequilíbrio (A_1 , A_2 , ...) podem ser agrupadas cartesianamente na mesma dimensão, portanto, podem ser somadas aritmeticamente. Disso

resulta então a Equação 4.49, que fornece a potência total de desequilíbrio envolvendo harmônicos.

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\Lambda_n + \Gamma_n + \Psi_n + \Theta_n} \quad (\text{Equação 4.49})$$

onde:

$$\Lambda_n = V_{An}^2 I_{Bn}^2 + V_{An}^2 I_{Cn}^2 + V_{Bn}^2 I_{An}^2 + V_{Bn}^2 I_{Cn}^2 + V_{Cn}^2 I_{An}^2 + V_{Cn}^2 I_{Bn}^2$$

$$\Gamma_n = -2 \cdot V_{An} V_{Bn} I_{An} I_{Bn} \cos(\gamma_{An} - \gamma_{Bn})$$

$$\Psi_n = -2 \cdot V_{Bn} V_{Cn} I_{Bn} I_{Cn} \cos(\gamma_{Bn} - \gamma_{Cn})$$

$$\Theta_n = -2 \cdot V_{Cn} V_{An} I_{Cn} I_{An} \cos(\gamma_{Cn} - \gamma_{An})$$

Considerar a existência de outras parcelas de potências não-ativas na composição da potência aparente, além da já universalmente sancionada potência reativa de deslocamento, induz naturalmente ao estudo do modo como estas parcelas possam interferir no processo de faturamento da energia elétrica. Bernardes (2003) objetivou em seu trabalho, através do uso do conceito de fator de potência, estabelecer diretrizes para o cálculo de novos fatores de potência que estão associados a essas parcelas de potências não ativas.

4.2.2 Fator de potência global

Bernardes, em seu trabalho apresentado em 2003, sugeriu o chamado fator de potência global (FP_G), que contabiliza simultaneamente os efeitos da distorção, desequilíbrio e deslocamento. É mostrada abaixo a Equação 4.50, utilizada para se calcular esse índice (Bernardes, 2003):

$$FP_G = FP_Q . FP_D . FP_A \quad (\text{Equação 4.50})$$

onde:

FP_G – fator de potência global;

FP_Q - fator de potência de deslocamento;

FP_D - fator de potência de distorção;

FP_A - fator de potência de desequilíbrio.

Esses fatores de potência são tratados com maior detalhamento no trabalho de Bernardes. Aqui eles foram apenas citados, uma vez que os seus conceitos e definições não são o objetivo principal do escopo deste trabalho.

CAPÍTULO V

DESEMPENHO DOS MEDIDORES

5.1 Estado da arte

Os medidores de energia elétrica têm sido foco de diversos estudos com o objetivo de se avaliarem as consequências por eles sofridos no faturamento da energia, quando submetidos a sistemas elétricos com a Qualidade de Energia comprometida.

Um dos fenômenos cujos efeitos se tem procurado conhecer nos medidores, dentre outros, é a distorção harmônica. Uma grande parte dos estudos procura enfocar os efeitos de sinais distorcidos na medição de energia ativa.

Há mais de 30 anos, artigos e trabalhos são publicados e apresentados em conferências e congressos internacionais com o objetivo de divulgar os resultados obtidos nessas pesquisas.

Emanuel (1981) apresentou um modelo matemático, através do qual obteve os valores dos erros dos medidores de energia quando eram ligados a retificadores e inversores de potência. Ele concluiu que as maiores intensidades dos erros surgiam com elevados ângulos de disparos dos equipamentos de potência citados anteriormente. Nesses casos, ocorreram experimentalmente, erros da ordem de 16% para os carregadores de bateria, com ângulo de condução $\alpha = 50^\circ$. Foi possível para o autor perceber que os erros em geral apontavam em favor da concessionária de energia. Tais erros são chamados de erros positivos.

Já em 1990, Girgis (1990) e sua equipe do IEEE testaram, com a ajuda de um computador pessoal, um medidor de indução trifásico de energia ativa na presença de distorção harmônica. Um sensor de fibra óptica foi projetado, na época, para converter a rotação do disco do medidor em sinais digitais a serem armazenados no PC. Ao final, comprovaram a influência da distorção harmônica nos medidores watt-hora. Para o medidor trifásico ensaiado, o máximo erro negativo foi constatado quando a corrente harmônica estava em fase com a tensão harmônica. O erro máximo positivo foi percebido quando a corrente distorcida passava pelo ângulo de 180° .

Filipiski (1992) obteve em sua pesquisa, resultados alarmantes quando se dedicou a analisar os medidores de energia reativa. Sua conclusão foi que a definição de potência utilizada para ser a referência nas comparações dos valores medidos era o principal fator de influência no cálculo do erro. Os erros relativos variaram de - 41% a 68% quando formas de ondas reais foram aplicadas.

Saied (1995), desenvolveu um estudo sobre a exatidão de medidores indutivos de energia ativa simulando medições com sinais de tensão e corrente distorcidos, através do *software* MATHEMATICA. Primeiramente, ele simulou o medidor sob condições puramente senoidais de tensão e corrente para avaliar o erro intrínseco ao medidor. Posteriormente, simulou medições considerando a presença simultânea de distorção de corrente e tensão, expressando assim o erro em função de 3 parâmetros principais: distorção harmônica de corrente (DHTi), distorção harmônica de tensão (DHTv) e, finalmente, da corrente fundamental. O modelo obtido permitia analisar a influência de cada um destes parâmetros no erro de medição. Chegou a observar diversas ordens de erros máximos, em função do fator de potência, DHTi e DHTv, que variaram de - 1,5% a 40%, com auxílio das equações ajustadas ao modelo.

Alexander Domijan (1996) e um grupo de pesquisadores avaliaram o desempenho de medidores de energia ativa quando submetidos a sinais de corrente e tensão distorcidos e desbalanceados. Após desenvolver o trabalho em etapas, o grupo ressaltou o fato de que sinais com o mesmo valor de DHT podem apresentar erros distintos no medidor. Sugeriram então que, para se avaliar o impacto causado na medição de energia ativa, devia-se classificar a forma de onda dos sinais não só pelo valor de DHT simplesmente, mas também o espectro harmônico em amplitude e fase. O grupo destacou também que os erros dos medidores estavam associados à potência harmônica das ondas de tensão e correntes a eles aplicados.

Nessa mesma pesquisa, após analisar medidores monofásicos e trifásicos, submetidos a sinais com conteúdo harmônico e desbalanços, registraram-se erros de até 10% nas medições.

Com o objetivo de estimar os erros metodológicos nas medições de energia elétrica e no faturamento, Arseneau (1997) fazendo uso de dados de uma campanha de medição de níveis harmônicos, encontrou erros de até 30% no faturamento da energia elétrica ao comparar diferentes metodologias empregadas na medição. Ele chegou à conclusão de que, se consumidores e concessionária de energia atendessem aos limites recomendados pela norma americana IEEE Std 519/1992, seria possível haver equidade de faturamento entre todos os métodos conhecidos.

Num artigo publicado em 1999, Siqueira (1999) teve como objetivo avaliar a influência das distorções harmônicas nos medidores de energia elétrica através da comparação entre as leituras de vários medidores eletromecânicos e eletrônicos. Após o trabalho, o autor concluiu que mesmo em ambientes distorcidos pela presença de componentes harmônicas nas formas de ondas, os medidores fornecem leituras confiáveis, mas tais distorções acarretam maiores desvios nas leituras de energia reativa do que nas de energia ativa.

Um grupo de pesquisadores da UNIFEI (Guimarães, 2001), em parceria com a USP, realizaram ensaios com medidores de energia elétrica em laboratório utilizando um protocolo conhecido. Foram testados três tipos de medidores: medidor de indução, ampère-hora e digital. Primeiramente, o medidor de indução foi ensaiado conforme os métodos de ensaio da norma brasileira NBR 14520:2000. Posteriormente, diversas combinações de sinais de tensão e corrente defasados com deslocamento de fase foram aplicadas ao primeiro tipo de medidor, totalizando 7 ensaios. Apesar de ser uma situação mais incomum, no último ensaio, com uma defasagem angular de $-69,4^\circ$, um $DHT_v = 26\%$ e $DHT_i = 56\%$, o medidor apresentou um erro de $-18,3\%$. Para o medidor ampère-hora, em condições de distorção de corrente ($DHT_i \sim 99\%$), apresentou um erro de $-38,2\%$. Na terceira parte do trabalho, foram ensaiados os medidores trifásicos digitais. Utilizaram-se três tipos de medidores com recursos de medição de energia ativa (kW.h) e reativa (kvar.h). Pode-se concluir que esses medidores apresentam um desempenho satisfatório na medição de energia ativa (kW.h), mas erros inaceitáveis foram detectados na medição de energia reativa (kvar.h).

5.2 Abordagem sobre os medidores eletromecânicos e eletrônicos

O medidor de energia elétrica caracteriza a fronteira entre o consumidor e a concessionária que fornece a energia elétrica para as mais diversas formas de utilização.

A Norma Brasileira NBR 14519 define o medidor de energia elétrica como o instrumento destinado a medir a energia elétrica através da integração da potência em relação ao tempo (ABNT, 2000b).

Pode-se dizer que o sistema de medição de energia elétrica recebe uma especial atenção da concessionária, pois é ele o responsável pelos índices de faturamento na comercialização do “produto” chamado energia elétrica. Atualmente, em programas de

eficientização energética, estimulados pelo governo federal, a medição ocupa um lugar de destaque no sistema elétrico de grandes e pequenos consumidores.

Portanto, é de grande importância para ambas as partes, consumidor e concessionária, que esse sistema funcione da forma mais adequada possível.

Existem basicamente dois tipos de erros que um medidor pode apresentar: o erro intrínseco e o erro metodológico. O erro intrínseco ao instrumento é aquele inerente à sua fabricação e partes constituintes, como por exemplo, o mau ajuste dos conjugados frenantes, o fator de qualidade da bobina móvel e do disco de um medidor eletromecânico. Já o erro metodológico diz respeito às definições de potências aparente, ativa e reativa inseridas na programação de um medidor digital. O objetivo deste trabalho é analisar o erro metodológico dos medidores quando submetidos a condições de distorções dos sinais, através de uma análise aplicada.

A seguir, será feita uma abordagem teórica sobre os medidores eletromecânicos e eletrônicos que são objetos desta pesquisa.

5.2.1 Medidores eletromecânicos

O medidor de energia elétrica eletromecânico ou “tipo indução” vem sendo utilizado mundialmente e em nosso país ao longo de muitas décadas por sua natureza simples, robusta e por sua boa *performance*. No final deste trabalho, porém, será mostrado que este último atributo é comprometido em determinadas situações a que esta categoria de medidores é exposta durante a medição. Esse equipamento é chamado “tipo indução”, porque é empregado na medição de energia em corrente alternada, baseando-se no princípio da indução eletromagnética.

O medidor eletromecânico é composto, basicamente, das seguintes partes:

- Bobina de tensão ou de potencial Bp;
- Bobina de corrente Bc;
- Núcleo de lâminas de material ferromagnético;
- Conjunto móvel ou rotor;
- Ímã permanente.

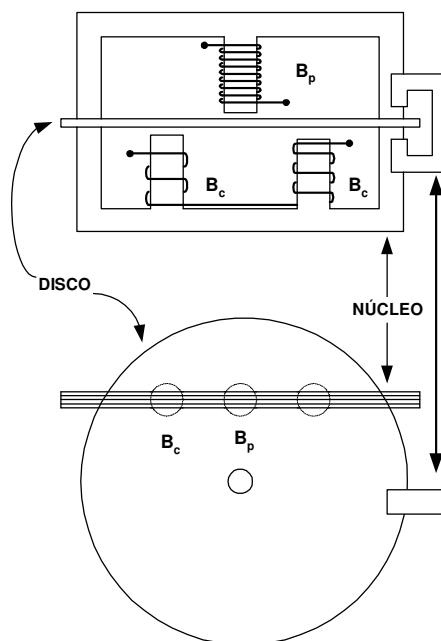


Figura 5.1 - Disco e núcleo do medidor eletromecânico

Fonte: Medeiros Filho (1997)

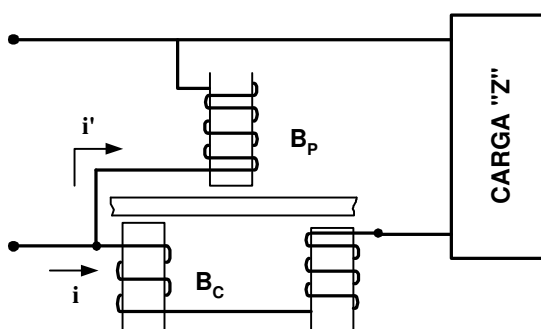


Figura 5.2 - Bobina de potencial e bobina de corrente

Fonte: Medeiros Filho (1997)

- **Bobina de tensão ou de potencial B_p**

É altamente indutiva, com grande número de espiras de fio fino de cobre e deve ser ligada em paralelo com a carga.

- **Bobina de corrente B_c**

Possui poucas espiras de fio grosso de cobre, deve ser ligada em série com a carga; é dividida em duas meias bobinas enroladas em sentidos contrários, como mostra a Figura 5.2.

- **Núcleo de lâminas de material ferromagnético**

É constituído de lâminas justapostas, porém isoladas umas das outras para reduzir as perdas por correntes de Foucault.

- **Conjunto móvel ou rotor**

É constituído de disco de alumínio, de alta condutibilidade, com grau de liberdade de girar em torno do seu eixo de suspensão M, ao qual é solidário. A este eixo M está preso um parafuso sem fim que aciona um sistema mecânico de engrenagens que registra, num mostrador, a energia elétrica consumida.

5.2.1.1 Princípio de funcionamento

O medidor eletromecânico ou “tipo indução” tem seu funcionamento baseado na Lei de Laplace. Essa lei enuncia que um condutor percorrido por uma corrente I, na presença de um campo magnético B, fica submetido a uma força F cujo sentido é dado pela regra da mão direita e cujo módulo é expresso pela equação:

$$F = B.I.L.\text{sen } \alpha \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde:

L é o comprimento do condutor sob a ação do campo magnético B.

α é o ângulo entre o campo magnético B e a direção de I.L no espaço.

Essa lei enunciada por Laplace (Edminister, 1980) é também conhecida como fenômeno da interação eletromagnética. O medidor eletromecânico tem o conjugado motor originado no disco através de tal fenômeno do seguinte modo:

1) O fluxo alternado ϕ_v da bobina de potencial ao atravessar o disco de alumínio, nele induz correntes de Foucault i_v (Figura 5.3). A interação entre estas correntes i_v e o fluxo ϕ_I da bobina de corrente dá origem a uma força e, conseqüentemente, a um conjugado em relação ao ponto central M (eixo), fazendo girar o disco.

2) Simultaneamente, o fluxo alternado ϕ_I da bobina de corrente induz correntes de Foucault i_I no disco, conforme pode ser visto na Figura 5.3. A interação entre estas correntes i_I e o fluxo ϕ_v origina uma outra força e, conseqüentemente, a outro conjugado em relação a M, de mesmo sentido do primeiro, fazendo girar o disco.

Portanto, a medição de energia elétrica será ponderada proporcionalmente aos fluxos originados pelas bobinas de potencial e corrente, de acordo com a energia solicitada pela carga na medição.

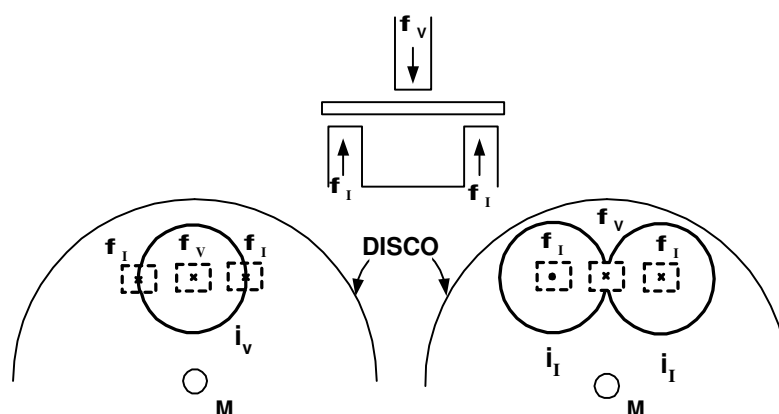


Figura 5.3 - Fluxos das bobinas de potencial e corrente

Fonte: Medeiros Filho (1997)

Com relação ao desempenho deste tipo de medidores em sistemas com sinais distorcidos, conforme exposto no início deste capítulo, sabe-se que os mesmos não apresentam valores confiáveis. É válido ressaltar outro estudo feito aqui no Brasil.

Em seu trabalho com medidores de energia ativa indutivos, submetidos a ambientes não senoidais, Bortoni (1995) apresentou os resultados de ensaios feitos no Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO e sugeriu medidas para mitigação dos efeitos das componentes harmônicas sobre os erros na medição. Após serem ensaiados os medidores de três fabricantes distintos, ele propôs alguns métodos de

compensação de erros devido aos harmônicos, propondo sugestões tanto à concessionária como aos fabricantes. Basicamente, dividiu os métodos em dois grupos: métodos externos ao medidor e métodos intrínsecos ao medidor. No primeiro grupo podem ser citados: melhoria do fator de potência fundamental, redução das distorções harmônicas e redução do fator de potência harmônico. Com relação ao medidor propriamente dito, recomendou ajuste dos conjugados frenantes, melhoria do fator de qualidade da bobina de potencial e ajuste do fator de qualidade do disco.

5.2.2 Medidores eletrônicos

A norma brasileira define como medidor eletrônico de energia elétrica, um medidor estático no qual a corrente e a tensão agem sobre elementos de estado sólido (componentes eletrônicos) para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida (ABNT, 2000b).

Os medidores eletrônicos vêm sendo instalados no mercado nacional de uma forma crescente e significativa. Seus recursos tecnológicos disponíveis consolidaram a sua aplicação, oferecendo muitas vantagens em relação aos antigos medidores eletromecânicos.

Esses medidores utilizam a mais avançada tecnologia de aquisição digital de sinais e de processamento numérico em tempo real, além de serem, na maioria dos casos, multigrandeza e multitarifa. Isto significa que eles são concebidos para faturamento de energia e demanda em diferentes postos horários e períodos do ano, podendo ser aplicados a quaisquer tarifas praticadas no mercado de energia elétrica.

Dentre os vários recursos e características que os medidores eletrônicos presentes no mercado nacional oferecem, alguns deles podem ser citados para efeito de demonstração:

- grandezas medidas: tensão e corrente nas 3 fases, energia ativa, energia reativa, fator de potência, distorção harmônica total;
- realização de medição e indicação em quatro quadrantes e registros unidirecional e bidirecional;
- registradores multitarifa totalmente compatíveis com a legislação da ANEEL e as normas da ABNT;

- registradores programáveis;
- interfaces de comunicação interna RS232 ou RS485;
- compactação dos módulos eletrônicos com componentes SMD;
- mostradores digitais de cristal líquido;
- memória de massa;
- medição programável de reativos com harmônicos.

Os medidores eletrônicos que são utilizados para as medições setoriais dentro de uma mesma planta, ou até mesmo em outra cidade ou estado, oferecem ainda a possibilidade de serem interligados via rede local ou Internet para que se possa gerenciar, de forma centralizada, o consumo de energia elétrica de uma ou mais instalações. Programas avançados permitem, a partir da coleta das informações recebidas dos medidores, a realização de uma análise completa de diversos parâmetros de uma instalação, tais como corrente elétrica em cada fase, tensão elétrica em cada fase, fator de potência em cada fase e também distorção harmônica. Ainda é possível obter curvas de demandas diárias, semanais e mensais, bem como simular contas de energia e realizar análises tarifárias.

5.2.2.1 Características técnicas gerais

Todo medidor, seja eletromecânico ou eletrônico, possui o chamado índice de classe. Índice de classe, segundo a norma NBR 14519:2000, é o número que define os limites admissíveis de erro percentual para todos os valores de corrente entre $0,1 I_n$ e $I_{máx}$, para o fator de potência ativo ou reativo, unitário (e no caso de medidores polifásicos com as cargas equilibradas), quando o medidor é ensaiado sob condições de referência conforme definido na própria Norma. Basicamente, os medidores eletromecânicos e eletrônicos do mercado nacional, são fabricados com os seguintes índices de classe: 0,2%; 0,5%; 1,0% e 2,0%.

Devido à enorme variação de medidores eletrônicos disponíveis no mercado nacional e internacional, para fins de uma abordagem teórica e explicativa, neste trabalho adotou-se o modelo de um determinado fabricante para a exposição de algum parâmetro técnico quando necessário, com o objetivo de facilitar a descrição e melhor ilustrá-la.

Os medidores eletrônicos de energia elétrica normalmente são projetados e construídos para que se obtenha uma estrutura robusta de seus conjuntos finais. Possuem uma base rígida e gabinetes injetados em plástico para alto impacto. Eles são providos de lacres no bloco de conexão e fixação, tampa externa, tampa do conector de comunicação e suporte das placas eletrônicas em plástico injetado. Apresentam uma faixa de temperatura de trabalho entre -10°C e 70°C.

A Norma brasileira que trata da especificação dos medidores eletrônicos (estáticos) é a NBR 14519, na sua última versão de maio de 2000. Essa categoria de medidores apresenta alguns elementos funcionais já existentes na forma em que são fabricados os medidores eletromecânicos.

Como elementos funcionais, a NBR 14519:2000, destaca:

- circuitos auxiliares: circuitos destinados à conexão de dispositivos externos;
- circuito de corrente: circuitos do medidor por onde circula a corrente a ser medida;
- circuito de tensão: circuitos do medidor onde é aplicada a tensão a ser medida, podendo incluir o circuito da fonte de alimentação do medidor;
- constante K_h : correspondente à relação entre a energia elétrica medida pelo medidor e a quantidade de pulsos elétricos ou sinais luminosos de saída para ensaio.

Essa constante deve ser expressa em Watt-hora por pulso ou em volt-ampère-hora por pulso. Ela é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$K_h = \frac{I_n \cdot V_n \cdot N}{\text{Pulsos} / \text{hora}} \quad (\text{Equação 5.2})$$

onde:

I_n é a corrente nominal, em ampère;

V_n é a tensão nominal, em volt;

N é o número de elementos;

Pulsos é o número de pulsos emitidos no período de tempo considerado pelo fabricante.

- constante K_e : Quantidade de energia que define a melhor resolução do medidor e define a unidade básica armazenada. Este valor deve ser expresso em Watt-hora por pulso ou em volt-ampère-hora por pulso. A constante é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$K_e = \frac{K_h}{P/R} \quad (\text{Equação 5.3})$$

onde:

K_h é a constante que expressa a relação entre a energia elétrica medida e o número de pulsos elétricos de saída;

P é a potência ativa;

R é a potência reativa.

- dispositivo para calibração: Dispositivo por meio do qual se calibra o medidor para que indique, dentro dos erros admissíveis, a energia a ser medida.

- elemento de medição: Parte do medidor constituída de uma unidade sensora de tensão e de uma unidade sensora de corrente, que produz uma saída com informação proporcional à grandeza registrada.

- indicador de operação: Dispositivo que fornece um sinal visível da operação do medidor;

- memória: Dispositivo que armazena informações;

- memória não-volátil: Memória que retém as informações armazenadas mesmo na falta de energia elétrica;

- memória de massa: Dispositivo eletrônico que faz parte integrante do medidor, onde são armazenados pulsos para posterior visualização e/ou recuperação;

- mostrador: Dispositivo que mostra informações relativas à medição e/ou às condições de operação do medidor;

- porta óptica: Dispositivo de entrada e saída constituído de uma interface de comunicação óptica, dotado de um elemento foto-receptor e de um elemento foto-emissor, que tem a função de trocar informações entre o medidor e outro equipamento, mantendo-os

desacoplados eletricamente e viabilizando funções como calibração, ajuste, programação e leitura do medidor;

- relação P/R: Relação entre as constantes K_h e K_e do medidor, equivalente ao número de pulsos por rotação (período) dos medidores eletromecânicos dotados de sensor óptico.

$$P/R = \frac{K_h}{K_e} \quad (\text{Equação 5.4})$$

5.2.2.2 Características construtivas

De um modo geral, os medidores estáticos que são disponibilizados no mercado apresentam basicamente as seguintes partes construtivas: bloco de terminais, base, tampa do bloco de terminais, tampa do medidor, terminal de terra e placa de identificação.

O modelo em questão possui peso de 0,5 kg e o *layout* mostrado a seguir:

Gabinete de embutir

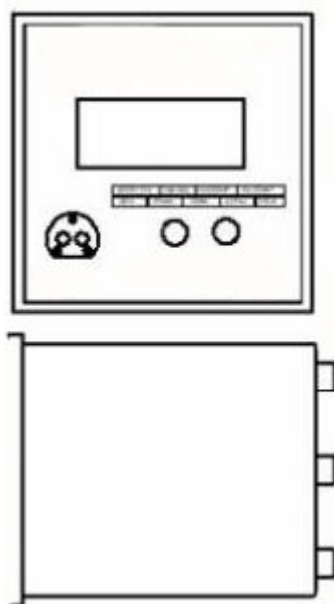


Figura 5.4 - Painel frontal de um medidor eletrônico

Fonte: ESB (2002)

Painel traseiro

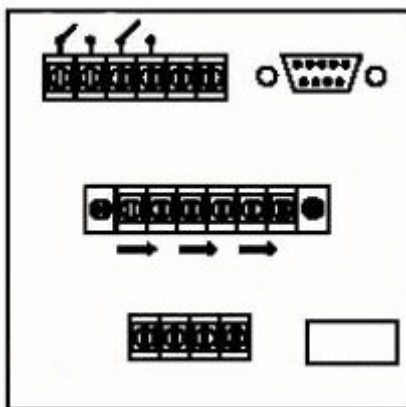


Figura 5.5 - Painel traseiro de um medidor eletrônico

Fonte: ESB (2002)

Bloco de terminais

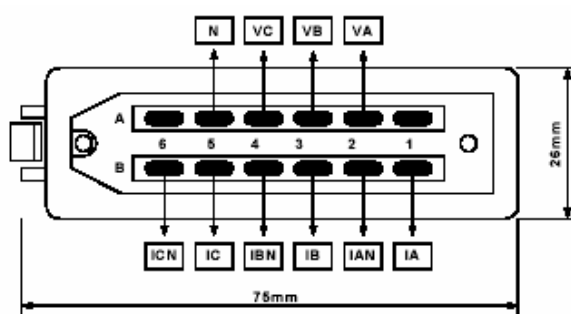


Figura 5.6 - Bloco de terminais

Fonte: ESB (2002)

5.2.2.3 Características elétricas

Os medidores eletrônicos são projetados de acordo com suas características nominais, as quais também são utilizadas na realização de ensaios: corrente nominal, tensão nominal, frequência nominal e corrente máxima.

Os referidos equipamentos acima são classificados, segundo a ABNT, em monofásicos e polifásicos, conforme o tipo de ligação:

- Monofásicos a dois fios;
- Monofásicos a três fios;
- Polifásicos, de dois elementos de medição, três fios, ligação estrela ou triângulo;
- Polifásicos, de três elementos de medição, quatro fios, ligação estrela ou triângulo.

5.2.2.4 Instalação dos medidores

Os fabricantes fornecem os medidores para medição direta ou indireta, sendo, neste último caso, necessário o uso de transformadores de corrente (TC's) e transformadores de tensão (TP's).

A seguir serão mostrados os esquemas de ligação tanto para medição direta como para indireta.

5.2.2.4.1 Medição indireta

É aquela em que apenas parcela da energia consumida passa através do medidor (Engel, 1999). Neste caso, a energia consumida é obtida multiplicando-se a energia registrada nos medidores por uma constante de medição que dependerá dos equipamentos auxiliares utilizados. Este tipo de medição é utilizado principalmente nos consumidores do Grupo A.

Conexão: 3 elementos com TC e TP

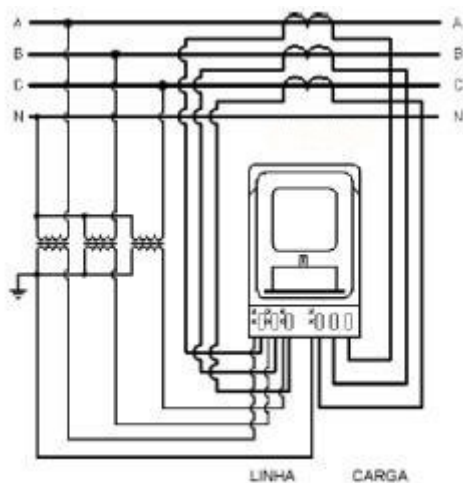


Figura 5.7 - Ligação 3 elementos com TC e TP

Fonte: ESB (2002)

Conexão: 2 elementos com TC e TP

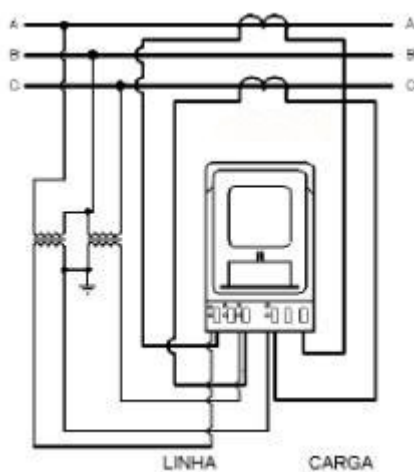


Figura 5.8 - Ligação 2 elementos com TC e TP

Fonte: ESB (2002)

5.2.2.4.2 Medição direta

É aquela em que a energia consumida passa integralmente através dos medidores do sistema de medição (Engel, 1999). Esse tipo de medição é utilizado principalmente nos consumidores do Grupo B.

Conexão: 3 elementos

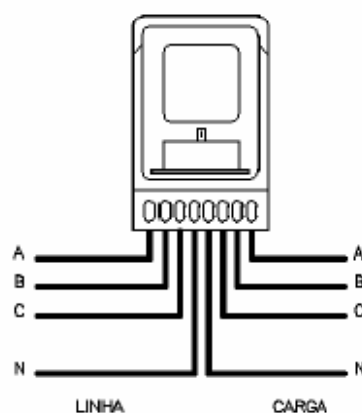


Figura 5.9 - Ligação 3 elementos

Fonte: ESB (2002)

Conexão: 2 elementos

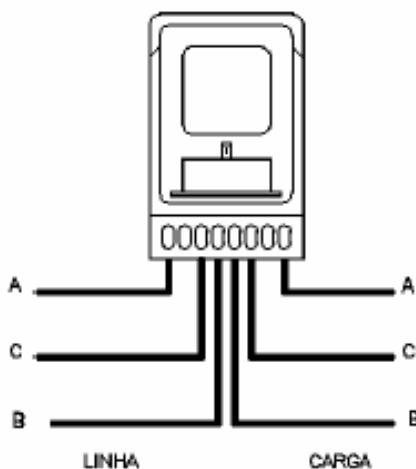


Figura 5.10 - Ligação 2 elementos

Fonte: ESB (2002)

Fonte auxiliar

Os medidores do modelo escolhido utilizam bateria de Lithium de 3,6 V e 750 mAh para manutenção dos dados armazenados e para o relógio calendário interno. A vida útil desta bateria é de 10 anos. Para permitir a substituição da bateria com o equipamento em operação no campo, existe um supercap que mantém os dados por um período de, no mínimo, 200 horas.

O consumo de energia para a sua própria alimentação é tipicamente de 3 W, apresentando um fator de potência melhor que 0,95.

5.2.3 Comparação entre medidores eletromecânicos e eletrônicos

Após a apresentação de cada tipo de medidor com relação às suas tecnologias empregadas, torna-se interessante mostrar, na Tabela 5.1, em termos comparativos, as características de cada um (Engel, 1999).

Tabela 5.1 - Comparação entre medidores eletrônicos e eletromecânicos

Medidores eletrônicos	Medidores eletromecânicos
Várias grandezas no mesmo instrumento	Um instrumento para cada grandeza
Leituras instantâneas diretas permitem o registro histórico de todas as grandezas elétricas	Valores precisam ser processados, e não podem ser usados em manutenção preventiva.
Demanda e Fator de Potência instantâneos	Demanda e fator de potência ^A projetados ^B
Leituras de tensão e corrente por fase	Não informa valores de tensões e correntes
Leituras de potências ^C por fase	Não informa valores de potência
Leituras de Distorções Harmônicas ^D	Não informa valores de distorções harmônicas
Leituras de consumos acumulados (ativo e reativo)	Valores de consumos devem ser acumulados pelo sistema de gerenciamento ^E
Consistência dos dados é total (inclusive dos acumuladores)	Consistência pode ser quebrada por falta de energia nos diversos componentes do sistema
Leituras detalhadas auxiliam a conferência da ligação do próprio medidor	Requer muita experiência para garantir a correta ligação dos medidores
Instalação simplificada (rede serial RS-485 com um par de fios apenas)	Cabos de cada ponto de medição devem ser levados até a CPU central
Menor número de componentes (apenas os medidores e o gerenciador)	Vários componentes adicionais (emissores de pulsos, placas de entradas, etc)
Maior confiabilidade e precisão (até 0,2%)	Partes móveis diminuem a precisão (entre 1% e 2%)
Calibração única (na fábrica)	Necessidade de calibrações periódicas

^A Disponível apenas se forem instalados medidores de energia reativa.

^B Não são divulgadas informações sobre os algoritmos de projeção destas grandezas no caso das medições setoriais.

^C Potências ativa, reativa e aparente (total).

^D Apenas alguns modelos de medidores.

^E Valores podem ser inconsistentes em caso de falta de energia.

5.3 Ensaios dos medidores

Foram realizados ensaios nos laboratórios da Universidade Federal de Itajubá para a avaliação da confiabilidade de sistemas de medição de energia elétrica, com relação às energias ativas e reativas. Através dos dados coletados, será realizada mais adiante, juntamente com os valores das medições de energia reativa, uma análise aplicada de faturamento de energia. Os ensaios dos medidores visaram à determinação de seus erros na medição de energia ativa e reativa em condições harmônicas, embora a Norma Brasileira

estabeleça condições de ensaio (plena carga, pequena carga e carga indutiva) em condições senoidais. Para tanto, foram aplicadas várias formas de ondas de sinais de corrente e tensão distorcidas, variando-se os coeficientes de distorção harmônica, com o objetivo de se reproduzir sinais encontrados nos sistemas elétricos.

Na sequência são mostrados os resultados dos ensaios com os medidores de energia elétrica.

5.3.1 Medidores eletromecânicos

Esses ensaios tiveram por finalidade analisar o desempenho dos medidores eletromecânicos de energia ativa e reativa de um mesmo fabricante, quando submetidos a diversas condições de formas de ondas de tensão e corrente, bem como de diferentes ângulos de deslocamento entre esses sinais.

Ao todo foram realizados cinco ensaios, nos laboratórios da UNIFEI, de forma a abordar tanto a condição senoidal quanto a forma distorcida, pautada em ondas de corrente e tensão também obtidas em pesquisa de campo.

Os medidores ensaiados foram:

Medidor de energia ativa (kWh)

Fabricante: A

Modelo: 1

120V / 2,5A / 2 fases / 2 elementos / 3 fios / $k_d = 1,2 \text{ W.h/rot}$

Classe 2

Medidor de energia reativa (kvarh)

Fabricante: A

Modelo: 1

120V / 2,5A / 3 fases / 2 elementos / 3 fios / $k_d = 1,2 \text{ W.h/rot}$

Classe 2

5.3.1.1 Metodologia dos testes

Para se realizarem os cinco ensaios, foi montado um sistema de experimentação, no laboratório de medidas elétricas da Universidade Federal de Itajubá, consistindo de duas fontes trifásicas de potência de sinais arbitrários, sincronizadas entre si. A primeira, sendo responsável pelo grupo trifásico de tensões e a segunda, pelo grupo trifásico de correntes. Entre elas, foi colocado um dispositivo de sincronismo e outro de defasamento angular, desacoplados galvanicamente, permitindo, desta forma, o sincronismo entre as duas fontes com controle de defasamento angular entre elas, segundo o esquema abaixo:

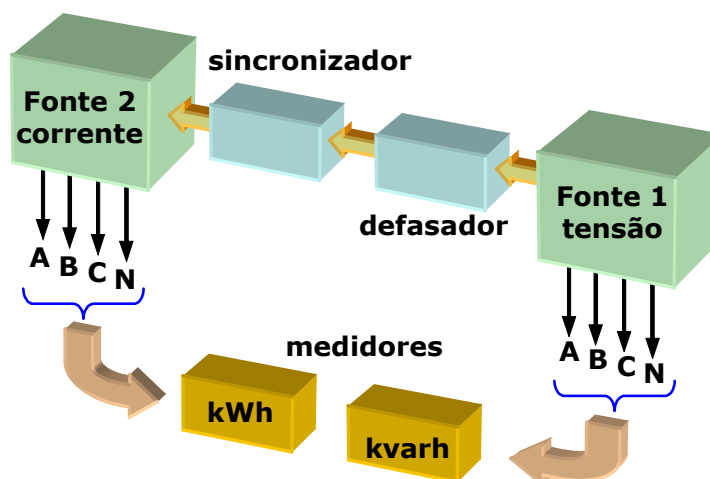


Figura 5.11 - Esquema dos ensaios dos medidores trifásicos eletromecânicos

Ensaios realizados

Os cinco ensaios realizados nos medidores foram:

Primeiro ensaio:

Tensão senoidal trifásica: 120,0 V (ϕ - ϕ)

Corrente senoidal trifásica: 2,503 A

Defasamento angular: 0°

Segundo ensaio:

Tensão senoidal trifásica: 120,0 V (ϕ - ϕ)

Corrente senoidal trifásica: 2,502 A

Defasamento angular: 60° indutivo

Terceiro ensaio:

Tensão senoidal trifásica: 120,0 V (ϕ - ϕ)

Corrente distorcida trifásica: 2,503 A

Defasamento angular: 30° indutivo

Para este ensaio, foi tomada uma corrente típica de um alimentador primário com um DHTi intermediário aos valores encontrados na campanha de medição citado mais adiante em 5.3.2.4. A forma de onda da corrente utilizada no teste, sua composição espectral e seu DHTi são mostrados a seguir:

Tabela 5.2 - Composição espectral da corrente (terceiro ensaio)

Harmônico	Amplitude A	Amplitude %	Ângulo de Fase
I1	2,438	100	330°
I3	0,488	20	75°
I5	0,244	10	350°
I7	0,098	4	266°
I15	0,061	2,5	100°

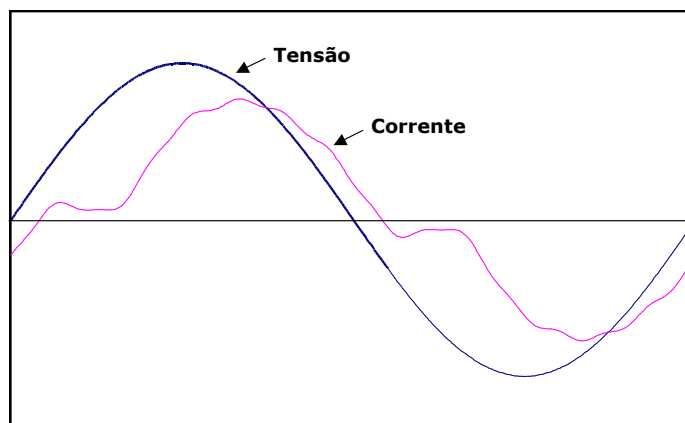


Figura 5.12 - Formas de ondas da tensão e corrente (terceiro ensaio)

$$DHT_i = \frac{I_h}{I_1} = \frac{\sqrt{0,2^2 + 0,1^2 + 0,04^2 + 0,025^2}}{\sqrt{1}} \times 100\% = 22,8\%$$

Quarto ensaio:

Tensão senoidal trifásica: 120,0 V (ϕ - ϕ)

Corrente distorcida trifásica: 2,503 A

Defasamento angular: 60° indutivo

Esse quarto ensaio consistiu na aplicação dos mesmos sinais do terceiro teste, porém com um defasamento de 60° (indutivo) entre eles.

Quinto ensaio:

Tensão senoidal trifásica: 120,0 V (ϕ - ϕ)

Corrente distorcida trifásica: 2,501 A

Defasamento angular: 60° indutivo

Para este ensaio foi adotada uma corrente típica utilizada nos ensaios dos medidores eletrônicos. A forma de onda da corrente utilizada, a sua composição espectral e o seu DHTi são mostrados a seguir:

Tabela 5.3 - Composição espectral da corrente (quinto ensaio)

Harmônico	Amplitude A	Amplitude %	Ângulo de Fase
I1	2,350	100	0°
I3	0,705	30	0°
I5	0,470	20	0°

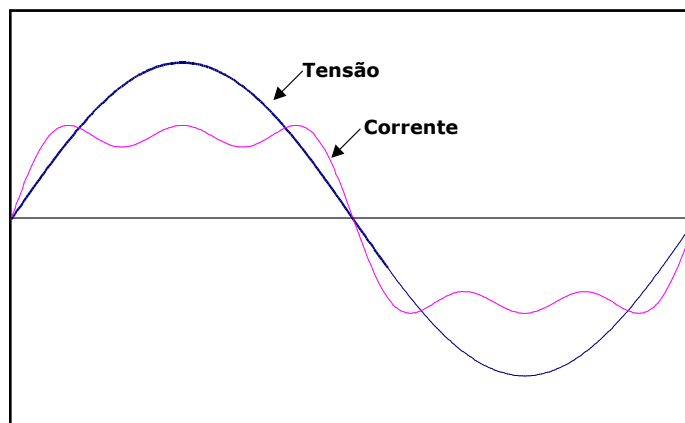


Figura 5.13 - Formas de ondas da tensão e corrente (quinto ensaio)

$$DHT_i = \frac{I_h}{I_1} = \frac{\sqrt{0,3^2 + 0,2^2}}{\sqrt{1}} \times 100\% = 36,0\%$$

5.3.1.2 Resultados

A tabela a seguir mostra de forma condensada os erros obtidos nos cinco ensaios realizados nos medidores de energia ativa e reativa.

Tabela 5.4 - Erros dos medidores trifásicos eletromecânicos

Ensaio	erro (kWh)	erro (kvarh) sem harmônico	erro (kvarh) com harmônico
1	2,0%	NA	NA
2	-1,5%	0,9%	NA
3	0,5%	6,6%	-3,3%
4	-3,5%	-1,8%	-1,6%
5	-2,5%	- 1,2%	-6,6%

5.3.1.3 Comentários

- No primeiro teste, devido à condição senoidal pura, sem defasamento entre os sinais de tensão e corrente, a medição da energia reativa não foi levantada, portanto, os erros nesta situação não foram avaliados (NA = não avaliado).
- Da mesma forma, no segundo teste, não houve avaliação do mesmo erro de energia reativa com harmônico por se tratar também de condição puramente senoidal.
- Do terceiro ao quinto teste, além dos erros para a medição da energia ativa, obtiveram-se os erros da medição da energia reativa considerando ou não os harmônicos na energia não ativa total. Para isso, a expressão utilizada na calibração foi:

$$\xi\% = \frac{3600 \cdot N \cdot Kd - \text{var} \cdot t}{\text{var} \cdot t} \times 100\% \quad (\text{Equação 5.5})$$

onde:

$\xi\%$ - erro percentual;

N - número de voltas registradas no medidor para um certo tempo;

Kd - constante do disco;

var - potência não ativa padrão que pode ser total (com harmônicos) ou fundamental (reativa de deslocamento - sem harmônicos);

t - tempo cronometrado, em segundos.

Vale ressaltar que:

$$S_{TOTAL} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{Equação 5.6})$$

Q = potência reativa de deslocamento (sem harmônicos)

$Q_{TOTAL} = \sqrt{Q^2 + D^2}$ = potência reativa total (com harmônicos)

- Constata-se que, pelos resultados obtidos, sobretudo para a energia reativa, os erros são inadequados aos medidores em questão. De certa forma, são resultados esperados, pois os medidores eletromecânicos não são concebidos para lidar com situações de distorção dos sinais. Pode-se dizer ainda que esses erros são intrinsecamente instrumentais, ao passo que os erros dos instrumentos eletrônicos são intrinsecamente metodológicos.

De forma fundamental, pode-se distinguir duas situações no faturamento da energia reativa: a contabilização, ou não, dos harmônicos no cálculo da energia não ativa.

Atualmente, a legislação brasileira sobre o assunto, a resolução nº 456/2000 da ANEEL (ANEEL, 2000b) não contempla expressamente o efeito da distorção dos sinais no cálculo da energia não ativa, imputando esse ônus à concessionária.

Uma vez que os medidores eletromecânicos não estão preparados para lidar com o fenômeno, conforme mostrado pelos erros negativos quando da contabilização dos harmônicos, isso pode trazer perdas de receita à concessionária.

Por outro lado, sugere-se que os medidores eletrônicos comecem a ser preparados para que, em um futuro próximo, possam estar aptos a incorporar o fenômeno harmônico. Alguns medidores no mercado nacional já atendem esta disposição, inclusive oferecendo ao usuário a possibilidade de contabilização não ativa com ou sem harmônicos.

5.3.2 Medidores eletrônicos

Esses ensaios tiveram por finalidade analisar o desempenho de vários medidores eletrônicos de energia ativa e reativa, quando submetidos a diversas condições de formas de ondas de tensão e corrente, bem como de diferentes ângulos de deslocamento entre esses sinais.

Uma vez que o desempenho do medidor eletrônico pode ser analisado a partir de um único elemento (os medidores testados possuem três elementos cada), os ensaios executados foram monofásicos, exigindo-se a utilização de dois canais da fonte universal. Através de um dos canais, aplicou-se um sinal de tensão, e através de outro, um sinal de corrente. Esses sinais foram configurados para os 12 ensaios executados nos medidores, como mostrado a seguir.

5.3.2.1 Formas de onda

Para os onze primeiros ensaios, as formas de onda (chamadas de FO) da tensão e da corrente utilizadas foram as FO 1 a FO 6. Para o 12º ensaio, em particular, adotaram-se formas de onda de corrente e tensão obtidas em campo, FO 7 e FO 8, respectivamente, que foram reproduzidas na fonte. As ondas programadas na fonte e aplicadas aos medidores foram as seguintes:

Corrente:

Valor de referência: 5,0 A

(FO) Forma de onda 1 - senoidal pura

(FO) Forma de onda 2 - senoidal + 30% de 3º harmônico (fase 0º)

(FO) Forma de onda 3 - senoidal + 30% de 3º harm. (fase -90º)

(FO) Forma de onda 4 - senoidal + 30% de 3º harm. (fase -180º)

(FO) Forma de onda 5 - senoidal + 30% de 3º harm. (fase -270º)

(FO) Forma de onda 6 - senoidal + 30% de 5º harm. (fase 0º)

(FO) Forma de onda 7 - senoidal + 11% de 3º harm. (fase 270º) +
 + 8,0 % de 5º harm. (fase 268º) +
 + 1,0 % de 7º harm. (fase 269º) +
 + 1,5 % de 11º harm. (fase 270º) +
 + 1,0 % de 23º harm. (fase 270º)

Tensão:

Valor de referência: 120,0 V

(FO) Forma de onda 1 - senoidal pura

(FO) Forma de onda 2 - senoidal + 30% de 3º harmônico (fase 0º)

(FO) Forma de onda 8 - senoidal + 2% de 3º harm. (fase 0º) +
 + 2,5 % de 5º harm. (fase 180º) +
 + 1,0 % de 7º harm. (fase 0º) +
 + 0,8 % de 11º harm. (fase 180º)

As oito formas de onda estão reproduzidas na Figura 5.14 a seguir:

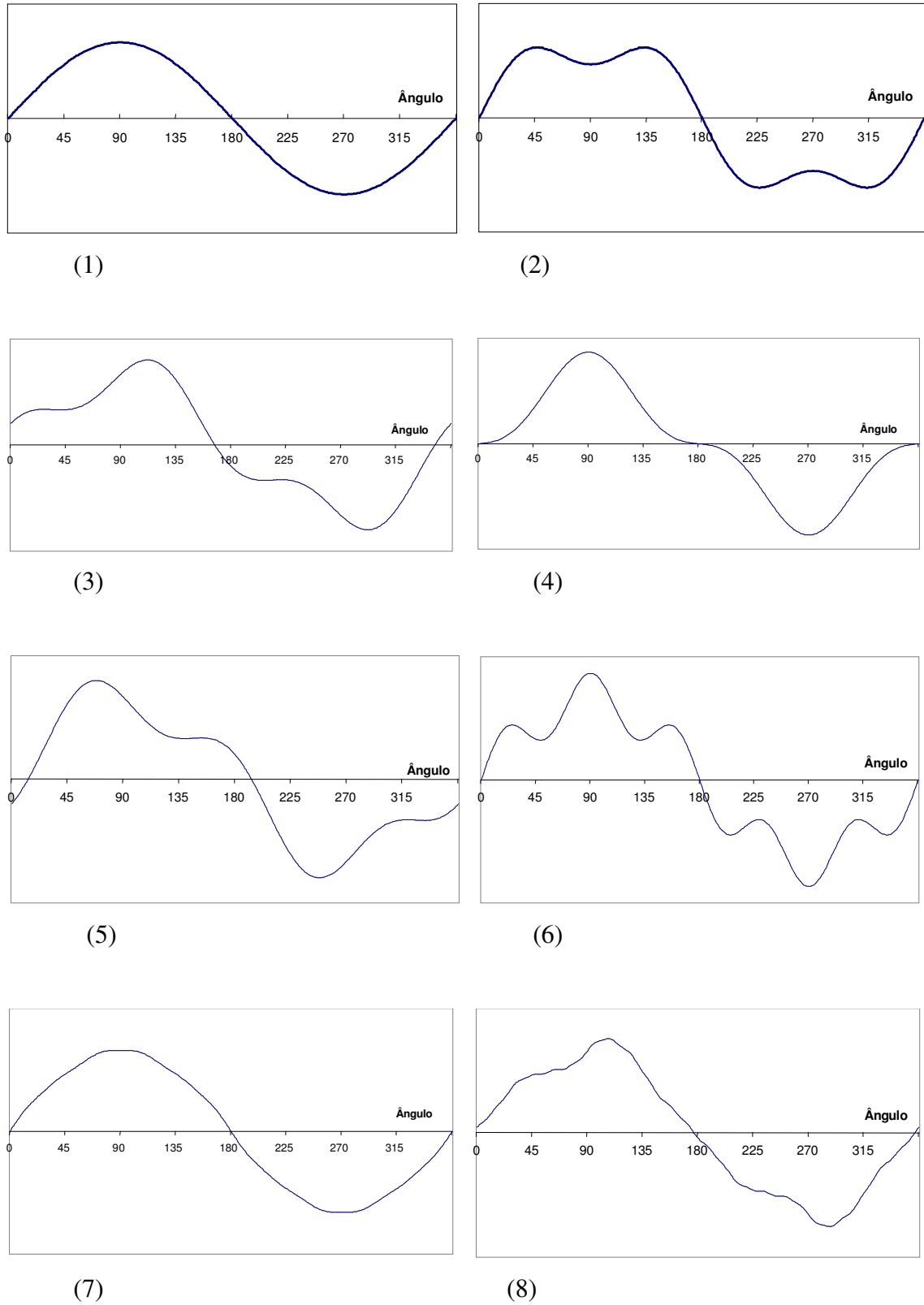


Figura 5.14 - Formas de ondas (FO)

Os três canais da fonte de potência de sinais arbitrários foram utilizados da seguinte forma:

Canal 1 – para aplicar tensão V_{AN} em 0° ;

Canal 2 – para aplicar corrente I_A (0° ou 60° indutivo, conforme ensaio);

Canal 3 – inutilizado.

5.3.2.2 Resultados

Ao todo, foram realizados 12 ensaios de desempenho em diversas condições de funcionamento. As formas de onda aplicadas, os ângulos de defasamento e os erros obtidos estão mostrados na Tabela 5.5 a seguir:

Tabela 5.5: Ensaios realizados e resultados obtidos nos med. eletrônicos

Ensaios													
Características	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
FO V_{AN} (120 V)	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	8
FO I_A (5 A)	1	1	2	2	2	3	4	5	2	6	6	7	
ângulo $V_{AN} - I_A$ ind.	0°	60°	0°	60°	0°	0°	0°	0°	60°	0°	60°	60°	

medidor	classe	Erros kW.h / kvar.h **											
X1	0,2	0,06 NA*	0,31 -0,05	0,86 -95,4	0,67 -5,27	0,26 NA*	0,06 -82,6	0,64 -97,0	0,74 -75,9	0,75 0,00	0,50 0,00	0,06 -10,2	0,40 -3,88
W1	0,3	-0,13 NA*	-0,41 -0,15	0,18 0,31	0,26 -0,40	-0,22 NA*	-0,11 -0,42	-0,08 -0,14	-0,04 -0,24	0,35 0,00	0,20 0,00	-0,09 -0,43	-0,45 -0,34
T1	0,3	-0,13 NA*	0,14 -0,15	0,18 -96,2	1,09 -5,41	-0,43 NA*	-1,63 -84,3	0,46 -95,1	1,60 -77,5	2,18 0,00	-0,26 0,00	0,84 -9,97	0,31 -4,83
T2	0,3	0,13 NA*	0,14 0,15	0,18 -94,6	0,67 -5,19	-0,22 NA*	-1,63 -85,1	0,73 -94,7	1,60 -76,4	2,18 0,00	-0,03 0,00	0,84 -9,97	0,06 -4,83
W2	0,3	0,13 NA*	0,14 0,15	0,18 0,31	0,67 -0,18	-0,01 NA*	0,06 -0,04	0,46 -0,14	0,19 -0,24	0,35 0,00	0,20 0,00	0,37 -0,19	0,31 -0,34
X2	0,2	0,06 NA*	0,67 -0,05	0,41 -95,4	0,40 -5,56	0,12 NA*	0,06 -82,4	0,46 -97,0	0,43 -75,9	0,35 0,00	0,20 0,00	0,37 -10,2	0,23 -4,42
X3	0,2	-0,12 NA*	1,77 -0,05	0,41 -99,5	0,95 -5,56	0,26 NA*	0,51 -99,7	0,64 -100	-0,04 -76,6	0,75 0,00	0,35 0,00	0,99 -10,4	0,40 -2,79

*NA - não avaliado

**Para os cálculos dos erros mostrados na Tabela 5.5, considerou-se, como padrão, a energia não ativa total, com o efeito harmônico. Os erros de grande valor para a medição de energia reativa em alguns medidores são decorrentes, sobretudo, do protocolo utilizado. Isso não quer dizer, necessariamente, que esses medidores apresentam elevados erros, mas que em seu protocolo para a medição de reativos não é contabilizada a energia não ativa de distorção harmônica.

5.3.2.3 Comentários

A seguir, são mostrados os principais comentários decorrentes dos vários ensaios executados nos medidores eletrônicos:

Ensaio 1: Para as condições puramente senoidais e sem defasamento angular entre os sinais, os resultados dos ativos apresentam-se adequados em relação à exatidão do medidor. Os valores de erro para a energia reativa não foram avaliados porque, tanto nos medidores quanto no padrão, os resultados absolutos fornecidos pelo teste foram muito pequenos, o que era de se esperar, não podendo, dessa forma, ser comparados.

Ensaio 2: Nesta situação, para a qual os sinais são puramente senoidais porém com um defasamento de 60° indutivo, da mesma forma que no ensaio anterior, os resultados se mostraram adequados. Ressalta-se a conformidade das medições da energia reativa de deslocamento com a classe do instrumento sob aferição.

Uma vez que os valores de energia reativa são significativos, pode-se fazer a comparação entre os valores medidos e o padrão.

Ensaio 3: A partir do terceiro ensaio, pode-se verificar a discrepância de protocolos no aspecto da presença de harmônicos. Neste caso, existe somente potência reativa de distorção, uma vez que a potência reativa de deslocamento é praticamente nula. Para avaliar esta condição, adotaram-se os seguintes dados:

- Tensão senoidal: $V_1 = 120,0\text{V}$
- Corrente total (deformada): $I = 5,0\text{ A}$
- Fundamental da corrente: $I_1 = 4,79\text{ A}$ (100%), fase: 0°
- 3° harmônico da corrente: $I_3 = 1,44\text{ A}$ (30%) fase: 0°
- Potência ativa: $P_1 = 574,7\text{ W}$
- Potência aparente total: $S = 600,0\text{ VA}$
- Potência aparente fundamental: $S_1 = 574,7\text{ VA}$
- Potência reativa de deslocamento: $Q_1 = 0\text{ var}_{\text{deslocamento}}$
- Potência de distorção: $D = 172,8\text{ var}_{\text{distorção}}$
- Potência não ativa total: $Q_{\text{TOTAL}} = 172,8\text{ var}$

Notadamente, os medidores do fabricante W, W1 e W2 possuem o mesmo protocolo do padrão utilizado, ou seja, o que contabiliza a potência de distorção como sendo parte da potência não ativa total:

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{Q_1^2 + D^2} \quad (\text{Equação 5.7})$$

Por outro lado, os medidores restantes (X1, X2, X3, T1 e T2), pela inspeção dos resultados, há um forte indicativo de que não contabilizam a potência de distorção em seus protocolos, fazendo com que os medidores apresentem fortes “erros” negativos (pois estão medindo a menos que o padrão). Ressalta-se ainda que esses erros são da ordem de -95% e comum a esses cinco medidores. Particularmente, o medidor X3, por utilizar tecnologia mais antiga, apresenta uma discrepância com relação aos outros, indicando suas limitações em lidar com esse tipo de medição.

Vale notar que a expressão do erro dos medidores é dada por:

$$\xi\% = \frac{VM - VP}{VP} \times 100\% = \frac{Q_1 - Q_T}{Q_T} \times 100\% \quad (\text{Equação 5.8})$$

VM - valor medido

VP - valor padrão

Uma vez que Q_1 é nulo ou pequeno, o erro tenderá a -100%, como observado neste ensaio. Não se pode dizer, em absoluto, que os medidores que apresentaram esses erros elevados para a potência reativa total na presença de distorção estejam fora da classe de exatidão. Quer se dizer aqui que esses medidores não apresentam protocolos compatíveis aos usados pelo medidor padrão, que mede a potência reativa total.

Ensaio 4: Igualmente, este quarto ensaio repete o mesmo fenômeno que se passou no terceiro teste, valendo portanto as mesmas observações anteriores. De forma diferente ao ensaio anterior, provocou-se um deslocamento indutivo de 60° no sinal de corrente distorcida. Assim, houve uma redução da potência ativa e um aumento na potência reativa de deslocamento, mantendo-se a mesma potência de distorção. Para avaliar esta condição, adotaram-se os seguintes dados:

- Tensão senoidal: $V_1 = 120,0V$
- Corrente total (deformada): $I = 5,0 A$
- Fundamental da corrente: $I_1 = 4,79 A$ (100%), fase: -60°
- 3º harmônico da corrente: $I_3 = 1,44 A$ (30%) fase: -180° ($3 \times -60^\circ$)
- Potência ativa: $P_1 = 287,5 W$
- Potência aparente total: $S = 600,0 VA$
- Potência aparente fundamental: $S_1 = 574,7 VA$
- Potência reativa de deslocamento: $Q_1 = 497,7 \text{ var}_{\text{deslocamento}}$
- Potência de distorção: $D = 172,8 \text{ var}_{\text{distorção}}$
- Potência não ativa total: $Q_{\text{TOTAL}} = 526,8 \text{ var}$

Os medidores do fabricante W mostram-se mais uma vez que utilizam o mesmo protocolo do medidor padrão, ou seja, contabilizam a potência de distorção como parte da potência não ativa total.

Em relação ao teste anterior, a drástica redução do erro na medição da potência reativa (antes era da ordem de - 95%, agora é de - 5,5%) justifica-se pela contabilização da potência reativa de deslocamento, que não é mais nula.

Os dois medidores que contabilizam a distorção medem uma potência não ativa total de:

$$Q_{\text{TOTAL}} = \sqrt{Q_1^2 + D^2} = \sqrt{497,7^2 + 172,8^2} = 526,8 \text{ var}$$

Ao passo que, os cinco medidores que não contabilizam a distorção medem uma potência não ativa de:

$$Q_{\text{TOTAL}} = \sqrt{Q_1^2 + D^2} = \sqrt{497,7^2 + 0^2} = 497,7 \text{ var}$$

Considerando a medição com harmônicos a correta, o erro relativo será, então:

$$\xi\% = \frac{\text{valor medido} - \text{valor padrão}}{\text{valor padrão}} \times 100\% = \frac{497,7 - 526,8}{526,8} \times 100\% = -5,5\%$$

Justificando, então, os “erros” ocorridos neste 4º teste para os medidores em questão.

Ensaio 5: Neste ensaio, é bom ressaltar uma peculiaridade muito interessante. Quando os dois sinais elétricos, tensão e corrente, possuem a mesma forma de onda com deslocamento angular nulo entre elas, significa que a carga é puramente resistiva. Desta forma, não há, em absoluto, potência reativa de deslocamento e nem tampouco potência não ativa de distorção. Em outras palavras, o sistema de medição comporta-se da mesma forma como se tivesse duas ondas senoidais puras sem deslocamento entre elas.

Assim, este caso é idêntico ao primeiro teste. Além disso, os valores de erro para os reativos não foram avaliados porque, tanto nos medidores quanto no padrão, os resultados absolutos fornecidos pelo ensaio foram muito pequenos, o que era de se esperar, não podendo, dessa forma, ser comparados.

Ensaios 6 a 12: Estes testes podem ser vistos como se fossem uma repetição dos ensaios anteriores, nos quais os acentuados erros percentuais na medição da potência reativa indicam que esses medidores não contabilizam a potência não ativa de distorção. Os medidores que não apresentam tais erros indicam que se baseiam no mesmo princípio de protocolo do medidor padrão.

5.3.2.4 Erros prováveis globais

Inicialmente, para os medidores eletromecânicos, tomou-se o erro do terceiro ensaio como o de maior probabilidade de ocorrência, porque as formas de ondas utilizadas no ensaio são típicas de um alimentador. Assim, supõe-se que a medição de energia reativa esteja com um erro provável de - 3,3%, quando de uma de tensão senoidal e uma de corrente de com DHTi de 22,8%, com defasamento de 30° indutivo. A Tabela 5.6, mostra o resultado do teste 3.

Tabela 5.6: Ensaio realizados e resultados obtidos nos med. eletromecânicos

Ensaio	erro kWh	erro kvarh	erro kvarh
		sem harmônico	com harmônico
1	2,0%	NA	NA
2	- 1,5%	0,9%	NA
3	0,5%	6,6%	- 3,3%
4	- 3,5%	- 1,8%	- 1,6%
5	- 2,5%	- 1,2%	- 6,6%

- Erro provável considerado para os eletromecânicos = - 3,3%

Em seguida, tomou-se o resultado do desempenho dos medidores eletrônicos para avaliar o erro global médio do conjunto desses instrumentos. Sabe-se, no entanto, que no caso dos medidores eletrônicos, o erro é tão somente uma questão de protocolo.

Considerando uma distorção total de corrente provável DHTi = 22,8% como média, com um deslocamento de 30° entre a tensão e a corrente, os medidores que não contabilizam a potência de distorção irão medir - 9,1% a menos, conforme cálculo mostrado abaixo:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + (0,228 I_1)^2}$$

$$Q = V I_1 \sin 30$$

$$P = V I_1 \cos 30$$

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(V I)^2 - (V I_1 \cos 30)^2} = V I_1 \sqrt{1^2 + 0,228^2 - 0,866^2}$$

$$\frac{Q - Q_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}} \cdot 100\% = \frac{V I_1 \sin 30 - V I_1 \sqrt{1^2 + 0,228^2 - 0,866^2}}{V I_1 \sqrt{1^2 + 0,228^2 - 0,866^2}} \cdot 100\% = \frac{0,5 - 0,55}{0,55} \cdot 100\% = -9,1\%$$

Este valor de erro foi, portanto, considerado como médio para os medidores eletrônicos que não estão preparados para contabilizar o fenômeno harmônico.

Em relação aos medidores que contabilizam o fenômeno harmônico na energia reativa (particularmente os medidores W), foi considerada a média dos erros dos doze testes realizados, chegando-se a um valor de - 0,1%. Este valor foi obtido a partir da Tabela 5.5.

Assim, para os medidores eletrônicos, foram considerados os seguintes erros prováveis:

- Erro provável considerado: eletrônicos que contabilizam o fenômeno harmônico (medidores W1 e W2) = - 0,1% (média geral)
- Erro provável considerado para os eletrônicos que não contabilizam o fenômeno harmônico (X, T e diversos 2) = - 9,1%

Distinguem-se então, três formas de medição, que ocorrem paralelamente no parque de medição da concessionária:

- 1) medidores eletromecânicos (diversos 1), que não possuem protocolo definido acerca de fenômenos harmônicos, erro provável, - **3,3 %**;
- 2) medidores eletrônicos (W) que contabilizam o fenômeno harmônico, erro provável, - **0,1 %**;
- 3) medidores eletrônicos (X, T) que não contabilizam o fenômeno harmônico, erro provável, - **9,1 %** ($DHT_i = 22,8\%$).

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DE MEDIÇÃO

E

FATURAMENTO

6.1 Parque de medição

A partir dos conceitos apresentados nos capítulos anteriores e em posse dos dados obtidos das medições, em campo, das distorções harmônicas de corrente, juntamente com os ensaios realizados na UNIFEI será desenvolvida, neste capítulo, uma análise aplicada de tais resultados. Esse estudo, concluído em 2003, teve como objetivo colher dados de medições das distorções harmônicas em sistemas de distribuição da concessionária, bem como proporcionar o desenvolvimento de propostas de estabelecimento de níveis de tolerância das potências distorcidas, analisando também:

- a confiabilidade operativa (sistema de medição);
- a medição de consumo mais adequada e justa do que a atual.

Dentre as etapas do estudo supracitado, as que fazem parte da análise a ser desenvolvida neste capítulo são:

- 1) Resultados dos ensaios dos medidores eletromecânicos e eletrônicos de energia elétrica já apresentados no capítulo V;
- 2) Medições dos níveis de distorção harmônica de corrente em consumidores do subgrupo A4;
- 3) Medições de consumo de energia elétrica em consumidores do subgrupo A4.

Campanha de medição

Com o objetivo de se observar a participação das cargas não lineares existentes em todas as classes consumidoras, as medições feitas seguiram a seguinte metodologia:

- medições em indústrias diversas;
- medições em residências;
- medições em indústrias do subgrupo A4.

Como o objetivo deste trabalho é analisar apenas o caso dos consumidores industriais enquadrados no subgrupo A4, será exposta, na sequência, esta etapa de medições.

Foi selecionado, para medição, um total de cento e quatro consumidores, dentro do universo da área de concessão da concessionária, estratificados segundo os ramos de atividade em que se enquadram com os estabelecidos pela resolução da ANEEL nº 456/2000, (ANEEL, 2000b).

Chegou-se à quantidade acima através de técnicas estatísticas para a determinação do número de elementos de uma amostra que represente fielmente o universo estatístico, quando uma variância é pré-determinada. Tais técnicas não serão apresentadas neste trabalho, pois saem do seu escopo. Em resumo, os dados para a determinação foram:

Total de consumidores A4: 10650 (população total);

Variância adotada: $\tau_o = 0,1$ (10%);

Número de amostras definido pela expressão estatística:

$$n \geq \frac{N}{N \cdot \tau_o^2 + 1} \quad (\text{Equação 6.1})$$

$n > 99$ amostras

Escolha dos pontos a serem monitorados, ponderada por:

- consumo médio total pelo ramo de atividade;
- número de consumidores;
- consumo por faixa de demanda dentro do ramo de atividade;
- e ainda, escolha aleatória de alguns ramos de atividade com menor consumo (dos 45 ramos de atividade existentes para o subgrupo A4, foram escolhidos 20).

Para realizar a tarefa de medição dos parâmetros elétricos, foi utilizado o qualímetro MAHR-21 da RMS. Os valores das DHT_i para as fases 1 e 3 de cada consumidor se encontram na tabela Anexo B.

6.1.1 Cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT_i)

A Tabela 6.1 de distribuição das amostras dos pontos de monitoração, por faixas de potência e por ramos de atividade, obtida nas medições, se encontra no Anexo A.

A partir desses dados, este trabalho se propôs a representar cada ramo de atividade pelo seu respectivo histograma de potência, com o objetivo de obter, posteriormente, a potência média referente a cada ramo, conforme apresentado na sequência.

Fazendo uso das teorias estatísticas e dos dados apresentados na tabela do Anexo A, obteve-se o valor médio de potência ativa demandada referente a cada ramo de atividade que compõem a coluna “Potência (kW)” da Tabela 6.2. Por exemplo, para o ramo de atividade nº 1, “Fabricação de Produtos Alimentícios”, segue o desenvolvimento:

Ramo de atividade: Fabricação de produtos alimentícios

Tabela 6.1 – Dados de potência

CLASSES (kW)	Frequência absoluta	Média da classe	Freq (abs) x média
0 – 50	1	25	25
50 – 100	1	75	75
100 – 200	1	150	150
200 – 500	2	350	700
500 – 1000	2	750	1500
1000 – 2500	6	1750	10500
Total	13	-	12950 kW
Pot _{med}			996,15 kW

Onde:

Média da classe: média aritmética dos extremos da respectiva classe;

Pot_{med}: média ponderada das médias de cada classe em que os pesos são as frequências absolutas de cada classe.

Ou seja,

$$Pot_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n F(i).M(i)}{\sum_{i=1}^n F(i)} \quad (\text{Equação 6.2})$$

onde:

F(i) é a frequência absoluta da classe (i);

M(i) é a média da classe (i).

Assim, cada ramo de atividade pôde ser representado pelo seu histograma, conforme mostrado a seguir:

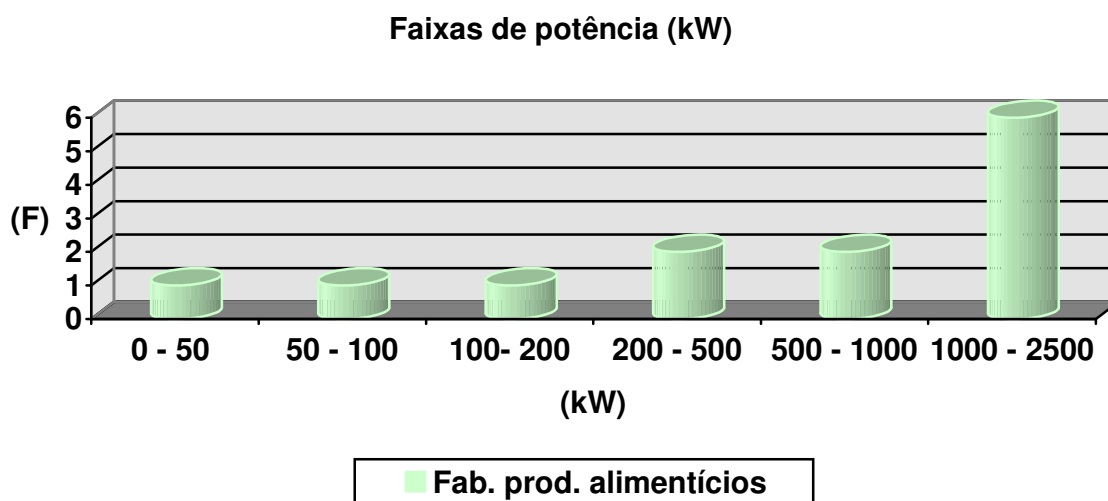


Figura 6.1 - Histograma

Todos os histogramas referentes a cada ramo de atividade se encontram no Apêndice A.

As medições de DHT_i de cada consumidor da amostra foram feitas com os qualímetros anteriormente citados na configuração de dois elementos, portanto, o valor aqui calculado para cada ramo de atividade dos consumidores em questão foi obtido através da média quadrática, ou seja, valor eficaz entre os dois valores das fases 1 e 3. Os valores das distorções harmônicas expressam a probabilidade $P[95\%]$, ou seja, se um total de 100 (cem) medições fosse realizado, em 95 (noventa e cinco) vezes o resultado seria o mostrado pelo equipamento o qual realizou a coleta dos dados.

Valor eficaz

A expressão usada para o cálculo do valor eficaz dos valores das fases 1 e 3 das medidas de distorção harmônica de corrente, realizadas conforme campanha de medição já apresentada anteriormente, segue abaixo:

$$DHTi_{ef} = \sqrt{\frac{(DHTi1)^2 + (DHTi2)^2}{2}} \quad (\text{Equação 6.3})$$

Onde:

$DHTi_{ef}$ - valor eficaz da distorção harmônica de corrente (%) dos valores de distorção harmônica de corrente das fases 1 e 3;

$DHTi_1$ - valor de distorção harmônica de corrente (%) medido na fase 1 do consumidor;

$DHTi_3$ - valor de distorção harmônica de corrente (%) medido na fase 3 do consumidor.

Para efeito de demonstração, será exposto o cálculo referente ao ramo de atividade “Fabricação de Produtos Alimentícios”.

Em de cada ramo de atividade no qual havia mais de um consumidor com medição realizada, para se chegar a um valor único de $DHTi$, foi calculada a média aritmética entre os valores existentes. Portanto, os valores médios de cada fase foram utilizados para se estimar o valor representativo de cada ramo de atividade através da média quadrática, conforme apresentado a seguir.

Dados:

$$DHTi_1 = 17,17 \%$$

$$DHTi_3 = 14,58 \%$$

$$DHTi_{ef} = \sqrt{\frac{(17,17)^2 + (14,58)^2}{2}}$$

$$DHTi_{ef} = 15,93 \%$$

A tabela completa com o resultado das medições em campo se encontra no Anexo B. Na sequência, é mostrada a Tabela 6.2 com os valores médios calculados para cada ramo de atividade. Essa tabela foi montada a partir da repetição do processo exemplificado anteriormente.

Desta forma, obteve-se a Tabela 6.2 composta pelos valores médios de potência e as distorções harmônicas de cada ramo de atividade.

Tabela 6.2 - Potência x DHTi

Ordem	Ramo de atividade	Potência (kW)	DHTi (%)
1	Fabr. de prod. alimentícios	996,15	15,93
2	Fabricação de produtos têxteis	895,45	7,39
3	Água, esgoto e saneamento	410,00	22,52
4	Fab. celulose, papel e prod. papel	1750,00	10,10
5	Comercial (varejista)	135,00	33,70
6	Indústria mecânica	1000,00	50,71
7	Metalurgia básica	600,00	28,53
8	Serviço público	187,50	10,10
9	Fab. equipamentos de transportes	1750,00	22,42
10	Fab. de produtos químicos	1050,00	14,29
11	Autarquias	37,50	9,61
12	Agricultura/criação animal	68,75	30,35
13	Fab. prod. de minerais não metálicos	216,67	54,19
14	Fabricação de bebidas	1750,00	22,60
15	Fab. mat. eletrônico/aparelho comunic.	1083,33	5,20
16	Serviços comunic. e telecomunic.	50,00	30,65
17	Entidades sem fins lucrativos	50,00	14,78
18	Hotéis e restaurantes	83,33	15,54
19	Serviços pessoais	112,50	17,27
20	Outros	442,86	32,14

Para o cálculo da distorção harmônica total média de corrente, foi calculado o valor médio da distorção harmônica de correntes dos 104 consumidores, coluna DHTi (%) da Tabela 6.2, através da média ponderada desses valores, atribuindo-se como pesos as demandas de potência ativa referente a cada ramo de atividade, coluna “Potência (kW)”, da Tabela 6.2.

$$DHT_{med} = \frac{Pot1.DHT1 + Pot2.DHT2 + \dots + Potn.DHTn}{Pot1 + Pot2 + \dots + Potn} \quad (\text{Equação 6.4})$$

onde:

Pot_n - Demanda de potência ativa do ramo de atividade de ordem n ;

DHT_n - Distorção Harmônica Total Média de Corrente do ramo de atividade de ordem n ;

n - ordem: 0,1,2,...,20.

Portanto, o valor médio de Distorção Harmônica Total de corrente obtido para esta amostra de 104 consumidores é $DHT_{méd} = 20,29 \%$. Este valor, considerado alto pelo que recomenda a Tabela 3.2, expressa o nível de distorção harmônica total de corrente para os consumidores em questão.

6.1.2 Análise de medição e faturamento

Sem a existência de uma legislação nacional e mundial que contemple de forma ampla a contabilização dos efeitos da má qualidade da energia elétrica no seu faturamento, ainda hoje, no Brasil, apenas a energia não ativa de deslocamento é faturada indiretamente, além da parcela ativa que realiza trabalho. Portanto, conforme exposto no início deste capítulo, as parcelas de energia não ativas de distorção e desequilíbrio ainda não são faturadas. O mesmo acontece com o fator de potência, ou seja, é medido de hora em hora, apenas o fator de potência de deslocamento. O conceito de fator de potência global, apresentado por Bernardes (2003), no entanto, ainda não é praticado. A resolução da ANEEL nº 456/2000 (ANEEL, 2000b), que regula o faturamento de energia reativa excedente através deste fator de potência de deslocamento, atribui ao consumidor A4, objeto deste estudo, no final do período de medição, o ônus por não atingir o valor do fator de potência em 0,92, pagando proporcionalmente pela ocupação excessiva do sistema elétrico.

Este trabalho procura investigar o efeito dos novos protocolos de medição e faturamento de energias não ativas no que diz respeito à contabilização da energia não ativa total, ou seja, aquela que inclui a potência não ativa de deslocamento e de distorção.

Para isso, estuda-se o impacto causado no faturamento da energia não ativa total, baseado nos erros apresentados pelos medidores conforme capítulo V, quando submetidos a sinais distorcidos. Aqui neste estudo, apenas o fenômeno da distorção harmônica é o foco das

análises, uma vez que os medidores não foram ensaiados com sinais desequilibrados. Portanto, a potência não ativa de distorção (D) e a potência não ativa de deslocamento (Q), juntamente, compõem a potência não ativa total (Q_T), objeto da análise. Sendo assim, o valor da potência de desequilíbrio (A) apresentada na Equação 4.28 será zero para efeito dos cálculos.

Neste trabalho, utiliza-se o termo energia reativa conforme estabelecido na resolução nº 456 da ANEEL (ANEEL, 2000b), mas quando se deseja referenciar neste texto os conceitos dos novos protocolos, usa-se o termo energia não ativa total.

Tem-se a Tabela 6.3 com os valores totais das medições de energia reativa no período de um mês, respectivos aos tipos e quantidades de medidores e fabricantes, que compõem a configuração atual do parque de medição da concessionária.

Tabela 6.3 - Valores totais das medições

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kvarh) atual
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455
W	W1 e W2	724	1.268.178
X	X1	2.888	3.902.941
	X2	6	46.686
	X3	261	1.130.933
	X4	519	1.255.867
T	T1 e T2	1.141	1.864.513
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664
Totais		11474	13.893.237

Para se estudar o impacto dos novos protocolos na medição e faturamento de energias não ativas, adotou-se a seguinte sequência de procedimentos:

- Primeiramente, quatro configurações de medição foram adotadas para análise:

- 1) configuração A, também aqui chamada de original ou atual, contendo medidores eletromecânicos e eletrônicos que contabilizam ou não o efeito da distorção na medição;
- 2) configuração B, apenas com medidores eletromecânicos (fabricante diversos 1);

3) configuração C, apenas com medidores eletrônicos que contabilizam a distorção harmônica na medição (fabricante W);

4) configuração D, apenas com medidores eletrônicos que não contabilizam a distorção harmônica na medição (fabricantes X e T).

Os erros prováveis apresentados pelos medidores no Capítulo V com relação à contabilização ou não do efeito harmônico na medição, é o que diferencia as configurações criadas nesta dissertação. Ou seja, os valores dos erros prováveis adotados para os cálculos e para a composição de cada configuração descrita no parágrafo anterior são:

Tabela 6.4 - Erros e tecnologias dos medidores

Fabricante	Modelo	Tecnologia	erro provável (%)
diversos 1	eletromecânico	eletromecânico	- 3,30
W	W1 e W2	eletrônico	- 0,10
X	X1	eletrônico	- 7,35
	X2	eletrônico	- 7,35
	X3	eletrônico	- 7,35
	X4	eletrônico	- 7,35
T	T1 e T2	eletrônico	- 7,35
diversos 2	eletrônico	eletrônico	- 7,35

No caso dos medidores eletrônicos que não contabilizam a distorção harmônica em suas medições, fabricantes X, T e diversos 2, o valor utilizado do erro provável - 7,35%, foi calculado da seguinte forma:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + (0,2029 I_1)^2}$$

$$Q = V I_1 \sin 30$$

$$P = V I_1 \cos 30$$

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(V I)^2 - (V I_1 \cos 30)^2} = V I_1 \sqrt{1^2 + 0,2029^2 - 0,866^2}$$

$$\frac{Q - Q_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}} \cdot 100\% = \frac{V I_1 \sin 30 - V I_1 \sqrt{1^2 + 0,2029^2 - 0,866^2}}{V I_1 \sqrt{1^2 + 0,2029^2 - 0,866^2}} \cdot 100 = \frac{0,5 - 0,5396}{0,5396} \cdot 100$$

Erro provável: - 7,35%

Com relação aos medidores eletromecânicos, fabricante diversos 1, foi utilizado o valor - 3,30% como erro provável, sendo este referente ao ensaio nº 3, que utilizou uma corrente típica de um alimentador mais próxima da realidade no experimento.

Já para os medidores eletrônicos W, que são sensíveis aos harmônicos na sua medição, foi adotado o erro provável - 0,10%, obtido pela média dos valores apresentados na Tabela 5.5 no capítulo V.

- Posteriormente, foram obtidos os valores das energias reativas globais (corrigidas) a partir dos valores originais, levando em consideração os erros dos medidores já mostrados, bem como as respectivas energias ativas por consequência do fator de potência médio indutivo adotado no período de faturamento.

- Por último, para as quatro configurações, foram calculados os valores totais do faturamento de excedentes reativos (FER) que seriam pagos pelos consumidores do subgrupo A4, caso não atingissem o valor do fator de potência de referência, 0,92, indutivo ou capacitivo, estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000).

A Tabela 6.3 apresentada anteriormente informa os valores globais da medição de energia reativa no período de um mês referente aos 11474 medidores instalados em clientes A4 no parque de medição da concessionária. Portanto, será considerada a estrutura tarifária convencional para efeito de análise, uma vez que esta modalidade permite que seja calculado o faturamento do fator e potência por valor médio, pela expressão a seguir, segundo a Resol. nº 456/2000, da ANEEL, em seu artigo nº 66.

$$FER = CA \times \left(\frac{fr}{fm} - 1 \right) \times TCA \quad (\text{Equação 6.5})$$

Onde:

FER - valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

CA - consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

fr - fator de potência de referência igual a 0,92;

fm – fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;

TCA – tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento.

Com o objetivo de visualizar o efeito causado no faturamento de energia pelos erros prováveis dos medidores com relação a não contabilização de harmônicos na medição de energia reativa, optou-se pelo cálculo aproximado de FER, uma vez que a energia reativa não é faturada diretamente, de acordo com a legislação atual, embora seja medida. Em cada uma das configurações foi obtido o valor de FER para diferentes valores de fatores de potência médios mensais adotados, abaixo de 0,92, variando-se de 0,60 a 0,90.

Serão mostrados a seguir, como exemplo, os cálculos referentes à primeira linha da tabela da configuração A, para um fator de potência médio mensal no valor de 0,60.

Fabricante: Diversos 1

Modelo: eletromecânicos

Quantidade de medidores: 3537

Energia (kvarh) orig: 917.455 kvarh

Erro (kvarh): - 3,30 %

Energia (kvarh) corrigida

Considerando-se o erro negativo já adotado para representar os modelos de medidores eletromecânicos, foi obtida, por proporcionalidade, a energia reativa corrigida aplicando-se o valor de - 3,30 % como erro de medição dessa energia.

$$Energia(kVArh)_{cgda} = \frac{917455}{96,7} \cdot 100$$

$$Energia(kvarh)_{cgda} = 948.764 \text{ kvarh}$$

Vale lembrar que o erro negativo expressa que a leitura do medidor indica que o valor medido possui um erro de 3,30 % a menos em relação ao valor real que o aparelho indicaria se estivesse com erro zero. Então a base de referência da percentagem é o valor real, ou seja, aquele indicado por um medidor padrão ao qual o medidor sob ensaio foi comparado.

Energia (kWh) original

A energia ativa foi obtida como segue:

$$Energia \text{ (kWh)}_{orig} = \frac{Energia(kVArh)_{orig}}{FP} \quad \text{(Equação 6.6)}$$

Onde:

$Energia \text{ (kWh)}_{orig}$ – consumo de energia ativa registrado num mês, em kWh;

FP – fator de potência médio mensal;

FP = 0,60.

O índice “orig” representa a medição original obtida, conseqüentemente, sem a consideração dos erros prováveis dos medidores.

Portanto,

$$\text{Energia (kWh)}_{\text{orig}} = \frac{917.455}{0,60}$$

$$\text{Energia (kWh)}_{\text{orig}} = 688.108 \text{ kWh}$$

Energia (kWh) corrigida

Para obtenção do valor do consumo da energia ativa corrigida foi utilizado o valor da energia reativa já corrigida pelo erro do medidor, $\text{Energia(kvarh)}_{\text{cgda}}$, aplicando-se o fator de potência médio mensal, conforme expressão abaixo:

$$\text{Energia (kWh)}_{\text{cgda}} = \frac{\text{Energia(kVArh)}_{\text{cgda}}}{FP} \quad (\text{Equação 6.7})$$

Portanto, neste caso:

$$\text{Energia (kWh)}_{\text{cgda}} = \frac{948.764}{0,60}$$

$$\text{Energia (kWh)}_{\text{cgda}} = 711.591 \text{ kWh}$$

A sigla “cgda” no índice das variáveis significa que elas se referem aos valores já corrigidos com base nos erros dos medidores.

Finalmente, foram calculados dois valores de faturamento de excedente reativo (FER), um para a configuração A sem a consideração dos erros dos medidores, e outro valor

para a mesma configuração A com a hipótese de consideração dos erros dos medidores na medição de energia elétrica reativa.

O primeiro valor de FER é denominado, nas tabelas dos Apêndices B e C, como FER original, e o segundo, FER corrigido.

6.1.2.1 Cálculo do faturamento de excedente reativo (FER)

A legislação brasileira (ANEEL, 2000b) fatura do consumidor, indiretamente, o consumo excessivo de energia reativa, aquela que não produz trabalho e acarreta ocupação adicional do sistema elétrico de potência, através do cálculo do FER quando o consumidor não atinge, durante o período de faturamento, o fator de potência no valor de 0,92 estabelecido pela ANEEL, desde 2000, em sua resolução já mencionada neste capítulo.

Assim, é importante analisar o efeito da não contabilização integral da energia não ativa total, ou seja, aquela que inclui o fenômeno da distorção do sinais de corrente através dos erros causados na medição de energia reativa e, conseqüentemente, no cálculo da potência ativa conforme estimado neste trabalho. O valor do FER depende diretamente da energia ativa obtida a partir da energia reativa, como será mostrado na seqüência. Vale lembrar que a não contabilização integral da energia não ativa total, significa que uma determinada medição pode contabilizar apenas a parcela de energia não ativa de deslocamento e não a outra, que é a parcela não ativa de distorção.

Conforme exposto, os cálculos dos dois valores de excedentes reativos mostrados nas tabelas dos Apêndices B e C, FER_{orig} e FER_{cgdo} foram realizados segundo as expressões abaixo:

$$FER_{orig} = CA_{orig} \times \left(\frac{fr}{fm} - 1 \right) \times TCA \quad (\text{Equação 6.8})$$

$$FER_{cgdo} = CA_{cgda} \times \left(\frac{fr}{fm} - 1 \right) \times TCA \quad (\text{Equação 6.9})$$

E, no caso da primeira linha da tabela da Configuração A, tem-se:

$$CA_{orig} = 688.108 \text{ kWh}$$

$$CA_{cgda} = 711.591 \text{ kWh}$$

$$fr = 0,92$$

$$fm = 0,60$$

$$TCA = R\$ 0,17138 \text{ MWh (CEMIG - abril 2005)}$$

$$FER_{orig} = 688.108 \times \left(\frac{0,92}{0,60} - 1 \right) \times 0,17138$$

$$FER_{orig} = R\$ 62.894,95$$

$$FER_{cgdo} = 711.591 \times \left(\frac{0,92}{0,60} - 1 \right) \times 0,17138$$

$$FER_{cgdo} = R\$ 65.041,31$$

Assim, a mesma seqüência de cálculo foi utilizada para obtenção dos valores referentes às outras linhas (outros medidores) das tabelas da configuração A, do Apêndice B.

Após o exemplo demonstrado, vale lembrar que os valores de energia não ativa total e FER que foram obtidos com a mesma metodologia anterior para as demais configurações (B, C e D), são apresentados nas tabelas do Apêndice B.

6.1.2.2 Análise de investimento

É válido que seja realizado um estudo preliminar a respeito da viabilidade econômica de substituição dos atuais medidores da concessionária por outros, como os do fabricante W, que contabilizam a distorção dos sinais em suas medições.

Uma análise de investimento é feita a seguir, com o intuito de estudar a viabilidade financeira de troca dos atuais medidores da concessionária por aqueles que contemplam, em

seu protocolo de medição, o fenômeno harmônico. Para isso será utilizado o critério do tempo de retorno de capital (TRC), ou *payback*, que é o mais difundido no meio técnico para análises de viabilidade econômica, principalmente devido à sua facilidade de aplicação (Bortoni, 2001). Este critério mostra quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao investimento, levando-se em consideração o custo do capital que, no caso, é a própria taxa de juros.

Diferentemente do cálculo da taxa interna de retorno (TIR), outro critério de análise, o tempo de retorno de capital (TRC) pode ser calculado algebricamente a partir da expressão (Bortoni, 2001) a seguir:

$$n = - \frac{\ln[1 - (I/A)i]}{\ln(1+i)} \quad (\text{Equação 6.10})$$

Onde:

n = tempo de retorno descontado;

I = investimento;

A = anuidades;

i = taxa de juros (a.a.).

Será analisada, a seguir, a viabilidade de troca do parque de medição da concessionária segundo as medições de energia mostradas na Tabela 6.3, visando à troca dos atuais 10750 medidores existentes pelos modelos W1 ou W2 que, segundo os ensaios também já mostrados, contabilizam o efeito harmônico no protocolo de medição. Com esta análise, procura-se saber se é viável essa troca, observando-se o tempo de retorno do investimento da troca de todos os medidores, exceto pelos próprios modelos W1 e W2 já instalados, obviamente.

A condição atual e real do parque de medição da concessionária é aqui chamada neste trabalho de “configuração A”. Portanto, seguem-se os cálculos do tempo de retorno de capital para todos os valores totais de FER estimados de acordo com os diferentes fatores de potência médios que compuseram a configuração A, conforme tabelas do Apêndice B:

Total de medidores: 10750

Custo do medidor, modelo W: R\$ 500,00 (março - 2005)

Investimento (100% medidores): R\$ 5.375.000,00

A: valor anual que a concessionária passa a faturar com os novos medidores

$i = 8\%$ a.a. (2005)

FP_G : fator de potência global

Cálculos

- $FP_G = 0,60$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = 1.018.337,27 - 952.432,99 = R\$ 65.904,28$$

$$A = 12 \times 65.904,28 = R\$ 790.851,36$$

$$n = - \frac{\ln[1 - (5375000/790851,36)0,08]}{\ln(1 + 0,08)}$$

$$n = 10,2 \text{ anos}$$

- $FP_G = 0,65$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 58.538,49$$

$$A = 12 \times 58.538,49 = R\$ 702.461,88$$

$$n = 12,3 \text{ anos}$$

- $FP_G = 0,70$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 50.760,86$$

$$A = 12 \times 50.760,86 = R\$ 609.130,32$$

$$n = 15,9 \text{ anos}$$

- $FP_G = 0,75$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 42.344,43$$

$$A = 12 \times 42.344,43 = R\$ 508.133,16$$

$$n = 24,3 \text{ anos}$$

- $FP_G = 0,80$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 32.951,18$$

$$A = 12 \times 32.951,18 = R\$ 395.414,16$$

$$n = \infty$$

- $FP_G = 0,85$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 21.891,95$$

$$A = 12 \times 21.891,95 = R\$ 262.703,40$$

$$n = \infty$$

- $FP_G = 0,90$

$$FER_{cgdo} - FER_{orig} = R\$ 7.560,21$$

$$A = 12 \times 7.560,21 = R\$ 90.722,52$$

$$n = \infty$$

As conclusões sobre a análise de viabilidade econômica da troca do parque de medição são baseadas nas diferenças entre os valores FER originais e corrigidos da configuração A, para o valor de fator de potência global médio 0,85, típico em relação aos outros valores bem menores, considerando-se que a quantidade de 10750 medidores (93% do total) os quais não contabilizam o fenômeno harmônico atualmente instalados, seriam substituídos pelos do tipo W1 ou W2.

6.1.2.3 Cenários futuros

É de conhecimento dos profissionais do setor elétrico a crescente proliferação das cargas não lineares, como exposto nos capítulos anteriores. No capítulo III, foi abordado o crescimento da distorção harmônica de tensão através de dois estudos realizados de forma análoga, um nos E.U.A. e outro no Brasil. Portanto para uma estimativa provável dos efeitos da propagação harmônica nas redes de distribuição, serão analisados a seguir, de forma hipotética, três cenários futuros sob o enfoque das consequências no sistema de medição da concessionária já abordada, no que se refere ao crescimento da distorção harmônica de

corrente. Na seqüência, será estimado novamente o mesmo impacto da não contabilização de harmônicos no faturamento de excedente reativo e na medição de energia não ativa total (energia reativa), porém considerando a propagação da distorção harmônica no parque de medição da concessionária.

Para tanto, são considerados três casos hipotéticos com valores futuros de distorção harmônica média de corrente, nos quais as medições são feitas com uma única tecnologia, da seguinte forma:

Cenário 1

DHTi : 25 %

Cenário 2

DHTi: 30%

Cenário 3

DHTi: 40 %

A tecnologia empregada nas medições para os três cenários é constituída de medidores eletrônicos que não contabilizam o efeito da distorção harmônica de corrente.

Conforme já exposto no cálculo dos erros prováveis dos medidores eletrônicos X, T e diversos 2, a distorção harmônica de corrente afeta diretamente o desempenho deste tipo de medidor. Com isso, para a análise dos cenários futuros, foram escolhidos os medidores do fabricante X para simular as medições. Foram então estimados os valores dos erros prováveis nos três casos, como feito no capítulo V, sendo admitido um deslocamento indutivo de 30° entre a tensão e a corrente. Seguem abaixo os cálculos dos erros prováveis:

Cenário 1 (DHT_i = 25 %)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + (0,25 I_1)^2}$$

$$Q = V I_1 \sin 30$$

$$P = V I_1 \cos 30$$

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(V I)^2 - (V I_1 \cos 30)^2} = V I_1 \sqrt{1^2 + 0,25^2 - 0,866^2}$$

$$\frac{Q - Q_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}} \cdot 100\% = \frac{V I_1 \sin 30 - V I_1 \sqrt{1^2 + 0,25^2 - 0,866^2}}{V I_1 \sqrt{1^2 + 0,25^2 - 0,866^2}} \cdot 100 = \frac{0,5 - 0,5500}{0,5500} \cdot 100$$

Erro provável: -9,01

Cenário 2 (DHT_i = 30%)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + (0,30 I_1)^2}$$

$$Q = V I_1 \sin 30$$

$$P = V I_1 \cos 30$$

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(V I)^2 - (V I_1 \cos 30)^2} = V I_1 \sqrt{1^2 + 0,30^2 - 0,866^2}$$

$$\frac{Q - Q_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}} \cdot 100\% = \frac{V I_1 \sin 30 - V I_1 \sqrt{1^2 + 0,30^2 - 0,866^2}}{V I_1 \sqrt{1^2 + 0,30^2 - 0,866^2}} \cdot 100 = \frac{0,5 - 0,5822}{0,5822} \cdot 100$$

Erro provável: -14,12%

Cenário 3 (DHT_i = 40%)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + (0,40 I_1)^2}$$

$$Q = V I_1 \sin 30$$

$$P = V I_1 \cos 30$$

$$Q_{TOTAL} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(V I)^2 - (V I_1 \cos 30)^2} = V I_1 \sqrt{1^2 + 0,40^2 - 0,866^2}$$

$$\frac{Q - Q_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}} \cdot 100\% = \frac{V I_1 \sin 30 - V I_1 \sqrt{1^2 + 0,40^2 - 0,866^2}}{V I_1 \sqrt{1^2 + 0,40^2 - 0,866^2}} \cdot 100 = \frac{0,5 - 0,6395}{0,6395} \cdot 100$$

Erro provável: -21,82%

Em seguida, foram calculados, da mesma forma que nas configurações A, B, C e D, os valores de energia não ativa total e FER para as situações dos cenários futuros. Os resultados são apresentados nas tabelas do Apêndice C.

6.1.3 Resultados

Configurações A, B, C, D

Para facilitar a visualização dos resultados obtidos nas quatro configurações de medição do parque de medição em análise, eles foram agrupados nas tabelas a seguir:

Tabela 6.5 - Faturamento de excedente reativo (A, B, C, D), R\$

	A		B		C		D	
FP	FER_(orig)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)
0,60	952.432,99	1.018.337,27	984.935,88	953.386,38	953.386,38	1.027.990,28		
0,65	845.984,35	904.522,84	874.854,55	846.831,18	846.831,18	913.096,98		
0,70	733.583,80	784.344,66	758.618,20	734.318,12	734.318,12	791.779,60		
0,75	611.951,67	654.296,10	632.835,23	612.564,23	612.564,23	660.498,30		
0,80	476.202,69	509.153,87	492.453,66	476.679,37	476.679,37	513.980,23		
0,85	316.377,17	338.269,12	327.173,91	316.693,87	316.693,87	341.475,63		
0,90	109.258,32	116.818,53	112.986,69	109.367,69	109.367,69	117.925,88		

Tabela 6.6 - Energia não ativa total (A, B, C, D), em kvarh

	A		B		C		D	
Q_(orig)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)
13.893.237	14.854.589	14.367.360	13.907.144	14.995.399				

A Figura 6.2 mostra os valores de energia não ativa total obtidos nas medições com as configurações A, B, C e D em relação a original:

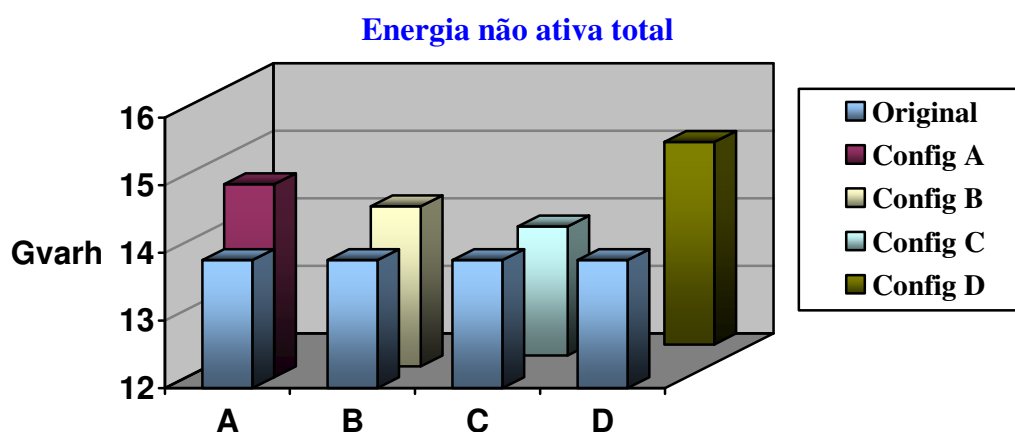


Figura 6.2 - Energia não ativa total, configurações A, B, C e D

A mesma metodologia de cálculos foi utilizada para as configurações chamadas nesta dissertação de cenários futuros. Seguem os resultados da medição de energia não ativa total e faturamento de excedente reativo:

Cenários futuros

Tabela 6.7 - Faturamento de excedente reativo (cenários futuros), em R\$

		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
FP	FER_(orig)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)	FER_(cgdo)
0,60	952.432,99	1.046.744,69	1.109.027,71	1.218.256,58
0,65	845.984,35	929.755,30	985.077,26	1.082.098,17
0,70	733.583,80	806.224,64	854.196,32	938.326,68
0,75	611.951,67	672.548,27	712.565,99	782.747,08
0,80	476.202,69	523.357,17	554.497,77	609.110,62
0,85	316.377,17	347.705,43	368.394,47	404.677,89
0,90	109.258,32	120.077,29	127.222,08	139.752,27

Tabela 6.8 - Energia não ativa total (cenários futuros), em kvarh

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Q_(orig)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)	Q_(cgdo)
13.893.237	15.268.971	16.177.500	17.770.833

A Figura 6.2 mostra os valores de energia não ativa total obtidos nas configurações hipotéticas cenários futuros 1, 2 e 3 em relação a original:

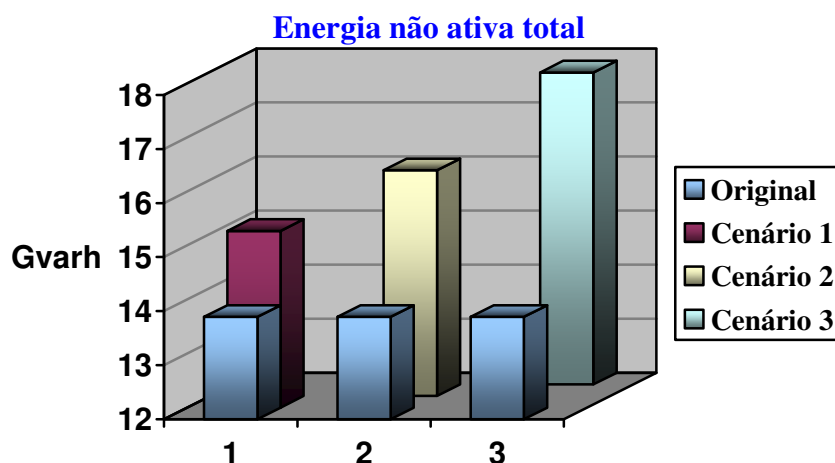


Figura 6.3 - Energia não ativa total, cenários 1, 2, 3

Através das curvas plotadas a seguir com o uso do *software* GRAPHMATICA, pode-se perceber que existe uma perda hipotética de faturamento por parte da concessionária no que diz respeito ao faturamento do fator de potência por valor médio no caso aqui estudado. As figuras 6.2 e 6.3 ilustram as diferenças na contabilização de energia não ativa total entre o que foi medido com os atuais medidores instalados e as configurações hipotéticas simuladas. O fato de os erros serem negativos indica que há uma discrepância na medição, desfavorecendo a concessionária quando se analisa a contabilização do fenômeno harmônico no parque de medidores estudado.

Configuração A

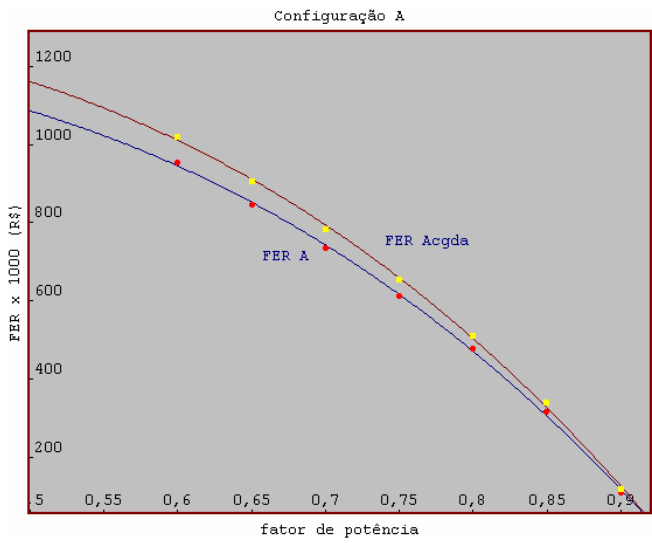


Figura 6.4 - Gráfico FER x FP, configuração A

Configuração B

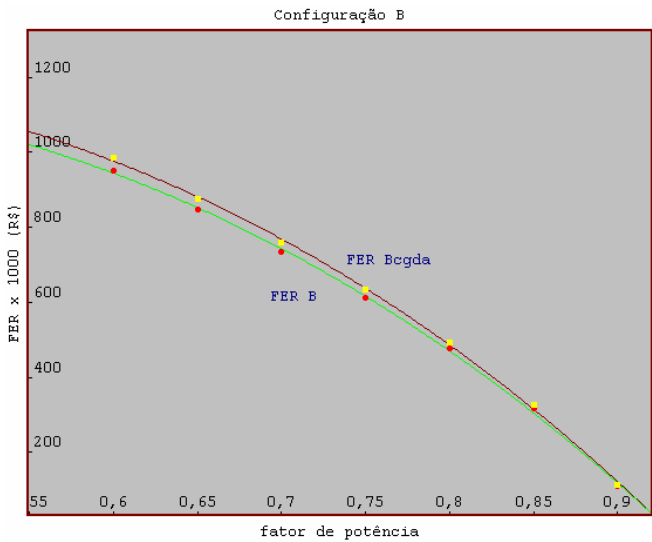


Figura 6.5 - Gráfico FER x FP, configuração B

Configuração C

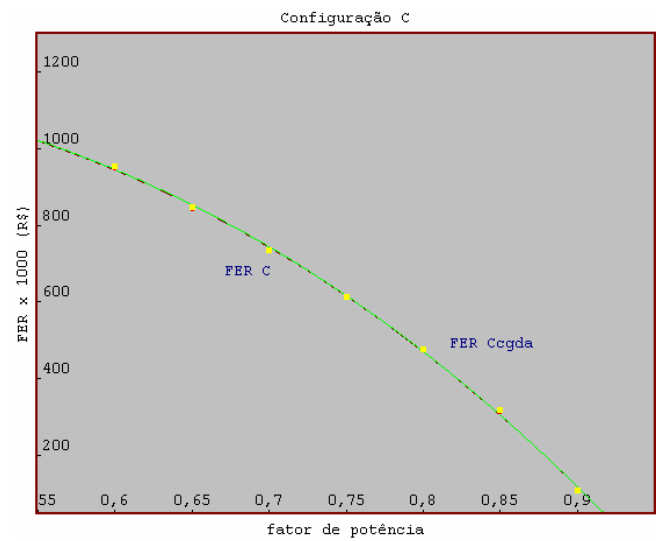


Figura 6.6 - Gráfico FER x FP, configuração C

Configuração D

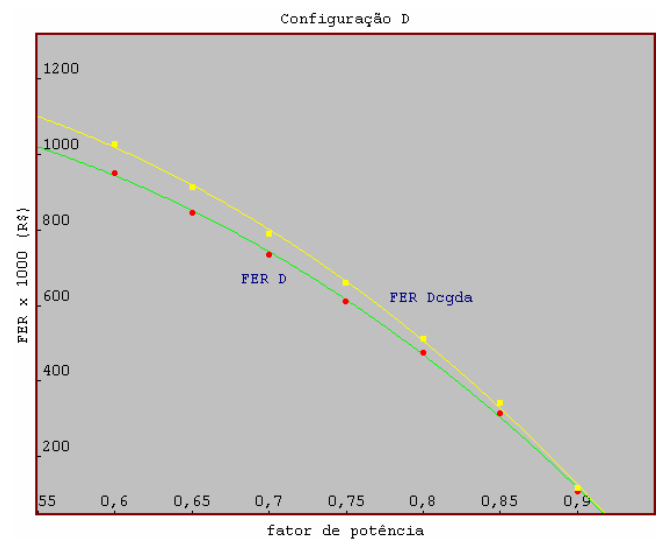


Figura 6.7 - Gráfico FER x FP, configuração D

Cenários futuros

Cenário 1

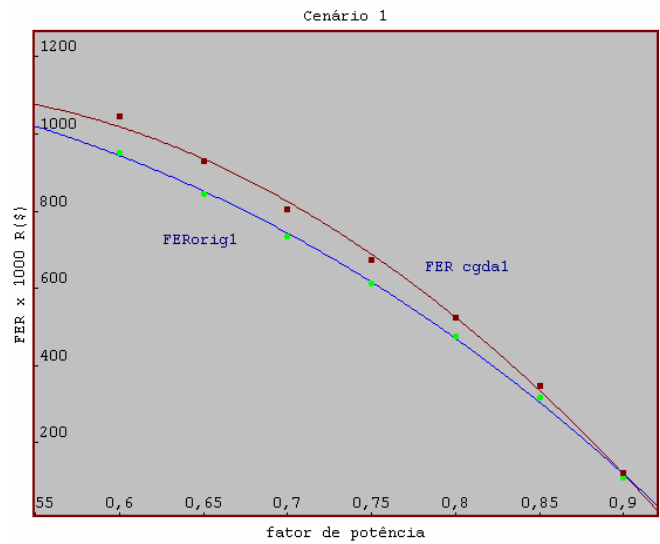


Figura 6.8 - Gráfico FER x FP, cenário 1

Cenário 2

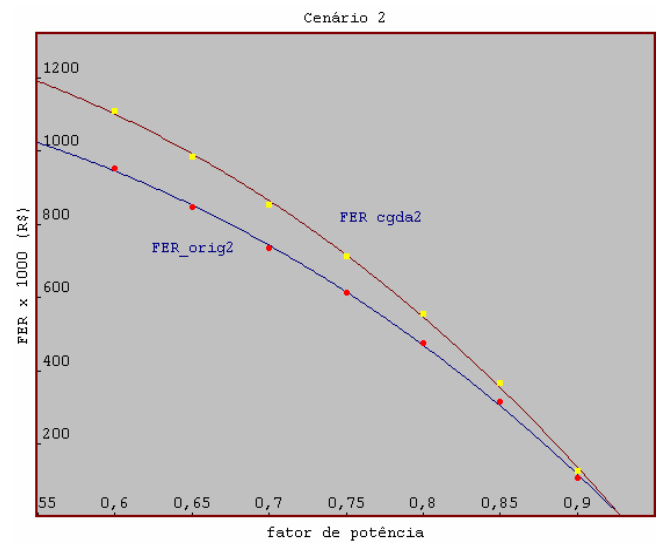


Figura 6.9 - Gráfico FER x FP, cenário 2

Cenário 3

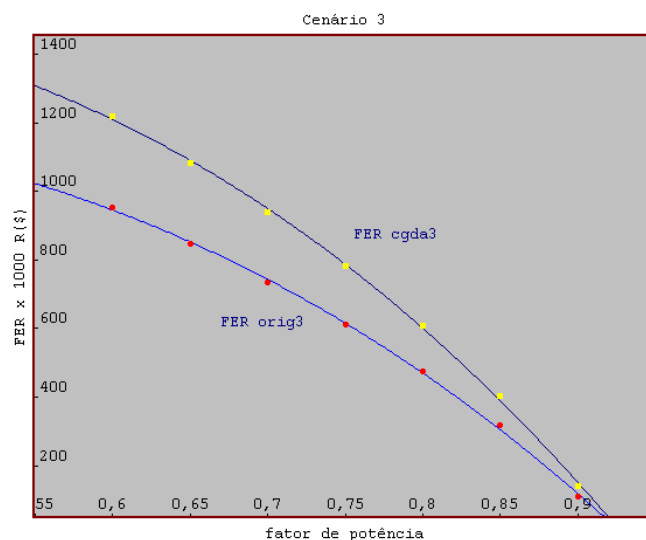


Figura 6.10 - Gráfico FER x FP, cenário 3

A contabilização da ocupação do sistema elétrico pela distorção harmônica, além de diminuir as perdas financeiras da concessionária, indiretamente forçaria os grandes consumidores poluidores do sistema elétrico, que o ocupam excessivamente, a minimizarem suas contribuições negativas ao sistema.

Atualmente, os custos da ocupação excessiva do sistema elétrico com a distorção, que não podem ser quantificados separadamente, já são repassados a todos os consumidores independente do grau de poluição de cada um. Os grandes poluidores, para diminuir o ônus da ocupação excessiva do sistema, aplicado por uma tarifação equânime, executariam ações de melhoria em suas instalações, o que contribuiria significativamente para todo o sistema elétrico.

6.2 Considerações

1) Para a realização da análise aplicada de faturamento de energia, sob a óptica dos novos protocolos de medição em ambientes distorcidos, foi admitido que todos os consumidores alimentados na região estavam enquadrados na Tarifa Convencional. Isso foi adotado pela ausência de dados referentes às medições horárias de energia elétrica, os quais são utilizados nas tarifas horo-sazonais Verde e Azul. Os dados disponíveis para análise, Tabela 6.3, são valores globais de energia. A ANEEL, em sua resolução nº 456/2000, permite neste caso, que o faturamento de excedente reativo (FER) seja feito através do fator de potência médio indutivo, portanto, através de valores globais de medição.

2) Em todo o desenvolvimento dos cálculos foram considerados valores de fator de potência médios globais, e não apenas fator de potência de deslocamento, uma vez que o fenômeno da distorção harmônica estava presente nas análises além da defasagem angular, que já vem sendo faturada através do fator de potência de deslocamento, até então;

3) Este trabalho concentrou suas análises na questão da energia reativa, ou seja, energia não ativa total conforme já exposto;

4) Os valores utilizados a partir das medições da concessionária são representativos de um único mês de medição e, para a análise econômica, considerou-se tal consumo igualmente em todos os meses do ano. Ou seja, o mês em que a medição foi realizada teve seu valor considerado como médio, portanto tal consideração permitiu o cálculo anual do consumo para fins de análise;

CONCLUSÃO

A propagação do fenômeno harmônico tem comprometido a Qualidade da Energia Elétrica. Tal situação tende a se agravar devido à crescente presença das cargas não lineares nos sistemas elétricos, conforme exposto nessa dissertação, que procurou evidenciar o problema. Portanto, muitos estudos serão necessários para a minimização de tal efeito.

Após o desenvolvimento da análise que este trabalho se propôs a fazer, a propósito da medição de energia não ativa total e do faturamento de fator de potência, podem-se evidenciar as discrepâncias entre os valores de energia reativa não contabilizados em relação aos que hoje são medidos, objetivo principal do estudo.

A vida útil dos equipamentos no setor elétrico é cerca de 30 anos, portanto, o preço atual de mercado, associado aos custos de instalação dos modernos medidores, tende a mostrar a inviabilidade do investimento para a substituição dos atuais medidores, em primeira análise, por aqueles que possuem protocolo que contabiliza a distorção harmônica. Isto porque o tempo de retorno de capital obtido na análise para o fator de potência global 0,85 é muito maior que a vida útil dos medidores. Talvez seja atrativa a substituição parcial dos medidores, após a existência de uma legislação pertinente, e em fases programadas e analisadas economicamente, uma vez que a quantidade destes equipamentos que compõem o parque de medição não é pequena.

Os cálculos superficiais da análise de viabilidade econômica da substituição dos medidores mostraram uma tendência favorável à substituição dos atuais equipamentos de medição em operação para os casos em que o fator de potência médio global é muito baixo, devido ao considerável montante dos valores hipotéticos de excedentes reativos (FER) não faturados. Faz-se necessária uma análise mais específica sobre a substituição.

Para os cenários 1, 2 e 3, percebe-se que as diferenças dos valores originais e corrigidos, tanto de potência não ativa total como de FER, são ainda maiores devido à crescente distorção harmônica de corrente presente, não contabilizada pela maioria dos medidores, segundo os novos protocolos de medição de energia não ativa total.

Levando em consideração a propagação do fenômeno harmônico e estimando alguns valores hipotéticos de futuras taxas de distorções harmônicas totais de corrente (DHTi) para o parque de medição analisado, observou-se que, em casos extremos, a situação pode se agravar

de forma descontrolada para altos níveis de distorção, do ponto de vista de faturamento da energia não ativa total.

Uma tarifação equânime se faz necessária, com o recurso de se poder discriminar o faturamento das energias não ativas de deslocamento e distorção, uma vez que o sistema atual de medição não possibilita uma atribuição mais justa da responsabilidade pelos custos adicionais no sistema elétrico causados pelas distorções harmônicas, que aumentam sua intensidade ao longo do tempo.

Todas as ações para que a contabilização da distorção dos sinais ocorra nas medições dependem não só da inserção de uma nova metodologia de cálculo nas rotinas de programação dos medidores, mas também de uma legislação que contemple tal contabilização.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando a continuidade dos estudos realizados ao longo de todo o processo de elaboração deste trabalho, sugerem-se novos temas a serem aprofundados:

- Estudos de novas tecnologias para os diferentes usos finais, visando à redução de emissão de harmônicos;
- Realização de pesquisas/ensaios com os medidores submetidos a sinais distorcidos e desequilibrados em busca da discriminação dos erros relativos a cada fenômeno separadamente, conforme novos protocolos de medição;
- Estudos de caso em outros subgrupos de consumidores, com o intuito de se avaliar a propagação do fenômeno harmônico e, com isso, também visualizar a sua influência no sistema elétrico de medição;
- Estudos com relação à proposição de uma tarifação equânime, que atribua o ônus da ocupação do sistema elétrico proporcionalmente à intensidade de emissão de harmônicos causada pelos consumidores;
- Estudos e projetos de equipamentos elétricos que auxiliam na mitigação do fenômeno harmônico, além dos já existentes;
- Elaboração de programas de Gestão Energética direcionados ao problema da Qualidade de Energia Elétrica para pequenos e médios consumidores dos setores comercial, público, residencial e industrial;
- Estudos dirigidos à elaboração de normas nacionais que estabeleçam limites de emissão de harmônicos causada pelos diversos equipamentos elétricos fabricados no país;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ABNT, 2000a) - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14418 “Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares - Prescrições de desempenho”. São Paulo, 1999.

(ABNT, 2000b) - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14519 “Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - Especificação”. São Paulo, 2000.

(ABNT, 2000c) - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14520 “Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - Método de ensaio. São Paulo, 2000.

(Abreu, 2001) - ABREU, J. P. G., SILVEIRA, P. M., ARANGO, H., GUIMARÃES, C. A. M., FILHO, J. M. C., HERMETO, A. E. “Fluxo Harmônico”. In: ____ Qualidade da Energia Elétrica, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - FUPAI: apostila. Itajubá, 2001;

(ANEEL, 2000a) - BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução nº 24, 27/01/2000. “Continuidade da Distribuição de Energia Elétrica às Unidades Consumidoras”.

(ANEEL, 2000b) - BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução nº 456, 29/11/2000, “Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica”.

(Arseneau, 1997) - ARSENEAU, R.; et alli, “Application of IEEE Standard 519-1992 harmonics Limits for Revenue Billings Meters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, N° 1, pp 346-353, january 1997;

(Bernardes, 2003) - BERNARDES, D. F., “Uma Proposição de Novos Protocolos de Medição Sob a Óptica da Qualidade da Energia Elétrica”. 2003. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE), Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI.

(Boas, 2001) - BOAS, A. L. V., “Medidor de Protocolo Aberto para Discriminação de Potências em Sistemas Elétricos Desequilibrados e Distorcidos”. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica (DET), Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá.

(Bortoni, 1995) - BORTONI, E. da C.; ARAÚJO, W. P.; DONADIO, R. G. - “Desempenho de Medidores de Watt-hora Indutivos em Ambientes não Senoidais”, Departamento de Eletrônica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, MG, 1995.

(Bortoni, 2001) - BORTONI, E. da C. et al. “Conservação de Energia - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos” págs 162 a 164, editora da EFEI, 2001.

(Bronzeado, 1997) - BRONZEADO, H. S., “Principais Aspectos da Qualidade de Energia Elétrica”, notas do Curso de Extensão Universitária, UFPE, agosto de 1997.

(Budeanu, 1927) – BUDEANU, C.I., “Puissances Reactives et Fictives”, Instytut Romain de l’Energie, Bucarest, 1927.

(Cogo, 1988) - COGO, J. R. e SÁ, J. S., “Análise de um Sistema Elétrico em Presença de Cargas Especiais”, Apostila, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1988.

(Collombet, 1999) - COLLOMBET, C., LUPIN, J., SCHONEK, J., “Harmonic disturbances in networks, and their treatment”, Cahier Technique n^o 152, Collection Technique, Schneider Electric, dezembro, 1999.

(Czarnecki, 1990) – CZARNECKI, L.S., “Correspondence on Power Components in Systems with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltage and Currents”, Proc. IEE, Vol 137, Pt.B., Nº 3, pp. 194-196, 1990.

(DKB, 1997) DKB - DESDNER KLEINWORT BENSON - “The Millenium Files”, Latin América Consumption Comes of Age, Londres, 1997.

(Domijan, 1996) - DOMIJAN, A., et al. “Watt-hour Meter Accuracy Umder Controlled Unbalanced Harmonic Voltage and Current Conditions”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, Nº 1, pp. 64-72, january 1996.

(Dugan, 1996) - DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F. E., WAYNE, B. H. - “Electrical Power Systems Quality”, Mc Graw Hill, 1996.

(Edminister, 1980) - EDMINISTER, A. J. - “Eletromagnetismo”, Teoria e Exercícios Resolvidos, Editora Mc Graw-Hill, Coleção Schaum, p. 183, 1980.

(ELETROBRAS, 1993) - BRASIL. Centrais Elétricas Brasileiras S/A. “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, relatório GTCP/CTST/GCPS, fevereiro, 1993.

(Emanuel, 1981) - EMANUEL, A. E.; LEVITSKY, F. J. - “Induction Watt-hour Meter Performance on Rectifier/Inverter Circuits”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS\100,Nº5, pp. 4422-4427, november 1981.

(Emanuel, 1993) - EMANUEL, A. E. et al. “Voltage Distortion in Distribution Feeders with Nonlinear Loads” IEEE/PES Winter Meeting, Columbus OH, February 1993, Paper 93 WM102-4PWRD.

(Emanuel, 1995) - EMANUEL, A. E. et al. - “Distribution Feeders With Nonlinear Loads in The Northeast U.S.A., Part I - Voltage Distortion Forecast - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 1, january 1995.

(Engel, 1999) ENGEL. Grupo Zug, março 1999. Disponível em: <<http://www.grupozug.com.br/ENGEL/inicio.htm> > Acesso em: 06 ago 2004.

(ESB, 2002) - ESB Medidores Eletrônicos SAGA 1000 - Manual do usuário, São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.esb.com.br/medidores/pdf/MANUALSAGA1000-PV.3.2.pdf>> . Acesso em 20/11/2003.

(Filipski, 1992) - FILIPSKI, P. S.; LABAJ, P. W. - “Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Nº 4, pp 1793-1799, october 1992.

(Gama, 1998) - GAMA, P. H. R. P. - “A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica”. 1998. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.

(Girgis, 1990) - Girgis, A. A. et al. “Testing The Performance of Three-Phase Induction Watt-Hour Meters in the Presence of Harmonic Distortion”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, nº 4, July/August, 1990.

(Guimarães, 2001) - GUIMARÃES, C. A. M.; BERNARDES, D. F.; CABRAL, S. L. S.; ARANGO H.; DELGADO A. C.; ABREU, J. P. G. - “Performance of Electrical Power Meters with Distorted Signals: Induction, Amper-Hour and Numerical Meters”, 2001.

(IEC, 1990) - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC/ENV 61000-2-2: 1990-05: “Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low voltage power supply systems” (second edition under way - RDIS).

(IEEE, 1992) - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE Std. 519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, april 1993.

(IEEE, 1995a) - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE Std. 1159, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” - 1995.

(IEEE, 1995b) - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE Working Group on Non-Sinusoidal Situations, “Practical Definitions for Power in Systems with Non-Sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”, Paper nº. 95 WM 040-6-pwrd, IEEE PES, Winter Meeting, New York, NY, february 1995.

(Iglesias, 2002) - IGLESIAS, J. G., BARTAK G., “Power Quality in European Electricity Supply Networks - 1st edition - Eurelectric - Union of the Electricity Industry, fevereiro 2002.

(Ignatowicz, 2003) - IGNATOWICZ, E., BRAZ, R. “Medição de harmônicas de tensão em consumidores de baixa tensão”, Revista Eletricidade Moderna, pág 45, nº 355, outubro, 2003.

(Keulenaer, 2004) - KEULENAER, H. D. “Pesquisa sobre Distúrbios da Energia e Suas Soluções em Países da Europa” - Instituto Europeu do Cobre - Revista Eletricidade Moderna, páginas 84 e 85, janeiro, 2004.

(MAE, 2000) - MERCADO ATACADISTA DE ENERGIA “Sistema de Medição para Faturamento de Energia - Especificação Técnica”, p. 5/16, Operador Nacional do Sistema Elétrico, novembro, 2003.

(Medeiros Filho, 1997) - MEDEIROS FILHO, S. de - “Medição de Energia Elétrica”, 4^a edição, 483 págs, editora LTC, 1997.

(Moreno, 2001) - MORENO, H., “Harmônicas nas Instalações Elétricas - Causas, Efeitos e Soluções”, Instituto Brasileiro do Cobre, Novembro/2001.

(Oleskovicz, 2004) - OLESKOVICZ, M. - “Qualidade da Energia - Fundamentos Básicos”, EESC - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo -USP, págs 51 a 55, 2004.

(Pileggi, 1995) - Pileggi, D. J. et al. “Distribution Feeders With Nonlinear Loads in The Northeast U.S.A., Part II - Economic Evaluation of Harmonic Effects - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 1, january 1995.

(Ribeiro, 2001) - RIBEIRO, P. F., CARPINELLI, G. - IEEE Std 519 Revision: “The Need for Probabilistic Limits of Harmonics”, Calvin College, U.S.A., University of Cassino, Italy, 2001.

(Rodriguez, 2000) - RODRIGUEZ, J. W. A., “Proposição de um Protocolo de Aferição de Medidores de Energia Elétrica Submetidos a Sinais Distorcidos”, UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, setembro, 2000.

(Saied, 1995) - SAIED, M. M. “On the Accuracy of Watthour Meter in Non-sinusoidal Environment”, IEEE Transmission and Distribution Conference, pp 2219-2225, 1995.

(Schonek, 2001) - SCHONEK, J. “The singularities of the third harmonic”, Cahier Technique nº 202, Collection Technique, Schneider Electric, fevereiro, 2001.

(Shallenberger, 1888) - SHALLENBERGER, O.B., “The Energy of Alternating Currents”, The Electrical World, March 3, p.114, 1888.

(Stanley, 1888) - STANLEY, W. “Phenomena of Retardation in Induction Coil”, AIEE, Vol. V, No.4, p.97-108, janeiro, 1888.

(Siqueira, 1999) - SIQUEIRA, L.; MAIA, P. A.; OLIVEIRA, M. - “Efeitos das Distorções Harmônicas nas Medições de Energia Elétrica”, Universidade de Brasília, Companhia Energética de Brasília, III Seminário sobre Qualidade da Energia Elétrica, Brasília, agosto, 1999.

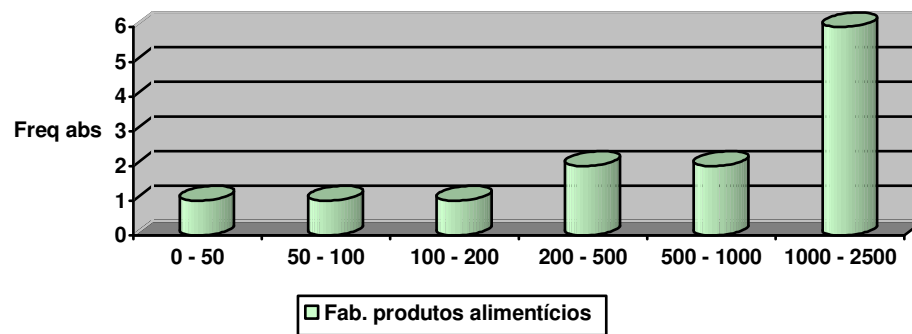
(Teixeira, 2005) - TEIXEIRA, W. S - “Qualidade da Energia”, apostila de treinamento avançado, NTT - Núcleo de Transferência de Tecnologia, Rio de Janeiro, RJ, 2005;

(Yildirim, 1999) - YILDIRIM, D. , FUCHS, E.F., “Commentary on Various Formulations of Distortion Power D”, IEEE Power Engineering Review, volume 19, number 5, pp. 50-52, May 1999

APÊNDICES

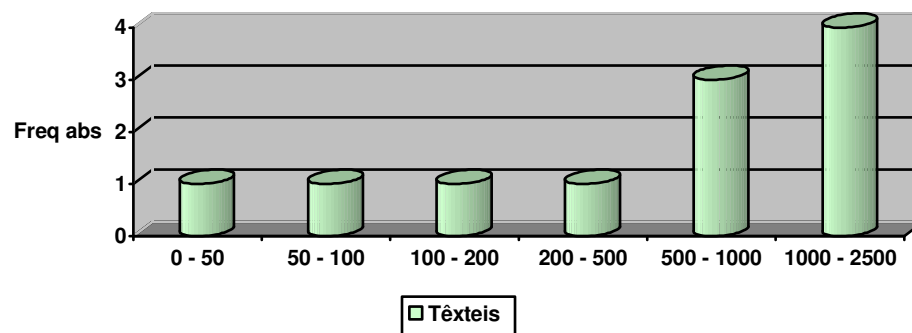
APÊNDICE A

Faixas de potência (kW)



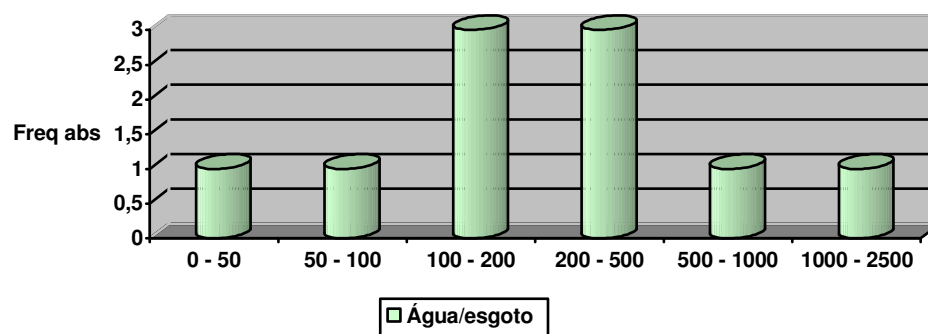
1) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 996,15 \text{ kW}$

Faixas de potência (kW)



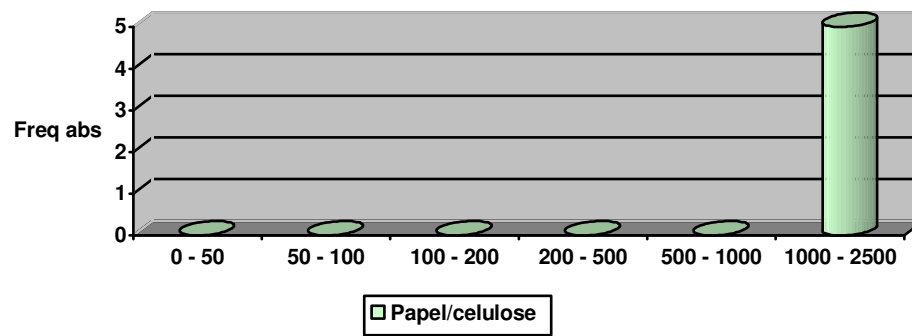
2) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 895,45 \text{ kW}$

Faixas de potência (kW)



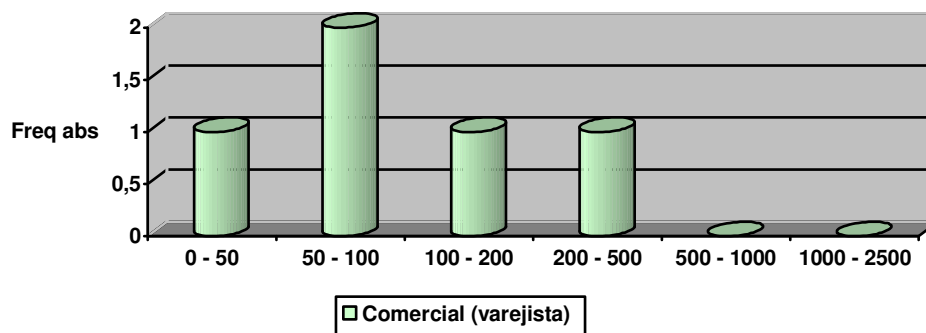
3) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 410,00 \text{ kW}$

Faixas de potência (kW)



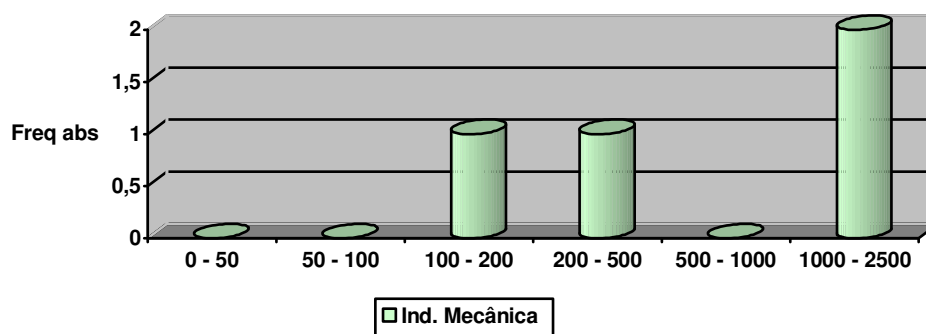
4) Potência_{méd} = 1750,00 kW

Faixas de potência (kW)

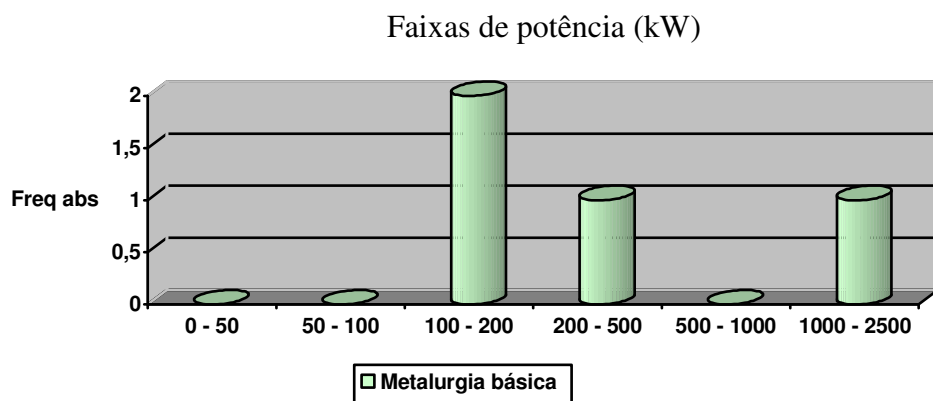


5) Potência_{méd} = 135,00 kW

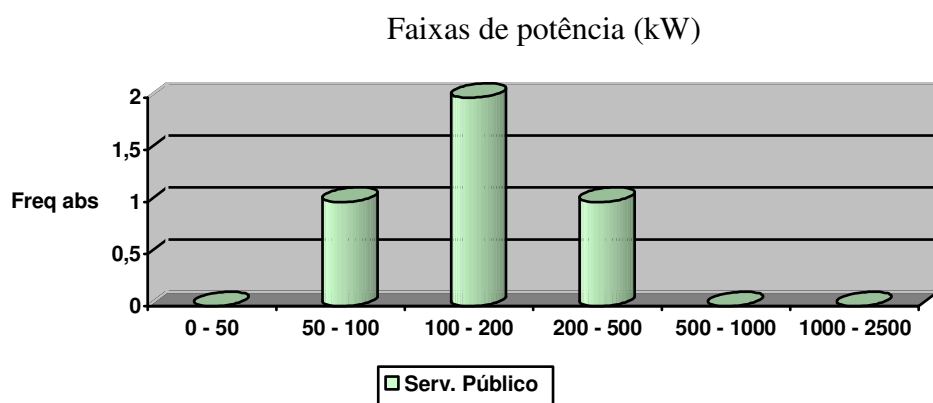
Faixas de potência (kW)



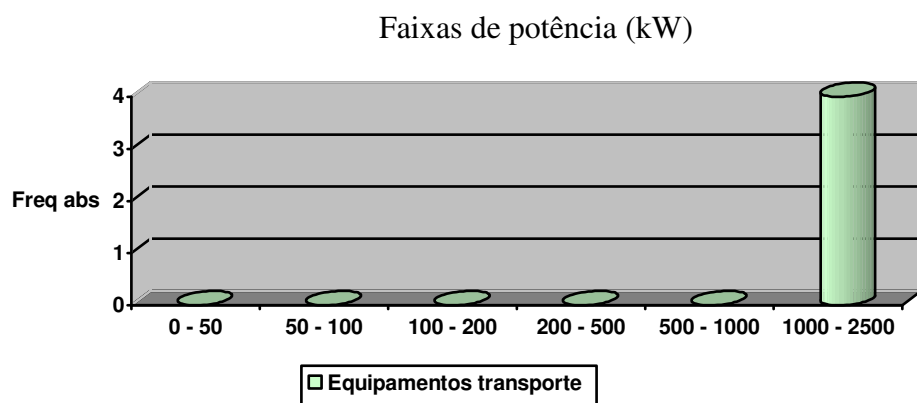
6) Potência_{méd} = 1000,00 kW



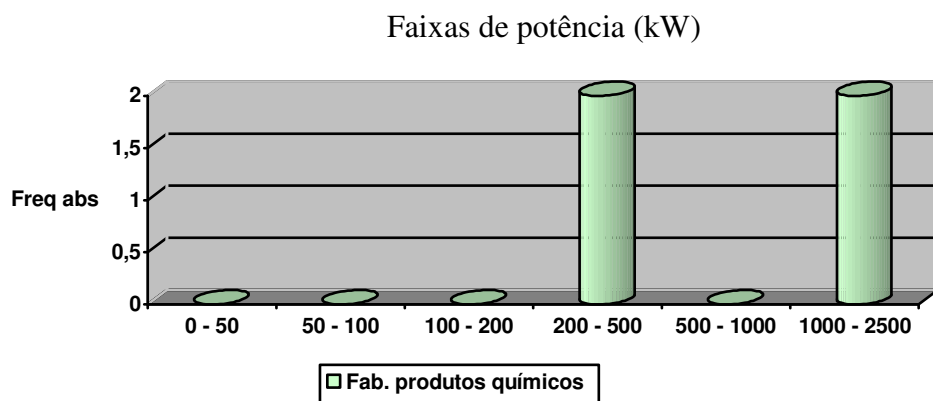
7) Potência_{méd} = 600,00 kW



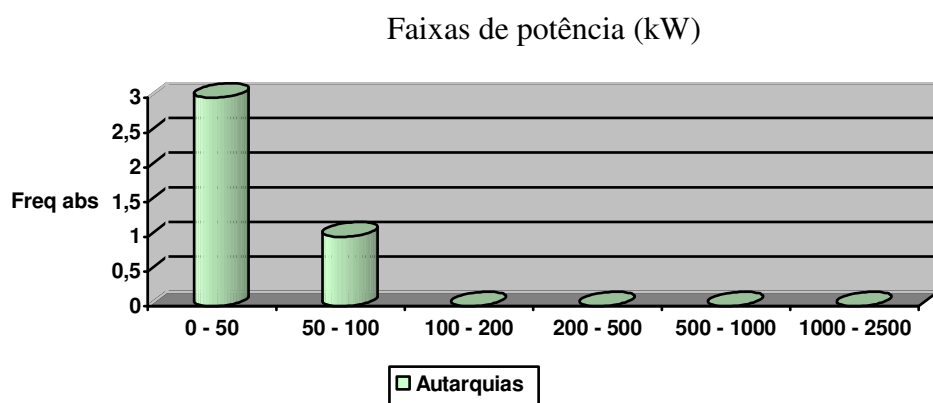
8) Potência_{méd} = 187,50 kW



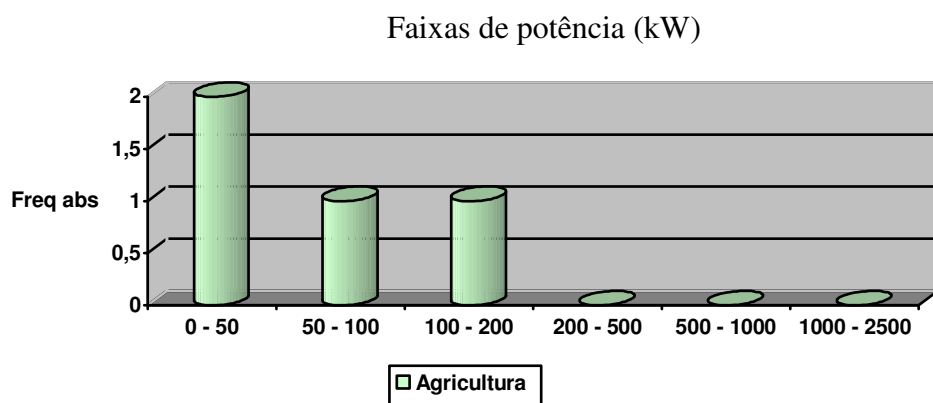
9) Potência_{méd} = 1750,00 kW



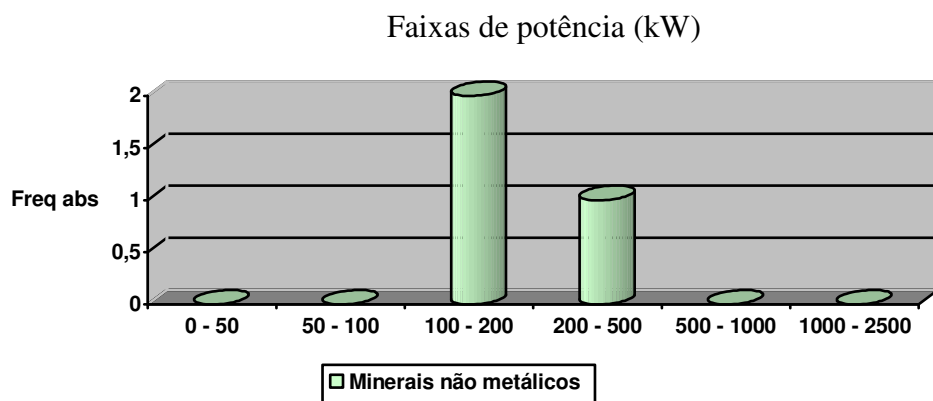
10) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 1050,00 \text{ kW}$



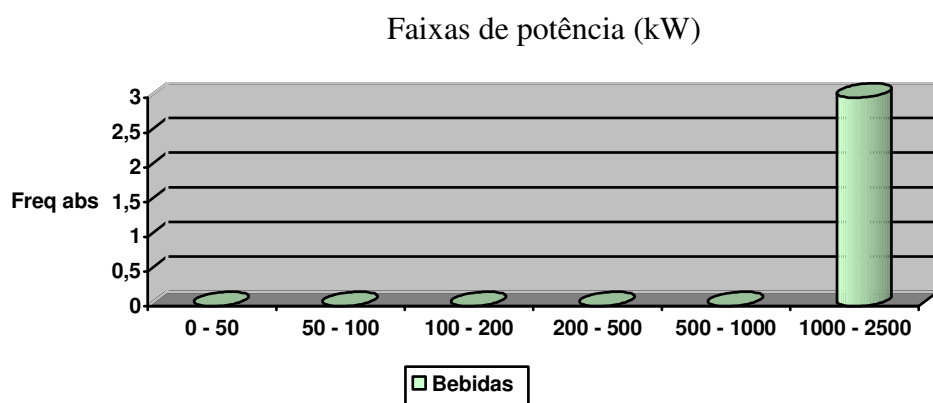
11) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 37,50 \text{ kW}$



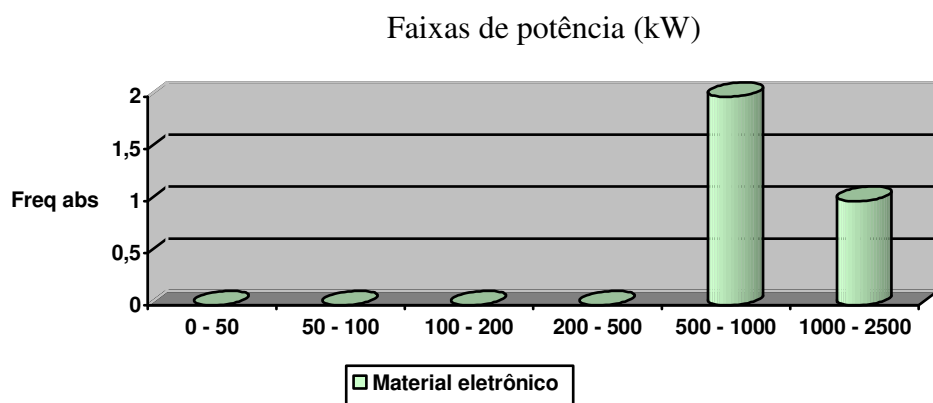
12) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 68,75 \text{ kW}$



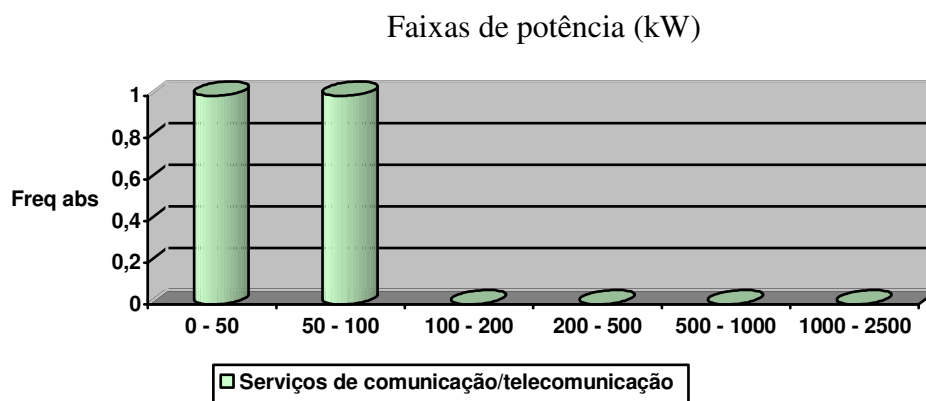
13) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 216,67 \text{ kW}$



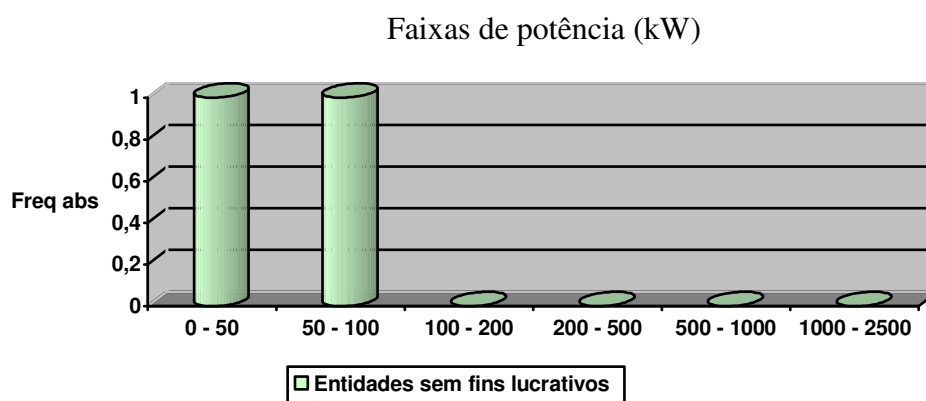
14) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 1750,00 \text{ kW}$



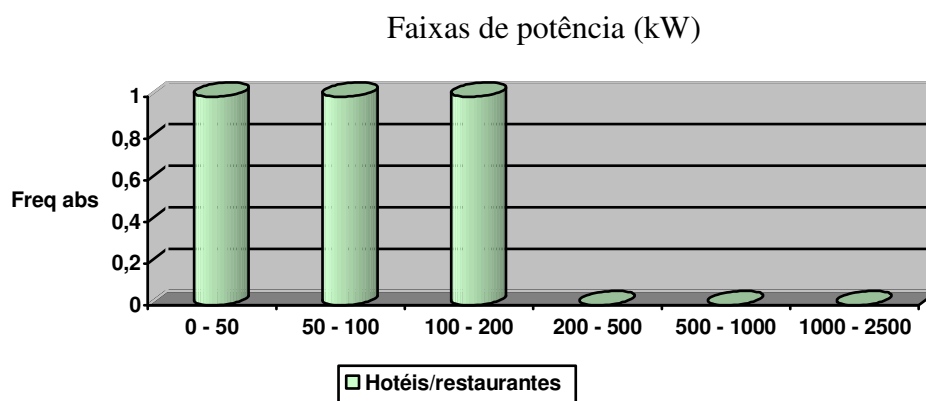
15) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 1083,33 \text{ kW}$



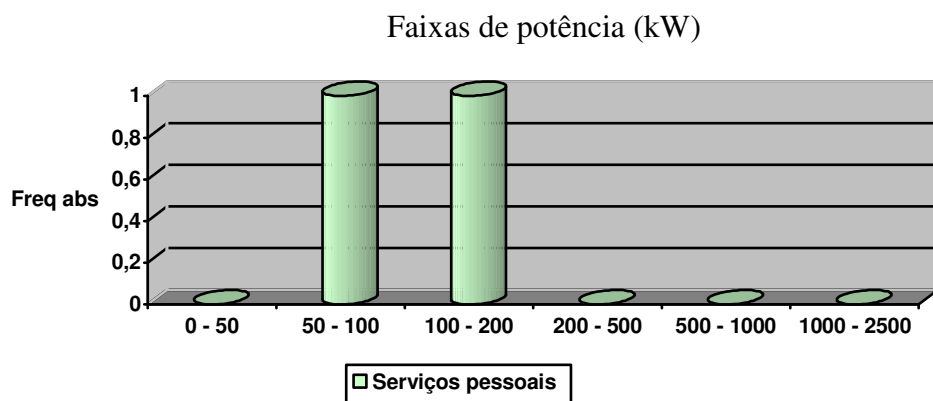
16) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 50,00 \text{ kW}$



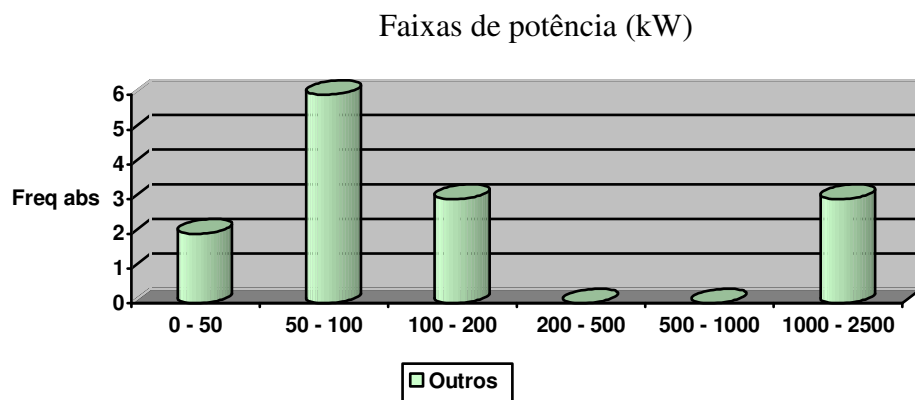
17) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 50,00 \text{ kW}$



18) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 83,33 \text{ kW}$



19) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 112,50 \text{ kW}$



20) $\text{Potência}_{\text{méd}} = 442,86 \text{ kW}$

APÊNDICE B

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	688.108	711.591	R\$ 62.894,95	R\$ 65.041,31
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	951.157	952.109	R\$ 86.938,31	R\$ 87.025,34
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	2.927.279	3.159.502	R\$ 267.561,10	R\$ 288.786,94
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	35.015	37.793	R\$ 3.200,50	R\$ 3.454,40
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	848.221	915.511	R\$ 77.529,66	R\$ 83.680,15
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	941.924	1.016.647	R\$ 86.094,35	R\$ 92.924,28
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.398.420	1.509.357	R\$ 127.819,29	R\$ 137.959,30
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	2.630.064	2.838.709	R\$ 240.394,84	R\$ 259.465,56
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 952.432,99	R\$ 1.018.337,27

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	784.753	811.534	R\$ 55.865,50	R\$ 57.771,97
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.084.747	1.085.833	R\$ 77.221,65	R\$ 77.298,95
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	3.338.415	3.603.254	R\$ 237.657,14	R\$ 256.510,68
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	39.933	43.101	R\$ 2.842,80	R\$ 3.068,32
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	967.354	1.044.094	R\$ 68.864,56	R\$ 74.327,64
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.074.217	1.159.435	R\$ 76.472,02	R\$ 82.538,60
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.594.828	1.721.347	R\$ 113.533,57	R\$ 122.540,28
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	2.999.456	3.237.405	R\$ 213.527,12	R\$ 230.466,40
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 845.984,35	R\$ 904.522,84

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	899.386	930.079	R\$ 48.443,00	R\$ 50.096,18
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.243.202	1.244.447	R\$ 66.961,71	R\$ 67.028,73
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	3.826.075	4.129.601	R\$ 206.081,15	R\$ 222.429,74
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	45.767	49.397	R\$ 2.465,09	R\$ 2.660,65
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.108.660	1.196.611	R\$ 59.714,96	R\$ 64.452,20
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.231.134	1.328.800	R\$ 66.311,67	R\$ 71.572,22
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.827.793	1.972.793	R\$ 98.449,09	R\$ 106.259,14
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	3.437.603	3.710.310	R\$ 185.157,13	R\$ 199.845,80
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 733.583,80	R\$ 784.344,66

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	1.040.281	1.075.782	R\$ 40.410,89	R\$ 41.789,96
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.437.958	1.439.397	R\$ 55.859,10	R\$ 55.915,01
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	4.425.454	4.776.529	R\$ 171.911,79	R\$ 185.549,69
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	52.936	57.136	R\$ 2.056,37	R\$ 2.219,50
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.282.339	1.384.068	R\$ 49.813,90	R\$ 53.765,68
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.423.999	1.536.965	R\$ 55.316,84	R\$ 59.705,17
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	2.114.128	2.281.844	R\$ 82.125,70	R\$ 88.640,80
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	3.976.125	4.291.554	R\$ 154.457,09	R\$ 166.710,29
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 611.951,67	R\$ 654.296,10

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	1.223.268	1.265.014	R\$ 31.446,56	R\$ 32.519,71
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.690.897	1.692.590	R\$ 43.467,90	R\$ 43.511,41
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	5.203.901	5.616.730	R\$ 133.776,67	R\$ 144.389,28
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	62.248	67.186	R\$ 1.600,20	R\$ 1.727,15
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.507.905	1.627.528	R\$ 38.763,70	R\$ 41.838,86
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.674.483	1.807.321	R\$ 43.045,93	R\$ 46.460,79
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	2.486.007	2.683.224	R\$ 63.907,79	R\$ 68.977,65
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	4.675.533	5.046.447	R\$ 120.193,93	R\$ 129.729,02
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 476.202,69	R\$ 509.153,87

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	1.480.291	1.530.808	R\$ 20.892,31	R\$ 21.605,28
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	2.046.174	2.048.223	R\$ 28.878,98	R\$ 28.907,89
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	6.297.301	6.796.871	R\$ 88.877,88	R\$ 95.928,63
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	75.327	81.302	R\$ 1.063,13	R\$ 1.147,47
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.824.733	1.969.491	R\$ 25.753,64	R\$ 27.796,69
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	2.026.311	2.187.060	R\$ 28.598,64	R\$ 30.867,39
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	3.008.347	3.247.001	R\$ 42.458,74	R\$ 45.827,03
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	5.657.917	6.106.765	R\$ 79.853,85	R\$ 86.188,72
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 316.377,17	R\$ 338.269,12

CONFIGURAÇÃO A

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948764	1.894.472	1.959.123	R\$ 7.214,99	R\$ 7.461,21
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	2.618.688	2.621.309	R\$ 9.973,13	R\$ 9.983,11
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	8.059.265	8.698.613	R\$ 30.693,26	R\$ 33.128,19
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	96.403	104.051	R\$ 367,15	R\$ 396,27
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	2.335.287	2.520.548	R\$ 8.893,81	R\$ 9.599,37
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	2.593.266	2.798.992	R\$ 9.876,31	R\$ 10.659,81
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	3.850.072	4.155.502	R\$ 14.662,79	R\$ 15.826,00
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	7.240.985	7.815.418	R\$ 27.576,89	R\$ 29.764,58
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.854.589			R\$ 109.258,32	R\$ 116.818,53

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	688.108	711.591	R\$ 62.894,95	R\$ 65.041,31
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	951.157	983.617	R\$ 86.938,31	R\$ 89.905,18
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	2.927.279	3.027.176	R\$ 267.561,10	R\$ 276.691,93
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	35.015	36.210	R\$ 3.200,50	R\$ 3.309,72
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	848.221	877.167	R\$ 77.529,66	R\$ 80.175,45
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	941.924	974.068	R\$ 86.094,35	R\$ 89.032,42
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	1.398.420	1.446.142	R\$ 127.819,29	R\$ 132.181,27
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	2.630.064	2.719.818	R\$ 240.394,84	R\$ 248.598,59
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 952.432,99	R\$ 984.935,88

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	784.753	811.534	R\$ 55.865,50	R\$ 57.771,97
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	1.084.747	1.121.766	R\$ 77.221,65	R\$ 79.856,93
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	3.338.415	3.452.342	R\$ 237.657,14	R\$ 245.767,47
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	39.933	41.296	R\$ 2.842,80	R\$ 2.939,81
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	967.354	1.000.366	R\$ 68.864,56	R\$ 71.214,64
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	1.074.217	1.110.876	R\$ 76.472,02	R\$ 79.081,71
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	1.594.828	1.649.253	R\$ 113.533,57	R\$ 117.408,04
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	2.999.456	3.101.816	R\$ 213.527,12	R\$ 220.813,98
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 845.984,35	R\$ 874.854,55

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	899.458	930.079	R\$ 48.446,85	R\$ 50.096,18
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	1.243.301	1.285.628	R\$ 66.967,02	R\$ 69.246,85
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	3.826.379	3.956.644	R\$ 206.097,52	R\$ 213.113,91
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	45.770	47.328	R\$ 2.465,29	R\$ 2.549,22
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	1.108.748	1.146.494	R\$ 59.719,70	R\$ 61.752,81
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	1.231.231	1.273.147	R\$ 66.316,93	R\$ 68.574,63
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	1.827.938	1.890.168	R\$ 98.456,91	R\$ 101.808,78
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	3.437.876	3.554.915	R\$ 185.171,84	R\$ 191.475,83
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 733.642,06	R\$ 758.618,20

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	1.040.281	1.075.782	R\$ 40.410,89	R\$ 41.789,96
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	1.437.958	1.487.030	R\$ 55.859,10	R\$ 57.765,35
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	4.425.454	4.576.478	R\$ 171.911,79	R\$ 177.778,48
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	52.936	54.743	R\$ 2.056,37	R\$ 2.126,54
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	1.282.339	1.326.100	R\$ 49.813,90	R\$ 51.513,86
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	1.423.999	1.472.594	R\$ 55.316,84	R\$ 57.204,59
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	2.114.128	2.186.275	R\$ 82.125,70	R\$ 84.928,34
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	3.976.125	4.111.815	R\$ 154.457,09	R\$ 159.728,11
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 611.951,67	R\$ 632.835,23

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	1.223.268	1.265.014	R\$ 31.446,56	R\$ 32.519,71
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	1.690.897	1.748.601	R\$ 43.467,90	R\$ 44.951,29
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	5.203.901	5.381.490	R\$ 133.776,67	R\$ 138.341,96
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	62.248	64.372	R\$ 1.600,20	R\$ 1.654,81
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	1.507.905	1.559.364	R\$ 38.763,70	R\$ 40.086,56
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	1.674.483	1.731.626	R\$ 43.045,93	R\$ 44.514,92
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	2.486.007	2.570.845	R\$ 63.907,79	R\$ 66.088,72
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	4.675.533	4.835.091	R\$ 120.193,93	R\$ 124.295,69
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 476.202,69	R\$ 492.453,66

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	1.480.291	1.530.808	R\$ 20.892,31	R\$ 21.605,28
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	2.046.174	2.116.003	R\$ 28.878,98	R\$ 29.864,51
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	6.297.301	6.512.203	R\$ 88.877,88	R\$ 91.910,94
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	75.327	77.897	R\$ 1.063,13	R\$ 1.099,42
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	1.824.733	1.887.004	R\$ 25.753,64	R\$ 26.632,51
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	2.026.311	2.095.461	R\$ 28.598,64	R\$ 29.574,60
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	3.008.347	3.111.010	R\$ 42.458,74	R\$ 43.907,69
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	5.657.917	5.851.000	R\$ 79.853,85	R\$ 82.578,95
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 316.377,17	R\$ 327.173,91

CONFIGURAÇÃO B

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-3,30%	948.764	1.894.472	1.959.123	R\$ 7.214,99	R\$ 7.461,21
W	W1 e W2	724	1.268.178	-3,30%	1.311.456	2.618.688	2.708.053	R\$ 9.973,13	R\$ 10.313,47
X	X1	2.888	3.902.941	-3,30%	4.036.133	8.059.265	8.334.297	R\$ 30.693,26	R\$ 31.740,71
	X2	6	46.686	-3,30%	48.279	96.403	99.693	R\$ 367,15	R\$ 379,67
	X3	261	1.130.933	-3,30%	1.169.527	2.335.287	2.414.982	R\$ 8.893,81	R\$ 9.197,32
	X4	519	1.255.867	-3,30%	1.298.725	2.593.266	2.681.765	R\$ 9.876,31	R\$ 10.213,35
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-3,30%	1.928.142	3.850.072	3.981.460	R\$ 14.662,79	R\$ 15.163,17
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-3,30%	3.626.333	7.240.985	7.488.092	R\$ 27.576,89	R\$ 28.517,98
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.367.360			R\$ 109.258,32	R\$ 112.986,89

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	688.108	688.797	R\$ 62.894,95	R\$ 62.957,91
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	951.157	952.109	R\$ 86.938,31	R\$ 87.025,34
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	2.927.279	2.930.209	R\$ 267.561,10	R\$ 267.828,93
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	35.015	35.050	R\$ 3.200,50	R\$ 3.203,70
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	848.221	849.070	R\$ 77.529,66	R\$ 77.607,26
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	941.924	942.867	R\$ 86.094,35	R\$ 86.180,53
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	1.398.420	1.399.820	R\$ 127.819,29	R\$ 127.947,24
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	2.630.064	2.632.696	R\$ 240.394,84	R\$ 240.635,48
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 952.432,99	R\$ 953.386,38

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	784.753	785.539	R\$ 55.865,50	R\$ 55.921,42
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.084.747	1.085.833	R\$ 77.221,65	R\$ 77.298,95
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	3.338.415	3.341.757	R\$ 237.657,14	R\$ 237.895,04
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	39.933	39.973	R\$ 2.842,80	R\$ 2.845,64
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	967.354	968.322	R\$ 68.864,56	R\$ 68.933,49
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	1.074.217	1.075.292	R\$ 76.472,02	R\$ 76.548,56
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	1.594.828	1.596.424	R\$ 113.533,57	R\$ 113.647,22
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	2.999.456	3.002.458	R\$ 213.527,12	R\$ 213.740,86
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 845.984,35	R\$ 846.831,18

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	899.386	900.287	R\$ 48.443,00	R\$ 48.491,49
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.243.202	1.244.447	R\$ 66.961,71	R\$ 67.028,73
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	3.826.075	3.829.905	R\$ 206.081,15	R\$ 206.287,44
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	45.767	45.812	R\$ 2.465,09	R\$ 2.467,56
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	1.108.660	1.109.770	R\$ 59.714,96	R\$ 59.774,74
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	1.231.134	1.232.366	R\$ 66.311,67	R\$ 66.378,04
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	1.827.793	1.829.622	R\$ 98.449,09	R\$ 98.547,64
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	3.437.603	3.441.044	R\$ 185.157,13	R\$ 185.342,47
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 733.583,80	R\$ 734.318,12

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	1.040.281	1.041.322	R\$ 40.410,89	R\$ 40.451,34
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.437.958	1.439.397	R\$ 55.859,10	R\$ 55.915,01
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	4.425.454	4.429.884	R\$ 171.911,79	R\$ 172.083,88
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	52.936	52.989	R\$ 2.056,37	R\$ 2.058,42
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	1.282.339	1.283.622	R\$ 49.813,90	R\$ 49.863,77
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	1.423.999	1.425.424	R\$ 55.316,84	R\$ 55.372,21
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	2.114.128	2.116.244	R\$ 82.125,70	R\$ 82.207,91
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	3.976.125	3.980.105	R\$ 154.457,09	R\$ 154.611,70
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 611.951,67	R\$ 612.564,23

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	1.223.268	1.224.493	R\$ 31.446,56	R\$ 31.478,04
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	1.690.897	1.692.590	R\$ 43.467,90	R\$ 43.511,41
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	5.203.901	5.209.110	R\$ 133.776,67	R\$ 133.910,58
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	62.248	62.310	R\$ 1.600,20	R\$ 1.601,80
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	1.507.905	1.509.414	R\$ 38.763,70	R\$ 38.802,51
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	1.674.483	1.676.159	R\$ 43.045,93	R\$ 43.089,01
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	2.486.007	2.488.496	R\$ 63.907,79	R\$ 63.971,76
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	4.675.533	4.680.214	R\$ 120.193,93	R\$ 120.314,25
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 476.202,69	R\$ 476.679,37

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	1.480.291	1.481.773	R\$ 20.892,31	R\$ 20.913,22
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	2.046.174	2.048.223	R\$ 28.878,98	R\$ 28.907,89
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	6.297.301	6.303.604	R\$ 88.877,88	R\$ 88.966,85
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	75.327	75.402	R\$ 1.063,13	R\$ 1.064,20
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	1.824.733	1.826.560	R\$ 25.753,64	R\$ 25.779,42
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	2.026.311	2.028.339	R\$ 28.598,64	R\$ 28.627,26
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	3.008.347	3.011.358	R\$ 42.458,74	R\$ 42.501,24
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	5.657.917	5.663.581	R\$ 79.853,85	R\$ 79.933,78
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 316.377,17	R\$ 316.693,87

CONFIGURAÇÃO C

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-0,10%	918.373	1.894.472	1.896.369	R\$ 7.214,99	R\$ 7.222,21
W	W1 e W2	724	1.268.178	-0,10%	1.269.447	2.618.688	2.621.309	R\$ 9.973,13	R\$ 9.983,11
X	X1	2.888	3.902.941	-0,10%	3.906.848	8.059.265	8.067.333	R\$ 30.693,26	R\$ 30.723,99
	X2	6	46.686	-0,10%	46.733	96.403	96.499	R\$ 367,15	R\$ 367,51
	X3	261	1.130.933	-0,10%	1.132.065	2.335.287	2.337.625	R\$ 8.893,81	R\$ 8.902,72
	X4	519	1.255.867	-0,10%	1.257.124	2.593.266	2.595.862	R\$ 9.876,31	R\$ 9.886,20
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-0,10%	1.866.379	3.850.072	3.853.926	R\$ 14.662,79	R\$ 14.677,46
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-0,10%	3.510.174	7.240.985	7.248.233	R\$ 27.576,89	R\$ 27.604,49
Totais		11474	13.893.237	Totais	13.907.144			R\$ 109.258,32	R\$ 109.367,69

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	688.108	742.697	R\$ 62.894,95	R\$ 67.884,45
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	951.157	1.026.613	R\$ 86.938,31	R\$ 93.835,20
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	2.927.279	3.159.502	R\$ 267.561,10	R\$ 288.786,94
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	35.015	37.793	R\$ 3.200,50	R\$ 3.454,40
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	848.221	915.511	R\$ 77.529,66	R\$ 83.680,15
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	941.924	1.016.647	R\$ 86.094,35	R\$ 92.924,28
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.398.420	1.509.357	R\$ 127.819,29	R\$ 137.959,30
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	2.630.064	2.838.709	R\$ 240.394,84	R\$ 259.465,56
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 952.432,99	R\$ 1.027.990,28

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	784.753	847.008	R\$ 55.865,50	R\$ 60.297,35
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	1.084.747	1.170.801	R\$ 77.221,65	R\$ 83.347,71
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	3.338.415	3.603.254	R\$ 237.657,14	R\$ 256.510,68
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	39.933	43.101	R\$ 2.842,80	R\$ 3.068,32
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	967.354	1.044.094	R\$ 68.864,56	R\$ 74.327,64
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.074.217	1.159.435	R\$ 76.472,02	R\$ 82.538,60
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.594.828	1.721.347	R\$ 113.533,57	R\$ 122.540,28
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	2.999.456	3.237.405	R\$ 213.527,12	R\$ 230.466,40
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 845.984,35	R\$ 913.096,98

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	899.386	970.735	R\$ 48.443,00	R\$ 52.286,03
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	1.243.202	1.341.826	R\$ 66.961,71	R\$ 72.273,83
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	3.826.075	4.129.601	R\$ 206.081,15	R\$ 222.429,74
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	45.767	49.397	R\$ 2.465,09	R\$ 2.660,65
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.108.660	1.196.611	R\$ 59.714,96	R\$ 64.452,20
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.231.134	1.328.800	R\$ 66.311,67	R\$ 71.572,22
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	1.827.793	1.972.793	R\$ 98.449,09	R\$ 106.259,14
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	3.437.603	3.710.310	R\$ 185.157,13	R\$ 199.845,80
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 733.583,80	R\$ 791.779,60

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	1.040.281	1.122.807	R\$ 40.410,89	R\$ 43.616,72
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	1.437.958	1.552.032	R\$ 55.859,10	R\$ 60.290,44
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	4.425.454	4.776.529	R\$ 171.911,79	R\$ 185.549,69
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	52.936	57.136	R\$ 2.056,37	R\$ 2.219,50
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.282.339	1.384.068	R\$ 49.813,90	R\$ 53.765,68
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.423.999	1.536.965	R\$ 55.316,84	R\$ 59.705,17
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	2.114.128	2.281.844	R\$ 82.125,70	R\$ 88.640,80
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	3.976.125	4.291.554	R\$ 154.457,09	R\$ 166.710,29
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 611.951,67	R\$ 660.498,30

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	1.223.268	1.320.311	R\$ 31.446,56	R\$ 33.941,24
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	1.690.897	1.825.037	R\$ 43.467,90	R\$ 46.916,24
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	5.203.901	5.616.730	R\$ 133.776,67	R\$ 144.389,28
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	62.248	67.186	R\$ 1.600,20	R\$ 1.727,15
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.507.905	1.627.528	R\$ 38.763,70	R\$ 41.838,86
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	1.674.483	1.807.321	R\$ 43.045,93	R\$ 46.460,79
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	2.486.007	2.683.224	R\$ 63.907,79	R\$ 68.977,65
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	4.675.533	5.046.447	R\$ 120.193,93	R\$ 129.729,02
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 476.202,69	R\$ 513.980,23

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	1.480.291	1.597.724	R\$ 20.892,31	R\$ 22.549,71
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	2.046.174	2.208.499	R\$ 28.878,98	R\$ 31.169,98
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	6.297.301	6.796.871	R\$ 88.877,88	R\$ 95.928,63
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	75.327	81.302	R\$ 1.063,13	R\$ 1.147,47
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	1.824.733	1.969.491	R\$ 25.753,64	R\$ 27.796,69
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	2.026.311	2.187.060	R\$ 28.598,64	R\$ 30.867,39
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	3.008.347	3.247.001	R\$ 42.458,74	R\$ 45.827,03
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	5.657.917	6.106.765	R\$ 79.853,85	R\$ 86.188,72
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 316.377,17	R\$ 341.475,63

CONFIGURAÇÃO D

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-7,35%	990.237	1.894.472	2.044.762	R\$ 7.214,99	R\$ 7.787,36
W	W1 e W2	724	1.268.178	-7,35%	1.368.784	2.618.688	2.826.430	R\$ 9.973,13	R\$ 10.764,30
X	X1	2.888	3.902.941	-7,35%	4.212.564	8.059.265	8.698.613	R\$ 30.693,26	R\$ 33.128,19
	X2	6	46.686	-7,35%	50.390	96.403	104.051	R\$ 367,15	R\$ 396,27
	X3	261	1.130.933	-7,35%	1.220.651	2.335.287	2.520.548	R\$ 8.893,81	R\$ 9.599,37
	X4	519	1.255.867	-7,35%	1.355.496	2.593.266	2.798.992	R\$ 9.876,31	R\$ 10.659,81
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-7,35%	2.012.426	3.850.072	4.155.502	R\$ 14.662,79	R\$ 15.826,00
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-7,35%	3.784.851	7.240.985	7.815.418	R\$ 27.576,89	R\$ 29.764,58
Totais		11474	13.893.237	Totais	14.995.399			R\$ 109.258,32	R\$ 117.925,88

APÊNDICE C

CENÁRIO 1

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	688.108	756.246	R\$ 62.894,95	R\$ 69.122,92
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	951.157	1.045.343	R\$ 86.938,31	R\$ 95.547,11
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	2.927.279	3.217.144	R\$ 267.561,10	R\$ 294.055,50
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	35.015	38.483	R\$ 3.200,50	R\$ 3.517,42
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	848.221	932.213	R\$ 77.529,66	R\$ 85.206,79
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	941.924	1.035.195	R\$ 86.094,35	R\$ 94.619,57
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	1.398.420	1.536.894	R\$ 127.819,29	R\$ 140.476,20
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	2.630.064	2.890.498	R\$ 240.394,84	R\$ 264.199,19
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 952.432,99	R\$ 1.046.744,69

CENÁRIO 1

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	784.753	862.461	R\$ 55.865,50	R\$ 61.397,40
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	1.084.747	1.192.161	R\$ 77.221,65	R\$ 84.868,29
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	3.338.415	3.668.991	R\$ 237.657,14	R\$ 261.190,40
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	39.933	43.888	R\$ 2.842,80	R\$ 3.124,29
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	967.354	1.063.143	R\$ 68.864,56	R\$ 75.683,65
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	1.074.217	1.180.588	R\$ 76.472,02	R\$ 84.044,42
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	1.594.828	1.752.750	R\$ 113.533,57	R\$ 124.775,88
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	2.999.456	3.296.468	R\$ 213.527,12	R\$ 234.670,97
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 845.984,35	R\$ 929.755,30

CENÁRIO 1

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	899.386	988.445	R\$ 48.443,00	R\$ 53.239,92
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	1.243.202	1.366.306	R\$ 66.961,71	R\$ 73.592,38
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	3.826.075	4.204.940	R\$ 206.081,15	R\$ 226.487,69
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	45.767	50.298	R\$ 2.465,09	R\$ 2.709,19
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	1.108.660	1.218.442	R\$ 59.714,96	R\$ 65.628,05
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	1.231.134	1.353.043	R\$ 66.311,67	R\$ 72.877,97
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	1.827.793	2.008.784	R\$ 98.449,09	R\$ 108.197,70
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	3.437.603	3.778.000	R\$ 185.157,13	R\$ 203.491,74
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 733.583,80	R\$ 806.224,64

CENÁRIO 1

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	1.040.281	1.143.292	R\$ 40.410,89	R\$ 44.412,46
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	1.437.958	1.580.347	R\$ 55.859,10	R\$ 61.390,37
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	4.425.454	4.863.671	R\$ 171.911,79	R\$ 188.934,82
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	52.936	58.178	R\$ 2.056,37	R\$ 2.259,99
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	1.282.339	1.409.318	R\$ 49.813,90	R\$ 54.746,57
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	1.423.999	1.565.005	R\$ 55.316,84	R\$ 60.794,41
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	2.114.128	2.323.473	R\$ 82.125,70	R\$ 90.257,94
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	3.976.125	4.369.848	R\$ 154.457,09	R\$ 169.751,71
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 611.951,67	R\$ 672.548,27

CENÁRIO 1

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	1.223.268	1.344.399	R\$ 31.446,56	R\$ 34.560,46
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	1.690.897	1.858.333	R\$ 43.467,90	R\$ 47.772,17
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	5.203.901	5.719.200	R\$ 133.776,67	R\$ 147.023,49
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	62.248	68.412	R\$ 1.600,20	R\$ 1.758,66
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	1.507.905	1.657.220	R\$ 38.763,70	R\$ 42.602,16
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	1.674.483	1.840.293	R\$ 43.045,93	R\$ 47.308,41
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	2.486.007	2.732.176	R\$ 63.907,79	R\$ 70.236,06
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	4.675.533	5.138.513	R\$ 120.193,93	R\$ 132.095,76
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 476.202,69	R\$ 523.357,17

CENÁRIO 1

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	1.480.291	1.626.873	R\$ 20.892,31	R\$ 22.961,11
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	2.046.174	2.248.790	R\$ 28.878,98	R\$ 31.738,64
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	6.297.301	6.920.871	R\$ 88.877,88	R\$ 97.678,73
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	75.327	82.786	R\$ 1.063,13	R\$ 1.168,41
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	1.824.733	2.005.421	R\$ 25.753,64	R\$ 28.303,81
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	2.026.311	2.226.960	R\$ 28.598,64	R\$ 31.430,53
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	3.008.347	3.306.239	R\$ 42.458,74	R\$ 46.663,08
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	5.657.917	6.218.175	R\$ 79.853,85	R\$ 87.761,13
Totais		11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 316.377,17	R\$ 347.705,43

CENÁRIO 1

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-9,01%	1.008.303	1.894.472	2.082.066	R\$ 7.214,99	R\$ 7.929,43
W	W1 e W2	724	1.268.178	-9,01%	1.393.755	2.618.688	2.877.995	R\$ 9.973,13	R\$ 10.960,68
X	X1	2.888	3.902.941	-9,01%	4.289.418	8.059.265	8.857.309	R\$ 30.693,26	R\$ 33.732,57
	X2	6	46.686	-9,01%	51.309	96.403	105.949	R\$ 367,15	R\$ 403,50
	X3	261	1.130.933	-9,01%	1.242.920	2.335.287	2.566.532	R\$ 8.893,81	R\$ 9.774,49
	X4	519	1.255.867	-9,01%	1.380.225	2.593.266	2.850.056	R\$ 9.876,31	R\$ 10.854,28
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-9,01%	2.049.141	3.850.072	4.231.314	R\$ 14.662,79	R\$ 16.114,72
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-9,01%	3.853.900	7.240.985	7.958.000	R\$ 27.576,89	R\$ 30.307,60
	Totais	11474	13.893.237	Totais	15.268.971			R\$ 109.258,32	R\$ 120.077,29

CENÁRIO 2

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	688.108	801.244	R\$ 62.894,95	R\$ 73.235,85
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	951.157	1.107.542	R\$ 86.938,31	R\$ 101.232,31
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	2.927.279	3.408.569	R\$ 267.561,10	R\$ 311.552,28
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	35.015	40.772	R\$ 3.200,50	R\$ 3.726,71
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	848.221	987.682	R\$ 77.529,66	R\$ 90.276,73
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	941.924	1.096.791	R\$ 86.094,35	R\$ 100.249,59
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	1.398.420	1.628.342	R\$ 127.819,29	R\$ 148.834,76
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	2.630.064	3.062.487	R\$ 240.394,84	R\$ 279.919,47
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 952.432,99	R\$ 1.109.027,71

CENÁRIO 2

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	784.753	913.779	R\$ 55.865,50	R\$ 65.050,65
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	1.084.747	1.263.096	R\$ 77.221,65	R\$ 89.918,09
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	3.338.415	3.887.302	R\$ 237.657,14	R\$ 276.731,65
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	39.933	46.499	R\$ 2.842,80	R\$ 3.310,19
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	967.354	1.126.401	R\$ 68.864,56	R\$ 80.186,96
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	1.074.217	1.250.835	R\$ 76.472,02	R\$ 89.045,20
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	1.594.828	1.857.042	R\$ 113.533,57	R\$ 132.200,25
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	2.999.456	3.492.613	R\$ 213.527,12	R\$ 248.634,28
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 845.984,35	R\$ 985.077,26

CENÁRIO 2

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	899.386	1.047.259	R\$ 48.443,00	R\$ 56.407,78
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	1.243.202	1.447.604	R\$ 66.961,71	R\$ 77.971,24
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	3.826.075	4.455.141	R\$ 206.081,15	R\$ 239.964,08
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	45.767	53.291	R\$ 2.465,09	R\$ 2.870,39
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	1.108.660	1.290.941	R\$ 59.714,96	R\$ 69.533,03
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	1.231.134	1.433.551	R\$ 66.311,67	R\$ 77.214,33
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	1.827.793	2.128.310	R\$ 98.449,09	R\$ 114.635,64
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	3.437.603	4.002.798	R\$ 185.157,13	R\$ 215.599,83
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 733.583,80	R\$ 854.196,32

CENÁRIO 2

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	1.040.281	1.211.319	R\$ 40.410,89	R\$ 47.055,07
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	1.437.958	1.674.380	R\$ 55.859,10	R\$ 65.043,19
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	4.425.454	5.153.068	R\$ 171.911,79	R\$ 200.176,75
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	52.936	61.640	R\$ 2.056,37	R\$ 2.394,46
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	1.282.339	1.493.175	R\$ 49.813,90	R\$ 58.004,08
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	1.423.999	1.658.126	R\$ 55.316,84	R\$ 64.411,78
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	2.114.128	2.461.723	R\$ 82.125,70	R\$ 95.628,44
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	3.976.125	4.629.862	R\$ 154.457,09	R\$ 179.852,22
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 611.951,67	R\$ 712.565,99

CENÁRIO 2

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	1.223.268	1.424.393	R\$ 31.446,56	R\$ 36.616,86
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	1.690.897	1.968.907	R\$ 43.467,90	R\$ 50.614,69
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	5.203.901	6.059.502	R\$ 133.776,67	R\$ 155.771,62
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	62.248	72.482	R\$ 1.600,20	R\$ 1.863,30
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	1.507.905	1.755.827	R\$ 38.763,70	R\$ 45.137,06
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	1.674.483	1.949.793	R\$ 43.045,93	R\$ 50.123,34
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	2.486.007	2.894.745	R\$ 63.907,79	R\$ 74.415,22
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	4.675.533	5.444.263	R\$ 120.193,93	R\$ 139.955,68
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 476.202,69	R\$ 554.497,77

CENÁRIO 2

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	1.480.291	1.723.674	R\$ 20.892,31	R\$ 24.327,33
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	2.046.174	2.382.597	R\$ 28.878,98	R\$ 33.627,14
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	6.297.301	7.332.674	R\$ 88.877,88	R\$ 103.490,78
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	75.327	87.712	R\$ 1.063,13	R\$ 1.237,93
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	1.824.733	2.124.747	R\$ 25.753,64	R\$ 29.987,93
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	2.026.311	2.359.468	R\$ 28.598,64	R\$ 33.300,70
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	3.008.347	3.502.965	R\$ 42.458,74	R\$ 49.439,61
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	5.657.917	6.588.166	R\$ 79.853,85	R\$ 92.983,06
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 316.377,17	R\$ 368.394,47

CENÁRIO 2

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-14,12%	1.068.299	1.894.472	2.205.953	R\$ 7.214,99	R\$ 8.401,25
W	W1 e W2	724	1.268.178	-14,12%	1.476.686	2.618.688	3.049.240	R\$ 9.973,13	R\$ 11.612,86
X	X1	2.888	3.902.941	-14,12%	4.544.645	8.059.265	9.384.333	R\$ 30.693,26	R\$ 35.739,71
	X2	6	46.686	-14,12%	54.362	96.403	112.253	R\$ 367,15	R\$ 427,51
	X3	261	1.130.933	-14,12%	1.316.876	2.335.287	2.719.245	R\$ 8.893,81	R\$ 10.356,09
	X4	519	1.255.867	-14,12%	1.462.351	2.593.266	3.019.639	R\$ 9.876,31	R\$ 11.500,13
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-14,12%	2.171.068	3.850.072	4.483.084	R\$ 14.662,79	R\$ 17.073,58
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-14,12%	4.083.214	7.240.985	8.431.514	R\$ 27.576,89	R\$ 32.110,95
Totais		11474	13.893.237	Totais	16.177.500			R\$ 109.258,32	R\$ 127.222,08

CENÁRIO 3

F.P. = 0,60

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	688.108	880.159	R\$ 62.894,95	R\$ 80.448,90
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	951.157	1.216.625	R\$ 86.938,31	R\$ 111.202,75
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	2.927.279	3.744.281	R\$ 267.561,10	R\$ 342.237,27
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	35.015	44.788	R\$ 3.200,50	R\$ 4.093,76
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	848.221	1.084.959	R\$ 77.529,66	R\$ 99.168,15
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	941.924	1.204.814	R\$ 86.094,35	R\$ 110.123,24
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	1.398.420	1.788.718	R\$ 127.819,29	R\$ 163.493,59
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	2.630.064	3.364.113	R\$ 240.394,84	R\$ 307.488,92
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 952.432,99	R\$ 1.218.256,58

CENÁRIO 3

F.P. = 0,65

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	784.753	1.003.777	R\$ 55.865,50	R\$ 71.457,53
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	1.084.747	1.387.500	R\$ 77.221,65	R\$ 98.774,18
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	3.338.415	4.270.165	R\$ 237.657,14	R\$ 303.987,14
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	39.933	51.079	R\$ 2.842,80	R\$ 3.636,22
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	967.354	1.237.341	R\$ 68.864,56	R\$ 88.084,62
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	1.074.217	1.374.030	R\$ 76.472,02	R\$ 97.815,32
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	1.594.828	2.039.943	R\$ 113.533,57	R\$ 145.220,74
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	2.999.456	3.836.603	R\$ 213.527,12	R\$ 273.122,43
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 845.984,35	R\$ 1.082.098,17

CENÁRIO 3

F.P. = 0,70

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	899.386	1.150.405	R\$ 48.443,00	R\$ 61.963,42
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	1.243.202	1.590.179	R\$ 66.961,71	R\$ 85.650,68
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	3.826.075	4.893.931	R\$ 206.081,15	R\$ 263.598,30
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	45.767	58.540	R\$ 2.465,09	R\$ 3.153,10
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	1.108.660	1.418.086	R\$ 59.714,96	R\$ 76.381,38
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	1.231.134	1.574.742	R\$ 66.311,67	R\$ 84.819,22
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	1.827.793	2.337.929	R\$ 98.449,09	R\$ 125.926,18
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	3.437.603	4.397.036	R\$ 185.157,13	R\$ 236.834,40
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 733.583,80	R\$ 938.326,68

CENÁRIO 3

F.P. = 0,75

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	1.040.281	1.330.623	R\$ 40.410,89	R\$ 51.689,55
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	1.437.958	1.839.291	R\$ 55.859,10	R\$ 71.449,34
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	4.425.454	5.660.597	R\$ 171.911,79	R\$ 219.892,29
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	52.936	67.711	R\$ 2.056,37	R\$ 2.630,30
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	1.282.339	1.640.239	R\$ 49.813,90	R\$ 63.716,94
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	1.423.999	1.821.436	R\$ 55.316,84	R\$ 70.755,74
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	2.114.128	2.704.180	R\$ 82.125,70	R\$ 105.046,95
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	3.976.125	5.085.860	R\$ 154.457,09	R\$ 197.565,98
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 611.951,67	R\$ 782.747,08

CENÁRIO 3

F.P. = 0,80

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	1.223.268	1.564.682	R\$ 31.446,56	R\$ 40.223,28
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	1.690.897	2.162.826	R\$ 43.467,90	R\$ 55.599,76
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	5.203.901	6.656.307	R\$ 133.776,67	R\$ 171.113,67
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	62.248	79.621	R\$ 1.600,20	R\$ 2.046,82
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	1.507.905	1.928.760	R\$ 38.763,70	R\$ 49.582,64
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	1.674.483	2.141.830	R\$ 43.045,93	R\$ 55.060,02
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	2.486.007	3.179.851	R\$ 63.907,79	R\$ 81.744,43
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	4.675.533	5.980.472	R\$ 120.193,93	R\$ 153.740,00
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 476.202,69	R\$ 609.110,62

CENÁRIO 3

F.P. = 0,85

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	1.480.291	1.893.440	R\$ 20.892,31	R\$ 26.723,34
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	2.046.174	2.617.261	R\$ 28.878,98	R\$ 36.939,09
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	6.297.301	8.054.874	R\$ 88.877,88	R\$ 113.683,65
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	75.327	96.350	R\$ 1.063,13	R\$ 1.359,86
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	1.824.733	2.334.015	R\$ 25.753,64	R\$ 32.941,46
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	2.026.311	2.591.853	R\$ 28.598,64	R\$ 36.580,50
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	3.008.347	3.847.975	R\$ 42.458,74	R\$ 54.308,95
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	5.657.917	7.237.039	R\$ 79.853,85	R\$ 102.141,02
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 316.377,17	R\$ 404.677,89

CENÁRIO 3

F.P. = 0,90

Fabricante	Modelo	Qde	Energia (kVArh) original	Erro (kVArh)	Energia (kVArh) corrigida	Energia (kWh) original	Energia (kWh) corrigida	FER original	FER corrigido
Diversos 1	Eletromec.	3.537	917.455	-21,82%	1.173.516	1.894.472	2.423.218	R\$ 7.214,99	R\$ 9.228,69
W	W1 e W2	724	1.268.178	-21,82%	1.622.126	2.618.688	3.349.562	R\$ 9.973,13	R\$ 12.756,62
X	X1	2.888	3.902.941	-21,82%	4.992.250	8.059.265	10.308.602	R\$ 30.693,26	R\$ 39.259,74
	X2	6	46.686	-21,82%	59.716	96.403	123.309	R\$ 367,15	R\$ 469,62
	X3	261	1.130.933	-21,82%	1.446.576	2.335.287	2.987.065	R\$ 8.893,81	R\$ 11.376,07
	X4	519	1.255.867	-21,82%	1.606.379	2.593.266	3.317.046	R\$ 9.876,31	R\$ 12.632,78
T	T1 e T2	1.141	1.864.513	-21,82%	2.384.898	3.850.072	4.924.626	R\$ 14.662,79	R\$ 18.755,16
Diversos 2	Eletrônicos	2.398	3.506.664	-21,82%	4.485.372	7.240.985	9.261.940	R\$ 27.576,89	R\$ 35.273,58
Totais		11474	13.893.237	Totais	17.770.833			R\$ 109.258,32	R\$ 139.752,27

ANEXOS

ANEXO A

Distribuição de amostras dos pontos de monitoração do subgrupo A4 – Faixas de potência

ordem	ramo de atividade	total	Distribuição das amostras por faixa de potência (kW)					
		amostras	0-50	51-100	101-200	201-500	501-1000	1000-2500
1	Fabricação de produtos alimentícios	13	1	1	1	2	2	6
2	Fabricação de produtos têxteis	11	1	1	1	1	3	4
3	Água, esgoto e saneamento	10	1	1	3	3	1	1
4	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	5	0	0	0	0	0	5
5	Comercial (varejista)	5	1	2	1	1	0	0
6	Indústria mecânica	4	0	0	1	1	0	2
7	Metalurgia básica	4	0	0	2	1	0	1
8	Serviço público	4	0	1	2	1	0	0
9	Fabricação de equipamentos de transportes	4	0	0	0	0	0	4
10	Fabricação de produtos químicos	4	0	0	0	2	0	2
11	Autarquias	4	3	1	0	0	0	0
12	Agricultura/criação animal	4	2	1	1	0	0	0
13	Fabricação de produtos de minerais não metálicos	3	0	0	2	1	0	0
14	Fabricação de bebidas	3	0	0	0	0	0	3
15	Fabricação de material eletrônico/aparelhos de comunicação	3	0	0	0	0	2	1
16	Serviços de comunicação e telecomunicação	2	1	1	0	0	0	0
17	Entidades sem fins lucrativos	2	1	1	0	0	0	0
18	Hotéis e restaurantes	3	1	1	1	0	0	0
19	Serviços pessoais	2	0	1	1	0	0	0
20	Outros	14	2	6	3	0	0	3
Total		104	14	18	19	13	8	32

ANEXO B

Tabela - Probabilidades de valores P(95%) de Distorção Harmônica Total de corrente por consumidor e ramo de atividade

Ramo de Atividade	Consumidor	P(95%) [%]		Probabilidades por Grupo					
		Fase 1	Fase 3	P(95%) Min [%]		P(95%) Max [%]		P(95%) Méd [%]	
				Fase 1	Fase 3	Fase 1	Fase 3	Fase 1	Fase 3
Alimentares	A1	14,00	14,70	9,50	7,50	36,80	26,30	17,17	14,58
	A2	36,80	26,30						
	A3	11,50	9,80						
	A4	21,70	21,70						
	A5	9,50	7,50						
	A6	9,50	7,50						
Têxteis	B1	5,50	3,80	4,30	3,30	24,40	22,40	8,26	6,41
	B2	4,60	3,40						
	B3	7,10	5,30						
	B4	4,30	3,70						
	B5	8,40	5,70						
	B6	6,70	3,70						
	B7	5,10	3,30						
	B8	24,40	22,40						
Trat de Água	C1a	6,40	4,60	2,40	3,90	60,50	60,50	24,46	20,40
	C1.b	2,40	19,40						
	C1.c	7,70	4,30						
	C1.d	14,40	14,60						
	C1.e	6,40	3,90						
	C1.f	47,40	4,40						
	C1.g	60,50	60,50						
	C2.a	24,40	22,40						
	C2.b	50,50	49,50						
Papel e Papelão	D1	9,80	10,40	9,80	10,40	9,80	10,40	9,80	10,40
Varejista	E1	19,40	25,40	17,40	17,90	61,50	60,50	32,77	34,60
	E2	17,40	17,90						
	E3	61,50	60,50						
Mecânica	F1	67,70	83,80	40,60	35,40	67,70	83,80	49,67	51,73
	F2	40,60	36,00						
	F3	40,70	35,40						
Metalúrgico	G1	28,40	32,80	9,70	10,40	45,40	44,40	28,92	28,14
	G2	45,40	37,40						
	G3	16,70	15,70						
	G4	44,40	44,40						
	G5	9,70	10,40						
Públicos	H1	9,80	10,40	9,80	10,40	9,80	10,40	9,80	10,40
Material de Transporte	I1	7,70	7,40	7,30	5,70	40,70	40,40	22,53	22,30
	I2	40,70	35,70						
	I3	34,40	40,40						
	I4	7,30	5,70						

**Tabela - Probabilidades de valores P(95%) de Distorção Harmônica Total
de corrente por consumidor e ramo de atividade**

Ramo de Atividade	Consumidor	P(95%) [%]		Probabilidades por Grupo					
		Fase 1	Fase 3	P(95%) Min [%]		P(95%) Max [%]		P(95%) Méd [%]	
				Fase 1	Fase 3	Fase 1	Fase 3	Fase 1	Fase 3
Químico	J1	9,80	10,40	8,40	3,70	23,70	16,80	16,33	11,90
	J2	8,40	3,70						
	J3	23,40	16,80						
	J4	23,70	16,70						
Autarquia	K1	9,40	7,40	9,40	7,40	9,70	16,70	9,48	9,73
	K2	9,40	7,40						
	K3	9,40	7,40						
	K4	9,70	16,70						
Agricultura	L1	40,60	35,80	19,50	25,50	40,60	35,80	30,05	30,65
	L2	19,50	25,50						
Ind não Metálicos	M1	10,80	11,40	10,80	11,40	99,80	94,70	55,30	53,05
	M2	99,80	94,70						
Bebida	N1	19,40	25,40	19,40	25,40	19,40	25,40	19,40	25,40
Eletrônico	O1	5,40	4,40	5,40	4,40	5,40	5,60	5,40	5,00
	O2	5,40	5,60						
Telecomunicações	P1	34,40	36,40	25,90	25,90	34,40	36,40	30,15	31,15
	P2	25,90	25,90						
Serviços não Lucrativos	Q1	20,70	18,40	9,40	9,40	20,70	18,40	16,93	12,27
	Q2	20,70	18,40						
	Q3	9,40	9,40						
Restaurantes e Hotéis	R1	23,70	16,80	7,30	7,30	23,70	16,80	18,23	12,27
	R2	23,70	16,70						
	R3	7,30	7,30						
Serviços Pessoais	S1	15,70	18,70	15,70	18,70	15,70	18,70	15,70	18,70
Outros	T1	82,00	83,00	82,00	83,00	82,00	83,00	82,00	83,00
	T2	11,70	18,40	11,70	18,40	11,70	18,40	11,70	18,40
	T3	34,30	36,40	12,90	8,80	34,30	36,40	23,60	22,60
	T4	12,90	8,80						
	T5	47,80	33,80	47,80	33,80	47,80	33,80	47,80	33,80
	T6	28,40	32,40	28,40	32,40	28,40	32,40	28,40	32,40
	T7	9,70	10,30	9,70	10,30	9,70	10,30	9,70	10,30