

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DE CASO : DIAGNÓSTICO DO CONSUMO E DA
QUALIDADE DE ENERGIA NUMA INDÚSTRIA
METALÚRGICA**

Antonio Carlos de Carvalho

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira / FEIS / UNESP
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Prof. Dr. José Carlos Rossi
Orientador

ILHA SOLTEIRA
Agosto - 2004

Estudo de Caso: Diagnóstico do Consumo e da Qualidade de Energia numa Indústria Metalúrgica

Antonio Carlos de Carvalho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA


A. Carvalho.

Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Carlos Rossi - orientador


Prof. Dr. Antonio Carlos Delaiba


Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Ilha Solteira-SP, agosto de 2004.

PRIMEIRAMENTE A DEUS, pela força e entusiasmo de viver.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos Rossi, por sua dedicação, disposição, capacidade de transmitir e atenção dedicada a mim.

A minha esposa Maria e meus filhos Giovane, Rodolfo e Henrique, por não terem medido esforços, dedicação e compreensão nas horas difíceis, e por me proporcionarem alegrias e forças para continuar a caminhar e sorrir.

A meus pais Ataíde e Maria, por não terem medido sacrifícios ao me darem educação.

Aos meus irmãos Ione, Diná, Júnior e Tânia, por estarmos sempre unidos.

Aos professores Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira e Dr. Carlos Alberto Canesin, pelo apoio e contribuição oferecida à realização de meu trabalho.

A Companhia Transmissão Energia Elétrica Paulista (CTEEP) e em especial ao meu amigo e Engenheiro Roberto Rodrigues pelo apoio e compressão.

Aos meus colegas Rogério Matarucco, Fausto Donizeti Dantas, pelo apoio e cooperação durante a coleta de dados e material didático.

Aos meus amigos da subestação de São José do Rio Preto e Votuporanga pelo apoio e incentivo.

À empresa Equipamentos Rodoviários Rodrigues Ltda, em especial ao Engenheiro Walter Madri, por seu apoio na coleta de dados e informações sobre o funcionamento da empresa.

Ao funcionário da Elektro Donizete Paiva pelo apoio dado para coleta dos dados.

E finalmente, aos colegas de pós-graduação, professores e funcionários da UNESP – Campus de Ilha Solteira.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a proposição de um estudo de caso realizado em uma planta industrial, cuja linha de produção se concentra na área da metalurgia. O principal enfoque foi direcionado na avaliação e nos efeitos causados pelas correntes distorcidas, geradas por cargas não lineares, nos barramentos e alimentadores da indústria. Com o objetivo de avaliar o impacto das cargas elétricas, com características não lineares, as instaladas e a serem instaladas no sistema elétrico da indústria.

Foi realizada também uma avaliação geral da planta da indústria através da análise das faturas de energia elétrica buscando identificar nos principais indicadores, os desvios no sistema elétrico da planta. Entre estes, podemos destacar a demanda, o consumo, os reativos excedentes e outros.

Todos os procedimentos desenvolvidos neste trabalho foram direcionados no sentido de se usar racionalmente a energia elétrica e controlar o seu desperdício.

ABSTRACT

This work aims to study a case carried out in an industrial plant, whose production line is concentrated on the metallurgy field. The main objective was addressed in the evaluation and in the effects caused by the distortion of the currents, due to non-linear loads connected at the industry busbar and feeders. With the objective of evaluating the impact of the electric loads, with non-linear characteristics, or installed in the industry electric system.

It was also accomplished a general evaluation of the industry plant by analyzing the electric power invoices looking for identifying, in the main quality power indicators, the deviations in the electric plant system. Among these, we can mention the demand, the consumption, the exceeding reactives and others.

All the procedures developed in this work were addressed aiming to use the electric power rationally and to control its waste.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
1.2 OBJETIVO.....	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
CAPÍTULO II SISTEMA TARIFÁRIO E LEGISLAÇÕES PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 ESTRUTURA TARIFÁRIA.....	23
2.2.1 Definições.....	24
2.2.2 Tensões de Fornecimento.....	25
2.2.3 Classes de Consumidores.....	26
2.2.4 Modalidades Tarifárias.....	26
2.2.4.1 Tarifa Convencional.....	27
2.2.4.2 Tarifa Horo-Sazonal Azul.....	27
2.2.4.3 Tarifa Horo-Sazonal Verde.....	28
2.2.4.4 Faturamento de Ultrapassagem de Demanda.....	29
2.3 REGULAMENTAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	30
2.3.1 Aspectos Gerais da Legislação.....	30
2.3.2 Cálculo do Consumo da Energia Reativa Excedente e da Demanda de Potência Reativa Excedente.....	31
2.3.3 Faturamento do Consumo de Energia Reativa Excedente e da Demanda de Potência Reativa Excedente.....	33
2.4 FATOR DE CARGA – FC.....	34
2.5 RECUPERAÇÃO DE ICMS.....	35
CAPÍTULO III ANÁLISE SUCINTA SOBRE A INFLUÊNCIA DOS DISTÚRBIOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS EM PLANTAS INDUSTRIAIS.....	37
3.1 INTRODUÇÃO.....	37
3.2 NÍVEIS DE TENSÃO NOMINAL.....	37
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS E PROCEDIMENTOS PARA	

AVALIAÇÕES	38
3.4 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS.....	39
3.4.1 Nos Sistemas Elétricos de Potência.....	39
3.4.2 Nos Dispositivos Pertencentes ao Sistema Elétrico.....	39
3.4.3 Influência das Harmônicas nos Cabos de Alimentação.....	40
3.4.4 Distribuição Seqüencial das Correntes Harmônicas em Sistemas Elétricos Trifásicos.....	44
3.5 ÍNDICES DE CONFORMIDADE.....	45
3.5.1 Limites de Distorção da Tensão.....	47
3.5.2 Limites de Distorção de Corrente.....	48
3.6 POTÊNCIA MÉDIA (ATIVA).....	49
3.7 FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS COM SINAIS DISTORCIDOS.....	49
CAPÍTULO IV ANÁLISE INICIAL DA PLANTA INDUSTRIAL.....	52
4.1 INTRODUÇÃO.....	52
4.2 PROGRAMA PARA AVALIAÇÃO DE FATURAS “ACTEE”.....	52
4.2.1 Estrutura do Programa.....	52
4.3 APLICAÇÃO DO PROGRAMA NA PLANTA DA INDÚSTRIA METALÚRGICA....	53
4.4 VALORES RECUPERADOS PELO ICMS.....	57
4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES PARCIAIS.....	58
CAPÍTULO V RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA PLANTA INDUSTRIAL	59
5.1 INTRODUÇÃO.....	59
5.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	59
5.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	61
5.3.1 Lado da Alta Tensão – Medição no Alimentador de Entrada.....	61
5.3.1.1 Tensões de Linha.....	61
5.3.1.2 Correntes de Linha.....	63
5.3.1.3 Potências: Ativa – Reativa – Aparente.....	66
5.3.1.4 Fator de Potência.....	67
5.3.2 Lado da Baixa Tensão – Medição das Tensões e Correntes nos Alimentadores.....	67
5.3.3 Lado da Baixa Tensão – Medição das Tensões e Correntes nos Neutros dos Alimentadores.....	93
5.4 RESULTADOS GERAIS DAS MEDIÇÕES NA PLANTA INDUSTRIAL.....	105
5.4.1 Distorções Harmônicas Totais de Correntes e Tensões das Fases.....	105
5.4.2 Distorções Harmônicas Totais de Correntes e Tensões Fases A / Neutros dos Alimentadores.....	107
5.4.2.1 Plena Carga.....	107

5.4.2.2	Carga Reduzida.....	108
CAPÍTULO VI	SUGESTÕES E PROCEDIMENTOS.....	109
6.1	INTRODUÇÃO.....	109
6.2	ANÁLISE SETORIAL E SUGESTÕES.....	109
6.2.1	Demanda Contratada.....	109
6.2.2	Energia Reativa Excedente.....	109
6.2.3	Transformador do Setor Fabril.....	110
6.2.4	Sistema de Iluminação.....	110
6.2.5	Recuperação do ICMS.....	112
6.2.6	Equipamentos.....	112
6.2.6.1	Motores.....	112
6.2.6.2	Máquinas de Solda.....	113
6.3	CONCLUSÃO PARCIAL.....	113
CAPÍTULO VII	CONCLUSÕES GERAIS.....	114
REFERÊNCIAS		116
APÊNDICE A		118
A.1	O PROGRAMA “ACTEE”.....	118
A.2	SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA “ACTEE”.....	118
A.3	VALORES FATURADOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO PERÍODO 2001/2002.....	120
APÊNDICE B		122
B.1	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação das Demandas e Definições.....	25
Tabela 2	Limites de Tensão de Fornecimento.....	25
Tabela 3	Classes de Consumidores.....	26
Tabela 4	Opções Tarifárias para o Grupo A.....	27
Tabela 5	Tensão Nominal Superior a 1 kV e Inferior a 230 kV.....	37
Tabela 6	Fatores de Correção Aplicáveis a Circuitos Trifásicos a 4 Condutores onde é Prevista a Presença de Correntes Harmônicas de 3ª ordem.....	43
Tabela 7	Distribuição Sequencial dos Componentes Harmônicos.....	45
Tabela 8	Limites de Distorção de Harmônicas da Tensão em % da Tensão na Frequência Fundamental.....	47
Tabela 9	Limites de Distorção das Harmônicas de Corrente (I_h) em % de I_L	48
Tabela 10	Valores das Contas de Energia da Indústria no Período de 12 Meses.....	57
Tabela 11	Tensões Eficazes de Linha.....	61
Tabela 12	Valores Eficazes Máximos e Mínimos das Tensões de Linha.....	61
Tabela 13	Valores Percentuais da Distorção Harmônica Individual das Tensões Eficaz de Linha.....	63
Tabela 14	Valores Máximos e Mínimos das Correntes de Linha.....	63
Tabela 15	Distorção Harmônica Individual e Total das Correntes de Linha.....	65
Tabela 16	Valores Máximos e Mínimos do Fator de Potência.....	67
Tabela 17	Equipamentos Instalados no Alimentador 1.....	75
Tabela 18	Dados Técnicos dos Modelos das Máquinas de Solda Utilizadas.....	78
Tabela 19	Dados Medidos da Máquina Solda.....	79
Tabela 20	Equipamentos Instalados no Alimentador 2.....	82
Tabela 21	Dados Técnicos dos Modelos dos Tornos de Comando Numérico Utilizados.....	83
Tabela 22	Dados Medidos do Torno de Comando Numérico.....	84
Tabela 23	Equipamentos Instalados no Alimentador 3.....	85
Tabela 24	Equipamentos Instalados no Alimentador 4.....	88
Tabela 25	Equipamentos Instalados no Alimentador Iluminação.....	92
Tabela 26	Dados Medições na Entrada do Quadro de Iluminação.....	92

Tabela 27	Levantamento da Situação Atual.....	111
Tabela 28	Situação Proposta.....	111
Tabela A1	Valores das Faturas nos Últimos 24 Meses.....	121
Tabela B1	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão..	122
Tabela B2	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	122
Tabela B3	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	123
Tabela B4	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	123
Tabela B5	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	123
Tabela B6	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	124
Tabela B7	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	124
Tabela B8	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	124
Tabela B9	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	125
Tabela B10	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	125
Tabela B11	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	125
Tabela B12	Distorções Harmônicas das Tensões e Correntes – Baixa Tensão.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfico Fator de Carga Típica.....	34
Figura 2	Relação Entre as Resistências CA e CC em Função da Freqüência, para Condutores de Diferentes Seções.....	42
Figura 3	Efeitos Skin e de Proximidade em Função da Freqüência, para Conductor de Secção Circular 95 mm ²	43
Figura 4	Curva FD x DIHT.....	51
Figura 5	Tela Principal do Programa ACTEE.....	53
Figura 6	Gráfico de Análise do Consumo de Energia Ativa.....	54
Figura 7	Comparação do Gráfico de Análise do Consumo de Energia Ativa com Período Anterior.....	55
Figura 8	Gráfico de Análise da Demanda.....	55
Figura 9	Comparação do Gráfico de Análise da Demanda com o Período Anterior.....	56
Figura 10	Gráfico de Análise do Fator de Potência.....	56
Figura 11	Comparação do Gráfico de Análise do Fator de Potência com o Período Anterior.....	57
Figura 12	Diagrama Unifilar da Indústria Metalúrgica.....	60
Figura 13	Oscilogramas dos Valores Eficazes das Tensões de Linha - Período de 29/11 a 06/12/02.....	62
Figura 14	Formas de Onda e Respectivos Espectros das Tensões de Linha.....	62
Figura 15	Oscilograma dos Valores Eficazes das Correntes de Linha - Período de 29/11 a 06/12/02.....	64
Figura 16	Formas de Onda e Espectros Harmônicos das Correntes I _A e I _B	65
Figura 17	Comportamento das Potências Ativa, Reativa e Aparente Medidas do Lado da Alta Tensão.....	66
Figura 18	Fator de Potência, Lado da Alta Tensão.....	67
Figura 19	Quadro Geral de Distribuição n ^o 1.....	68
Figura 20	Comportamento do Valor Eficaz das Três Correntes de Linha no Barramento 1.....	68
Figura 21	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 1 – Plena Carga.....	69

Figura 22	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 1–Carga Reduzida.....	69
Figura 23	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Barramento 1.....	70
Figura 24	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 1.....	70
Figura 25	Comportamento do Fator de Potência - Fase A Barramento 1.....	71
Figura 26	Quadro de Distribuição n ^o 2.....	71
Figura 27	Comportamento do Valor Eficaz das Três Correntes do Alimentador Barramento 2.....	72
Figura 28	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 2 – Plena Carga.....	72
Figura 29	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 2 –Carga Reduzida.....	73
Figura 30	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Barramento 2.....	73
Figura 31	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Barramento 2.....	74
Figura 32	Comportamento do Fator de Potência – Fase A do Barramento 2.....	74
Figura 33	Comportamento do Valor Eficaz das Correntes do Alimentador 1.....	75
Figura 34	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 1 – Plena Carga.....	76
Figura 35	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 1 –Carga Reduzida.....	76
Figura 36	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Alimentador 1.....	77
Figura 37	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 1.....	77
Figura 38	Comportamento do Fator de Potência do Alimentador 1.....	78
Figura 39	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A da Máquina Solda esm-43.....	79
Figura 40	Comportamento do Valor Eficaz das Correntes do Alimentador 2.....	80

Figura 41	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 2 – Plena Carga.....	81
Figura 42	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 2 –Carga Reduzida.....	81
Figura 43	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Alimentador 2.....	82
Figura 44	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 2.....	82
Figura 45	Comportamento do Fator de Potência do Alimentador 2.....	83
Figura 46	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Torno de Comando Numérico.....	84
Figura 47	Comportamento do Valor Eficaz das Correntes do Alimentador 3.....	85
Figura 48	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 3 – Plena Carga.....	86
Figura 49	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 3 –Carga Reduzida.....	86
Figura 50	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Alimentador 3.....	87
Figura 51	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 3.....	87
Figura 52	Comportamento do Fator de Potência do Alimentador 3.....	88
Figura 53	Comportamento do Valor Eficaz das Correntes do Alimentador 4.....	89
Figura 54	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 4 – Plena Carga.....	89
Figura 55	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 4 –Carga Reduzida.....	90
Figura 56	Comportamento do Valor Eficaz das Três Tensões de Linha no Alimentador 4.....	90
Figura 57	Formas de Onda da Tensão e Espectro Harmônico da Fase A do Alimentador 4.....	91
Figura 58	Comportamento do Fator de Potência do Alimentador 4.....	91
Figura 59	Formas de Onda da Corrente e Espectro Harmônico da Fase A da	

	Iluminação da Indústria.....	92
Figura 60	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do barramento 1.....	93
Figura 61	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do do barramento 1.....	94
Figura 62	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do barramento 1.....	94
Figura 63	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do barramento 1.....	95
Figura 64	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do barramento 2	95
Figura 65	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do barramento 2	96
Figura 66	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do barramento 2.....	96
Figura 67	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do barramento 2.....	97
Figura 68	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 1.....	97
Figura 69	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 1.....	98
Figura 70	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 1.....	98
Figura 71	Forma de Onda da Tensão Fase a / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 1.....	99
Figura 72	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 2	99
Figura 73	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 2.....	100
Figura 74	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 2.....	100
Figura 75	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do	

	Alimentador 2.....	101
Figura 76	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 3.....	101
Figura 77	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 3	102
Figura 78	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 3.....	102
Figura 79	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 3.....	103
Figura 80	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 4.....	103
Figura 81	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 4.....	104
Figura 82	Forma de Onda da Corrente e Espectro Harmônico do Neutro do Alimentador 4.....	104
Figura 83	Forma de Onda da Tensão Fase A / Neutro e Espectro Harmônico do Alimentador 4.....	105
Figura 84	Diagrama Unifilar Entrada Energia com os Valores Medidos na Planta Industrial.....	106
Figura 85	Diagrama Unifilar Entrada Energia com os Valores Medidos no Neutro na Planta Industrial – plena carga.....	107
Figura 86	Diagrama Unifilar Entrada Energia com os Valores Medidos no Neutro na Planta Industrial – carga reduzida.....	108
Figura A1	Tela Principal Programa ACTEE.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACTEE	Análise do Contrato de Tarifação da Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Consumo de energia ativa no ciclo de faturamento
CA(kWh)	Consumo
CA _t	Consumo de energia ativa registrada de hora em hora
CESP	Companhia Energética do Estado de São Paulo
CM	Custo médio
D	Demanda (kW)
DA _t	Demanda ativa registrada, integralização horária
DC (Kw)	Demanda contratada
DF	Demanda faturável no ciclo de faturamento
DF (kW)	Demanda faturada
DTH	Distorção Harmônica Total
DTHT	Distorção Harmônica Total da Tensão
DIHT	Distorção Harmônica Total da Corrente
DMCR	Maior valor de demanda ativa reprimida
DNAEE	Departamento Nacional de Energia Elétrica
DR	Demanda de potência máxima ativa registrada no ciclo de faturamento
DR (kW)	Demanda registrada
EDF	Electricité de France
f	índice que indica o horário fora de ponta;
FC	Fator de carga
FDU	valor em reais relativo ao faturamento da ultrapassagem (R\$)
FDR	Faturamento do excedente de demanda de potência reativa (R\$)
FER	Faturamento do excedente de consumo de energia reativa (R\$)
f _m	Fator de potência mensal
FP	fator de potência (FP)
F _t	Fator de potência horário

h	Ordem harmônica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
I_h	Valor eficaz da componente harmônica individual
I_L	Valor eficaz da corrente eficaz de carga (componente fund.) no PAC
I_{SC}	Corrente de curto-circuito no PAC (ponto de acoplamento comum)
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
p	índice que indica o horário de ponta;
s	Período seco
TC	Tarifa de consumo (R\$ / kWh);
TD	Tarifa de demanda (R\$ / kW);
TFP	Tarifa de Fator de Potência
THV	Tarifa Horo-sazonal Verde
THA	Tarifa Horosazonal azul
TU	Tarifa de ultrapassagem (R\$ / kW).
u	Período úmido
UFDR	Demanda de potência ativa reprimida (kW), corresponde ao excedente de demanda de potência reativa.
UFER	Montante de energia ativa reprimida (kWh), correspondente ao excedente de consumo de energia reativa
VF	Valor da Fatura
VA	Volt Ampère
Var	Volt Ampère reativo
V_h	Valor eficaz da componente harmônica individual
V_n	Valor eficaz da tensão fundamental do sistema

LISTAS DE SÍMBOLOS

θ_n	ângulo da tensão
ϕ_n	ângulo da corrente
C	Capacitância
$\tan(\delta)$	fator de perdas
ω	Frequência angular
Hz	Frequência
α	Deslocamento angular
β	Deslocamento angular

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

Atualmente (2004) no Brasil, a demanda de energia elétrica apresenta um crescimento médio da ordem de 6% ao ano. Este crescimento é muito representativo, em função do baixo crescimento industrial e dos sérios problemas de expansão enfrentados pelo setor elétrico.

A qualidade da energia elétrica tem sido alvo de grande interesse e discussão nos últimos anos, tanto no meio acadêmico quanto nas concessionárias e nos órgãos reguladores. A reformulação do mercado de energia elétrica nacional, vem sofrendo uma importante reestruturação [1]. Os principais órgãos reguladores são:

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), conforme Lei n.9427 de 26/12/96 – principal responsável por toda a regulamentação no Brasil;
- Agências Estaduais – Órgãos estaduais que visam alguma regionalização da regulamentação, tendo como base o ponto de vista da Qualidade de Energia;
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), responsável pela coordenação e controle da operação do sistema eletro-energético a nível de geração e transmissão.
- MAE (Mercado Atacadista de Energia Elétrica), responsável pelas definições das regras do mercado, cálculo do preço “spot” (valor a ser comercializado a energia elétrica no mercado de futuros – bolsa de valores) [1] e contabilização do mercado de diferenças.

A eficiência energética torna-se um elemento de diferenciação, apresentando-se como uma vantagem competitiva importante, tanto para as concessionárias quanto para a maioria das indústrias nacionais.

Tecnologias para a conservação e o uso racional de energia elétrica, estão disponíveis no mercado para os diferentes tipos de consumidores, ou seja, residenciais, comerciais e industriais, conforme ([02], [03] e [04]).

A conservação e o uso racional de energia elétrica desempenham um papel importante dentro do setor industrial, uma vez que, a busca da competitividade dos seus produtos, exigem investimentos em equipamentos e em novas metodologias .

Comprovadamente, os custos dos projetos de conservação de energia elétrica são

menores do que os custos de projetos de expansão, pois estes possuem maior prazo para o retorno dos investimentos.

Com o crescente desenvolvimento da eletrônica de potência, vários dispositivos elétricos e eletrônicos foram agregados ao sistema elétrico de potência, sendo que os mesmos se caracterizam por não apresentarem linearidade nas suas características, ou seja, são denominados de cargas não lineares. Dentre estes equipamentos, os mais utilizados atualmente são: inversores, ciclo-conversores, acionamentos à tiristores e transistores (acionamentos em corrente contínua), ou alternada, retificadores, fornos de indução e a arco elétrico, máquinas de solda a arco e a ponto e os “no-breaks” (fontes ininterruptas de energia elétrica).

Logo, estes equipamentos são os principais responsáveis pela maioria dos distúrbios gerados nos sistemas elétricos. Devido a isto, as plantas industriais têm que lidar com o problema da “energia elétrica poluída”. Esta expressão popular é usada para descrever uma grande variedade de distúrbios tanto nas tensões quanto nas correntes dos sistemas elétricos de potência.

Dentre estes distúrbios, as distorções harmônicas de corrente e tensão têm merecido estudos cada vez mais aprofundados, devido às suas interferências no comportamento e operação de dispositivos, que originalmente foram projetados para condições senoidais de trabalho.

A natureza e a amplitude das harmônicas dependem da característica da carga, sendo que as de ordens ímpares são predominantes de vários destes equipamentos citados anteriormente. Altos níveis de distorções harmônicas, podem causar problemas para as redes de distribuição, para a própria instalação, para os equipamentos e nas redes de comunicação e telefonia.

A título de ilustração, podemos citar os efeitos das distorções harmônicas em alguns dos principais equipamentos pertencentes aos sistemas elétricos de potência, como segue:

Efeitos nos capacitores – Em uma planta industrial que contenha capacitores para correção do fator de potência, as distorções harmônicas podem ser amplificadas em função da

interação entre os capacitores e o transformador de serviço. Este fenômeno é chamado de ressonância harmônica ou ressonância paralela.

Os capacitores não são fontes harmônicas, mas sim amplificam as mesmas. Em presença destes distúrbios, os capacitores apresentam uma degradação muito rápida na sua vida útil.

Efeitos em transformadores - A perda no cobre em um transformador de potência, operando sob condições normais, situa-se entre 0,5% a 12% de sua potência nominal. Todavia, quando o mesmo supre cargas não lineares, tal fato não é verdadeiro.

A presença de tensões e correntes distorcidas aplicadas aos enrolamentos primário e secundário do transformador, causam aumento das perdas joules no cobre, das perdas no ferro quando em altas frequências e das perdas suplementares ([5], [6]).

Efeitos no condutor neutro - A circulação de correntes harmônicas no condutor neutro de uma instalação, pode provocar quedas de tensão e desequilíbrios neste sistema [7].

No caso de um sistema de aterramento tipo TN-C (**onde o neutro e a proteção são o mesmo condutor**), o potencial de terra dos diversos dispositivos não estarão mais na mesma referência, interferindo na troca de informação e sinais entre dispositivos (como sensores, controlador lógico programável, microcomputadores, etc.) [7].

Junto com os problemas causados pela “energia elétrica poluída”, há uma outra preocupação que é o “uso racional e o controle do desperdício” desta energia, devido ao alto custo da mesma. Para a aplicação desta racionalização em uma planta industrial, alguns procedimentos básicos devem ser adotados, entre eles podemos citar: especificação correta dos equipamentos, controle de demanda e do consumo, análise para adequação da melhor política tarifária vigente junto com dispositivos alternativos de geração de energia elétrica.

1.2 - Objetivos

- a) - Efetuar um estudo de caso procurando analisar na prática os problemas que são gerados e como são gerenciados os problemas relativos à qualidade da energia elétrica fornecida e consumida por uma planta elétrica industrial;
- b) - Verificar o comportamento harmônico das cargas não lineares presentes e sua influência nos diferentes barramentos dos quadros de distribuição da indústria;
- c) - Analisar o sistema tarifário praticado pela indústria, observando as vantagens e desvantagens.

1.3 - Estrutura do Trabalho

Com a finalidade de atingir as metas citadas, este trabalho apresenta-se dividido em capítulos, conforme descrito a seguir:

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.

Este capítulo apresenta uma breve introdução a qual permite colocar o trabalho dentro do contexto atual; o objetivo e a estrutura do trabalho em questão.

CAPÍTULO II – SISTEMA TARIFÁRIO E LEGISLAÇÕES PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.

Este capítulo apresenta uma análise resumida do sistema tarifário atual e sua adequação em função das características do consumidor.

CAPÍTULO III – ANÁLISE SUCINTA SOBRE A INFLUÊNCIA DOS DISTÚRBIOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS EM PLANTAS INDUSTRIAIS.

Efetou-se neste capítulo, uma análise dos efeitos das distorções harmônicas e suas conseqüências em uma planta elétrica industrial.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE INICIAL DA PLANTA INDUSTRIAL.

Este capítulo apresenta um gerenciamento das contas de energia para uma adequação nos contratos de demanda e eliminação de multas por ultrapassagem e baixo fator de potência.

CAPÍTULO V – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA PLANTA INDUSTRIAL.

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições das tensões e correntes, em diferentes pontos da planta industrial, com o objetivo de se observar as distorções harmônicas geradas pelas cargas não lineares presentes e seus efeitos nos circuitos alimentadores.

CAPÍTULO VI – SUGESTÕES E PROCEDIMENTOS.

Neste capítulo são apresentadas sugestões para a redução de consumo e a utilização racional da energia elétrica através de procedimentos preventivos e corretivos em diferentes dispositivos pertencentes à planta industrial.

CAPÍTULO VII– CONCLUSÕES FINAIS

São apresentadas as conclusões finais que puderam ser obtidas durante o transcorrer deste trabalho, bem como as sugestões para o prosseguimento do mesmo.

CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIAS

APÊNDICES

CAPÍTULO II

SISTEMA TARIFÁRIO E LEGISLAÇÕES

PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

2.1 – Introdução

A utilização racional da energia elétrica, que passa inclusive pela política tarifária praticada, proporciona aos consumidores uma redução de gastos com a mesma.

Neste sentido, para a definição do melhor ajuste tarifário, alguns procedimentos básicos devem ser adotados, sendo que os principais são citados a seguir:

? Aplicação correta do sistema tarifário, juntamente com um contrato justo de demanda obtido estatisticamente através das curvas de carga do consumidor;

? Identificar e sanear as sobretaxas provenientes dos reativos excedentes (controle do fator de potência);

? Além do ajuste tarifário, pode ser feita também a recuperação de uma porcentagem do ICMS (Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), conforme a Lei Complementar 102/2000 de 11/07/2000, que altera em parte a Lei Complementar 87/1996, a qual garante ao consumidor industrial e comercial a redução deste tributo sobre o consumo de energia elétrica do processo produtivo, através de laudo técnico fornecido por profissional capacitado. Na área administrativa esta lei não se aplica.

2.2 - Estrutura Tarifária

O sistema tarifário de energia elétrica é um conjunto de Normas e Regulamentos que tem por função estabelecer o custo da eletricidade para os diferentes tipos de consumidores. A ANEEL [08], além de suas atribuições específicas incorpora também as funções de Órgão Regulamentador em substituição ao DNAEE [09].

O Governo Federal, através do decreto nº 86463 de 13/10/1983, definiu a estrutura tarifária para a energia elétrica no país com base nos custos marginais do setor. Este processo foi iniciado em 1979, com o patrocínio do Banco Mundial e da assistência técnica da Electricité de France – EDF.

Na nova estrutura tarifária, há dois tipos básicos, a saber:

? monômnia: Faturamento sobre o consumo efetivo de energia (kWh).

? binômnia : Além do Faturamento sobre o consumo efetivo de energia, acrescenta-se um outro componente que remunera a capacidade colocada à disposição dos consumidores e incorpora preços diferenciados da energia, dependendo do horário de funcionamento e da época do ano.

O preço final de energia paga pelo consumidor inclui:

- energia propriamente utilizada;
- impostos (depende da política tributária vigente);
- encargos (referem-se às despesas de atendimento aos consumidores e independem do consumo).

Os consumidores de energia elétrica são enquadrados nestas estruturas tarifárias em função de suas características predominantes de consumo.

2.2.1 – Definições

A legislação que regulamenta a tarifação de energia elétrica no Brasil é baseada nos conceitos e definições apresentadas abaixo:

- **Demanda (kW)**: média das potências instantâneas solicitadas pela unidade consumidora integralizada em intervalos de 15 minutos. Na Tabela 1 apresentam-se as classificações das demandas e definições.

Tabela 1 – Classificação das demandas e definições

Demanda registrada – DR (kW)	É o maior valor da demanda efetivamente registrada em intervalos de 15 minutos, durante o período de funcionamento.
Demanda faturada – DF (kW)	É o valor da demanda efetivamente utilizada para efeito de faturamento.
Demanda contratada – DC (kW)	É o valor da demanda que a concessionária se compromete, através de contrato de fornecimento, a manter disponível ao consumidor.
Consumo – CA (kWh)	É a quantidade de energia elétrica ativa efetivamente medida no período de faturamento.
Horário de ponta (p)	É o intervalo de três horas, compreendido entre 17:00 e 22:00 horas de cada dia, exceto sábados e domingos e é definido segundo: as características da carga e característica do sistema elétrico da concessionária.
Horário fora de ponta (f)	É o intervalo formado pelas horas complementares às três horas do horário de ponta, bem como pelas 24 horas dos sábados e domingos.
Período úmido (u)	É o período de cinco meses compreendido entre dezembro de um ano a abril do ano seguinte.
Período seco (s)	É o período de sete meses consecutivos complementares ao período úmido, correspondendo ao período de maio a novembro de um mesmo ano.

2.2.2 – Tensões de Fornecimento

O nível da tensão de fornecimento para um consumidor é determinado em função de sua carga instalada. Na Tabela 2, apresenta-se esta correspondência em função da Demanda Contratada (DC).

Tabela 2 – Limites de tensão de fornecimento

CARGA INSTALADA	TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO
DC = 50 Kw	Tensão Secundária de Distribuição
50 kW < DC = 2500Kw	Tensão Primária de Distribuição
DC > 2500 kW	Tensão de Transmissão

? os limites podem ser alterados desde que homologados pelo órgão regulador.

2.2.3 – Classes de Consumidores

As tarifas para os consumidores dos grupos A e B são definidas em função da tensão de fornecimento e são classificadas em dois grupos conforme mostra a Tabela 3 :

Tabela 3 – Classes de consumidores

Grupo A				Grupo B			
<ul style="list-style-type: none"> - são os consumidores atendidos em tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3kV; - são aplicadas as tarifas de demanda e de consumo conforme o contrato de fornecimento; - estão divididos em 4 subgrupos de acordo com a tensão de fornecimento. 				<ul style="list-style-type: none"> - são os consumidores atendidos em tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV; - é aplicada a tarifa monômnia convencional; - estão divididos em 4 subgrupos de acordo com a utilização de energia. 			
A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
230 kV	138 kV	69 kV	13,8 kV	RESIDE N-CIAL	RURAL	PODER PÚBLICO	ILUMINA-ÇÃO PÚBLICA

A demanda também é utilizada para classificação dos consumidores e para efeito de tarifação.

2.2.4 – Modalidades Tarifárias

Os consumidores do grupo A são faturados com tarifa convencional ou horo-sazonal, dependendo da tensão de fornecimento e da demanda. A seguir, a Tabela 4 mostra as opções tarifárias para este grupo:

Tabela 4 – Opções tarifárias para o grupo A

CONSUMIDOR	TARIFA
Tensão de fornecimento = 69 kV (qualquer demanda)	Azul
Tensão de fornecimento < 69 kV (demanda = 500 kW)	Azul ou Verde
Tensão de fornecimento < 69 kV (50 kW = demanda < 500 kW)	Azul, Verde ou Convencional

Cada uma destas modalidades tarifárias, possui características próprias e são apresentadas a seguir.

2.2.4.1 – Tarifa Convencional

A tarifa convencional apresenta preços fixos tanto para demanda quanto para o consumo, independentemente do mês e do horário de utilização da energia.

O consumo de energia (CA) faturado será aquele verificado pela medição no período de funcionamento. O valor da demanda faturada (DF) será o que for maior entre os três itens seguintes:

- demanda contratada (DC), caso haja contrato de fornecimento de energia;
- demanda máxima registrada (DR) no mês;
- 85% do **maior valor** de demanda registrada (DR) nos últimos onze meses.

Para determinar o valor da fatura (VF) utiliza-se a expressão:

$$VF = CA \cdot TC + DF \cdot TD + \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.1)$$

2.2.4.2 – Tarifa Horo-sazonal Azul (THA)

A modalidade tarifária horo-sazonal azul, apresenta uma estrutura baseada em quatro preços diferenciados para o consumo de energia (CA), de acordo com os horários do dia (ponta e fora de ponta) e com os períodos do ano (período seco e período úmido).

Para a demanda, contempla dois preços de acordo com o horário (ponta e fora de ponta).

O consumo a ser faturado, será aquele efetivamente medido em um determinado período para cada segmento horo-sazonal. O valor da demanda faturada (DF) **será o maior** entre os dois itens seguintes:

- maior potência demandada, verificada na medição em cada segmento horo-sazonal, integralizada a cada intervalo de 15 minutos durante o período de funcionamento. Isto corresponde à demanda registrada (DR);
- demanda contratada (DC) em cada segmento horo-sazonal.

Os casos de unidades consumidoras classificadas como rural ou sazonal são tratados como exceções. Nestes casos, a DF será 10% (dez por cento) da maior demanda registrada, considerando-se os onze últimos faturamentos.

O valor da fatura (VF) é calculado de acordo com as seguintes equações:

- **período seco:**

$$VF = (CA_{fs} \cdot TC_{fs} + CA_{ps} \cdot TC_{ps} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.2)$$

- **período úmido:**

$$VF = (CA_{fu} \cdot TC_{fu} + CA_{pu} \cdot TC_{pu} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.3)$$

onde,

CA	Consumo de energia (kWh);
TC	Tarifa de consumo (R\$ / kWh);
TD	Tarifa de demanda (R\$ / kW);
f	Índice que indica o horário fora de ponta;
p	Índice que indica o horário de ponta;
s	Índice que indica o período seco;
u	Índice que indica o período úmido;
ICMS	Índice do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços.

2.2.4.3 – Tarifa Horo-sazonal Verde (THV)

A modalidade tarifária horo-sazonal verde apresenta a mesma estrutura da tarifa azul (THA) para a cobrança do consumo de energia elétrica. Para a demanda, entretanto, contempla apenas um preço, independente do segmento horo-sazonal.

O consumo a ser faturado será aquele efetivamente medido em um determinado período para cada segmento horo-sazonal. O valor da demanda faturada (DF) **será o maior** entre os dois itens seguintes:

- a maior potência demandada, verificada por medição, integralizada a cada intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento;
- a demanda contratada.

O valor da fatura (VF) é calculado de acordo com as seguintes equações:

? período seco:

$$VF = (CA_{fs} \cdot TC_{fs} + CA_{ps} \cdot TC_{ps} + DF \cdot TD) \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.4)$$

? período úmido:

$$VF = (CA_{fu} \cdot TC_{fu} + CA_{pu} \cdot TC_{pu} + DF \cdot TD) \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.5)$$

Nestas expressões, as grandezas utilizadas têm as mesmas definições apresentadas anteriormente.

2.2.4.4 – Faturamento da Ultrapassagem de Demanda

Havendo ultrapassagem da demanda medida relativamente à contratada, caberá a aplicação da tarifa de ultrapassagem à parcela que exceder o valor contratado.

A tarifa de ultrapassagem será aplicada quando excedidos os limites abaixo:

- 5% (cinco por cento) da demanda contratada para unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV e, conseqüentemente, enquadrados na tarifa azul;
- 10% (dez por cento) da demanda contratada para unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento inferior a 69 kV, enquadradas nas tarifas azul ou verde, com demanda contratada igual ou superior a 100 kW;
- 20% (vinte por cento) da demanda contratada para unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento inferior a 69 kV, enquadradas nas tarifas azul ou verde, com demanda contratada entre 50 kW até 100 kW;

O faturamento da ultrapassagem da demanda será efetuado conforme a expressão a

seguir:

$$FDU = \frac{DM}{DC} \cdot TU \quad (2.6)$$

onde,

FDU – valor em reais relativo ao faturamento da ultrapassagem (R\$);

DM – demanda medida (kW);

DC – demanda contratada (kW);

TU – tarifa de ultrapassagem (R\$ / kW).

A tarifa verde tem apenas uma componente FDU. A tarifa azul tem duas componentes FDU (uma para horário de ponta e outra para fora de ponta).

2.3 – Regulamentação do Fator de Potência

O fator de potência (FP) é a relação entre a energia realmente útil (potência ativa) e a energia total (potência aparente) fornecida pelo sistema elétrico, conforme a equação a seguir:

$$FP = \frac{P.ATIVA}{P.APARENTE} \quad (2.7)$$

2.3.1 - Aspectos Gerais da Legislação

Tanto os consumidores como também as concessionárias deve manter o fator de potência de seus sistemas o mais próximo possível da unidade (FP=100%).

O valor de referência estabelecido como limite para cobrança da energia reativa excedente por parte da concessionária é 92%, independente da modalidade tarifária.

A energia reativa capacitiva é medida no período de 0h as 6h e a indutiva das 6h as 24h;

O cálculo do fator de potência pode ser feito por avaliação horária ou mensal.

Os excedentes de reativos indutivo ou capacitivo é cobrado como tarifas de fornecimento de energia ativa. Surge, então, o conceito de energia ativa reprimida, ou seja, a cobrança pela circulação de excedente de reativo no sistema elétrico.

Para tarifação do fator de potência, utiliza-se a energia elétrica ativa faturada, kWh, e a energia elétrica reativa faturada, kVARh através da expressão, somente para cargas lineares e sistemas senoidais de tensões:

$$TFP = \cos \arctg \frac{kVArh}{kWh} \quad (2.8)$$

2.3.2 – Cálculo do Consumo da Energia Reativa Excedente e da Demanda de Potência Reativa Excedente

Para o cálculo do consumo de energia reativa excedente e da demanda de potência reativa excedente são definidas as seguintes grandezas:

UFDR	Demanda de potência ativa reprimida (kW), corresponde ao excedente de demanda de potência reativa.
UFER	Montante de energia ativa reprimida (kWh), correspondente ao excedente de consumo de energia reativa

As formulações para a avaliação horária e para a avaliação mensal são apresentadas a seguir:

1 - Avaliação Horária

a) Demanda:

$$UFDR = DMCR = DF \quad (2.9)$$

Onde:

$$DMCR = \max_{t=1}^M DA_t \cdot \frac{0,92}{f_t} \quad (2.10)$$

b) Consumo:

$$UFER = \sum_{t=1}^M CA_t \cdot \frac{0,92}{f_t} \cdot 1 \quad (2.11)$$

Onde:

- DMCR** Maior valor de demanda ativa reprimida
- DF** Demanda faturável no ciclo de faturamento
- DA_t** Demanda ativa registrada, integralização horária

- f_t Fator de potência horário
 CA_t Consumo de energia ativa registrada de hora em hora

O valor f_t é determinado a cada hora em função dos montantes de kWh e de kVAh, utilizando-se um registrador digital. Se f_t for menor que o valor de referência 92%, o registrador acumula o valor correspondente de UFER, calculando ainda o valor de DMCR. No final do ciclo de faturamento, o registrador fornece um total acumulado de UFER e o valor máximo de DMCR. Com base nesses valores, o sistema de faturamento calcula o valor de UFDR, desprezando valores negativos.

2 - Avaliação Mensal

a) Demanda:

$$UFDR = DR \cdot \frac{0,92}{f_m} \cdot DF \quad (2.12)$$

b) Consumo:

$$UFER = CA \cdot \frac{0,92}{f_m} \cdot 1 \quad (2.13)$$

Onde:

- DR** Demanda de potência máxima ativa registrada no ciclo de faturamento
DF Demanda faturável no ciclo de faturamento
 f_m Fator de potência mensal
CA Consumo de energia ativa no ciclo de faturamento

Com base nos dados de kWh e de kVAh obtidos através da medição, o sistema de faturamento determina o valor do f_m . Para valores de f_m inferiores a 92%, o sistema de faturamento calcula os valores de UFDR e UFER. Valores negativos de UFDR serão desconsiderados.

2.3.3 – Faturamento do Consumo de Energia Reativa Excedente e da Demanda de Potência Reativa Excedente

Para fins de faturamento, define-se:

FER	Faturamento do excedente de consumo de energia reativa (R\$)
FDR	Faturamento do excedente de demanda de potência reativa (R\$)

Desta forma tem-se:

$$FER = UFER \cdot TC \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.14)$$

$$FDR = UFDR \cdot TD \cdot \frac{1}{1 + ICMS} \quad (2.15)$$

O faturamento dos excedentes de energia reativa e demanda de reativos, tem as seguintes componentes para os grupos e sistemas tarifários existentes:

GRUPO A	Uma componente FER corresponde ao consumo de energia reativa excedente.
GRUPO B	
Tarifa Binômia Convencional	Uma componente FDR corresponde à demanda de potência reativa excedente. Uma componente FER corresponde ao consumo de potência reativa excedente
Tarifa Horo-sazonal Azul	Duas componentes, FDR_p e FDR_{fp} , correspondentes à demanda de potência reativa excedentes nos segmentos de ponta e fora de ponta, respectivamente. Duas componentes, FDR_p e FDR_{fp} , correspondentes ao consumo de potência reativa excedentes nos segmentos de ponta e fora de ponta, respectivamente.
Tarifa Horo-sazonal Verde	Uma componente FDR corresponde à demanda de potência reativa excedente. Duas componentes, FDR_p e FDR_{fp} , correspondentes ao consumo de potência reativa excedentes nos segmentos de ponta e fora de ponta, respectivamente.

2.4 – Fator de Carga -FC

O fator de carga é um índice que reflete a eficiência da utilização de energia por parte de um consumidor. Valores elevados do FC indicam a utilização adequada da energia elétrica [10], enquanto que baixos valores indicam uma má utilização. Deste modo, quanto menor for o FC, maior deverá ser o custo médio (CM) da energia para o consumidor.

Quantitativamente, o fator de carga de uma instalação é determinado pela relação entre a demanda de potência média e a demanda máxima, medidas no período de faturamento. Para melhor compreensão, o gráfico da Figura 1 mostra uma curva de carga típica com as referidas demandas.

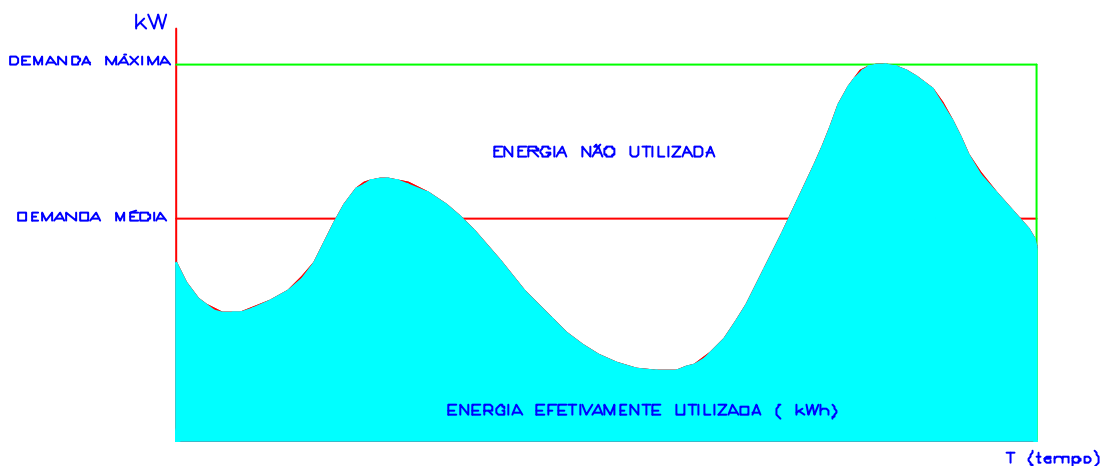


Fig. 1 – Gráfico de fator de carga típico

O fator de carga pode ser representado também através da relação entre o consumo de energia ativa medida, e o consumo que se teria caso a demanda medida permanecesse constante por todo o período de faturamento. Estas relações podem ser expressas na forma:

$$FC = \frac{Dem.Média(kW)}{Dem.Máxima(kW)} = \frac{CA(kWh)}{DR(kW) \cdot N^{\circ} horas} \quad (2.16)$$

O número médio de horas mensal adotado pela legislação é de 730. Para tarifação horo-sazonal, deve-se levar em consideração os períodos de ponta e fora de ponta. Na tarifação azul, calculam-se os fatores de carga para horários de ponta e fora de ponta, considerando-se os consumos e as demandas registradas para cada período. O número de horas mensal adotado para o período fora de ponta é 664 horas, enquanto que para o período de ponta é 66 horas.

Para tarifa verde, considera-se o mesmo valor da demanda tanto para o período de ponta como fora de ponta. A determinação do fator de carga depende do sistema de tarifação utilizado.

Para melhorar o fator de carga, podem-se adotar dois procedimentos. O primeiro consiste em manter o consumo de energia elétrica e reduzir a parcela correspondente à demanda. Já o segundo consiste em manter a atual demanda e aumentar o consumo de energia elétrica.

A melhoria do fator de carga implica em benefícios, tais como, a otimização dos investimentos nas instalações elétricas e nos equipamentos, além da redução do importe do fornecimento e do preço médio do kWh consumido.

2.5– Recuperação de ICMS

Recentes alterações na legislação da Lei Complementar 102/2000, de 11/07/2000, que altera em parte da Lei complementar 87/1996, estabelece que uma fração do imposto sobre circulação de mercadoria (ICMS), recolhido nas contas de energia elétrica, pode ser recuperado em forma de crédito para o consumidor.

Este procedimento se aplica apenas sobre a parcela do consumo de energia associada as atividades produtivas, não sendo aplicada às atividades administrativas.

Para se obter este benefício há a necessidade da elaboração de um laudo técnico, realizado por um profissional independente, demonstrando a carga total instalada e quanto da mesma é utilizada no processo produtivo.

O cálculo do percentual de recuperação deve ser revisto periodicamente levando em conta as mudanças nas atividades produtivas, tais como, instalação de novos equipamentos, modernização da linha de produção, variações de turnos de trabalho, ajustes da produção a novas demandas de mercado, etc.

A porcentagem de ICMS cobrado nas contas de energia elétrica das indústrias de transformação é de aproximadamente 18%. Trata-se de um valor bastante significativo e que não pode ser desprezado. Cerca de 90% do ICMS cobrado dos consumidores industriais é passível de ser utilizado como crédito.

O percentual de recuperação previsto na lei é definido pela seguinte equação:

$$Pr(\%) = Pr(\%) \cdot \left[1 - \frac{C_{np}}{C_m} \right] \cdot 100 \quad (2.17)$$

Onde:

Cnp = consumo mensal de energia associado a cargas não produtivas;

Cm = co

CAPÍTULO III

ANÁLISE SUCINTA SOBRE A INFLUÊNCIA DOS DISTÚRBIOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS EM PLANTAS INDUSTRIAIS

2.1 Introdução

Análise sucinta dos principais distúrbios presentes nos sistemas elétricos de distribuição que afetam diretamente as plantas industriais. As análises das distorções harmônicas tiveram o principal objetivo neste estudo.

Para garantir a conformidade e a continuidade do sistema elétrico, as seguintes condições são necessárias: a) tensões e correntes com formas de ondas senoidais; b) Tensões com amplitudes correspondentes aos valores nominais; c) frequência da rede com valor síncrono; c) tensões trifásicas equilibradas.

Nos dias atuais é quase que impossível a ocorrência simultânea destas condições ideais, visto que, há uma proliferação muito grande de cargas com características não lineares sendo instaladas. Isto faz com que correntes distorcidas circulem nos sistemas elétricos, provocando quedas de tensões, tensões de alimentação não senoidais e atuações indevidas das proteções.

3.2 Níveis de Tensão Nominal

A resolução nº. 505, de 26 de novembro de 2001, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANELL, estabelecem, de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 230 kV

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC = TL = 1,03 TC$
Precária	$0,90 TC = TL < 0,95 TC$ ou $1,03 TC < TL = 1,05 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

3.3 Caracterização dos Distúrbios e Procedimentos para Avaliações

Segundo a recomendação IEEE 519 [11], os sistemas elétricos podem estar expostos a distúrbios os quais podem ser caracterizados de diversas maneiras, ou seja:

- ? transitórios (impulsivos, oscilatórios)
- ? variação de tensão de curta duração (interrupção, afundamento/sag e elevação/swell);
- ? variação de longa duração (interrupção permanente, subtensão e sobretensão);
- ? desequilíbrio de tensões;
- ? distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação e eventuais níveis curto-circuito);
- ? flutuações de tensões e variações da frequência da rede.

Uma das principais razões para o estabelecimento das diferentes categorias, relacionadas aos fenômenos eletromagnéticos, se devem ao fato de que existem diferentes formas para se qualificar e quantificar os problemas sob o ponto de vista da qualidade de energia.

Uma primeira avaliação dos distúrbios pode ser feita através de um monitoramento para diagnosticar as incompatibilidades entre a fonte (concessionária) e a carga (indústrias, comércio e residências).

Uma segunda avaliação consiste em analisar o comportamento do sistema elétrico, em particular a localização das distorções, para que se possa aperfeiçoar as técnicas de modelagem ou de desenvolvimento no tratamento das estratégias a serem adotadas.

Em qualquer um dos eventos, o trabalho mais importante consiste em se definir os pontos estratégicos para condução de um projeto de monitoramento.

Os procedimentos abaixo são então recomendados para a aplicação em uma planta industrial:

- ? Escolha adequada dos equipamentos de medidas a serem utilizados;
- ? Estabelecer um método para coletar os dados de acordo com os limites definidos para as tensões;
- ? Definir técnicas de análises estatísticas das amostras;
- ? Dispor de todas as informações possíveis sobre os equipamentos instalados no sistema elétrico.

3.4 Efeitos das Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos

A seguir é apresentada uma síntese dos efeitos das distorções harmônicas nos sistemas elétricos de potência, e nos principais dispositivos pertencentes aos mesmos.

3.4.1 Nos Sistemas Elétricos de Potência

Para os sistemas elétricos de potência, podemos afirmar que tanto o baixo fator de potência (FP), quanto a alta taxa de distorção harmônica total(DHT), implicam em uma série de desvantagens, entre as quais podemos citar:

- ✍ A máxima Potência Ativa da rede é fortemente afetada pelo FP;
- ✍ As distorções harmônicas de corrente exigem um sobredimensionamento das instalações elétricas e dos transformadores, além de provocar um aumento das perdas Joule;
- ✍ Pode ocorrer a circulação de uma elevada corrente de 3^a ordem harmônica, de seqüência zero, pelo condutor neutro da instalação;
- ✍ Funcionamento inadequado dos dispositivos de proteção comando e controle.

3.4.2 Nos Dispositivos Pertencentes ao Sistema Elétrico

O grau que as distorções harmônicas podem ser toleradas, depende da susceptibilidade das cargas (ou das fontes de potência).

Os equipamentos menos sensíveis são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são àqueles onde o melhor desempenho se consegue com alimentação puramente senoidal.

Mesmo para as cargas de baixas susceptibilidades, a presença das distorções harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, ou seja, podem produzir esforços adicionais nos componentes eletrônicos dos equipamentos, ou, aquecimentos elevados, levando à fadiga do material isolante.

a) – Influência em Motores Elétricos

Um dos efeitos das distorções harmônicas em máquinas rotativas (indução e síncrona)

é a elevação do aquecimento motivado pelo aumento das perdas no ferro quando estão em plena carga e no cobre, o que provoca uma diminuição da sua eficiência e como conseqüência, uma diminuição do conjugado no eixo.

Nos motores, os harmônicos de ordem 5, 11, 17, etc. produzem componentes do campo magnético que giram no sentido oposto ao movimento do rotor, e os de ordem 7, 13, 19, etc. contribuem com o movimento do rotor, observa-se o aparecimento de torques oscilatórios devido a interação de correntes harmônicas e o campo magnético de frequência fundamental. Os torques de oscilação e podem aumentar o ruído audível e levar a problemas de vibração mecânica para o motor e a carga acionada [07].

O efeito do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução da eficiência é da ordem de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação puramente senoidal [12]. Esta redução não é válida para as máquinas alimentadas a partir de inversores, mas sim para aquelas alimentadas diretamente da rede.

b) – Influência nos Transformadores

Nos transformadores, as distorções harmônicas tanto da tensão quanto da corrente total se manifesta de duas maneiras:

Harmônicas na corrente elevam as perdas no cobre, e na tensão aumentam as perdas ferro.

b.1) - Perdas no Núcleo

O aumento das perdas no núcleo com as harmônicas dependem das ordens e das amplitudes harmônicas nas tensões de alimentação, bem como do tipo de núcleo empregado, material e laminação ([13], [14]).

A perda por corrente parasita possui uma relação direta com as taxas de variação do fluxo magnético. O conteúdo harmônico deste fluxo magnético está, por sua vez, diretamente relacionado com a distorção harmônica presente nas tensões aplicadas ao transformador.

A perda por histerese esta relacionada com a energia necessária para orientar os domínios magnéticos [15].

De um modo geral, a elevação das perdas no núcleo devido à presença de harmônica são pouco significativas, quando comparadas com as perdas no cobre.

b.2) - Perdas no Cobre

As perdas no cobre em um transformador de potência operando sob condições normais situam-se, em geral, entre 0,5% a 12% de sua potência nominal. Todavia, quando o transformador está suprindo cargas não lineares, tal fato pode não ser verdadeiro, devido ao expressivo conteúdo harmônico das correntes que circulam pelos enrolamentos.

Na literatura clássica, as perdas no cobre são freqüentemente consideradas como sendo composta por duas parcelas. A primeira representa as perdas na resistência CC dos enrolamentos e a segunda parcela é representativa das perdas suplementares. Estas últimas são compostas, principalmente, pelas perdas magnéticas nas partes metálicas e pelas perdas no cobre, devidas ao fluxo de dispersão [05 -06].

b.3)- Aquecimentos Localizados

Em transformadores de potência, a região do ponto mais quente está localizada normalmente na extremidade superior dos enrolamentos. Nesta região a temperatura do óleo é mais elevada e as perdas suplementares específicas (W/m^3) são substancialmente maiores. Isto decorre do fato de que as espiras (ou bobinas) situadas nas extremidades dos enrolamentos estão sujeitas a campos radiais mais intensos [05-15].

c)- Capacitores de Potência

As plantas elétricas que possuem capacitores para correção do fator de potência, podem ficar sujeitas a uma série de problemas quando da presença de distorções harmônicas de tensão. Uma consequência imediata é a possibilidade da ocorrência de ressonâncias paralelas, produzindo níveis excessivos de corrente e/ou de tensão.

Além disso, como a reatância capacitiva diminui com o aumento da freqüência, as correntes de ordens superiores encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevando assim as suas perdas ôhmicas. Isto provoca aquecimentos adicionais o que compromete a vida útil dos mesmos.

3.4.3 Influência das Harmônicas nos Cabos de Alimentação

A circulação de correntes com componentes harmônicas nos cabos de alimentação,

provocam o surgimento de fenômenos os quais resultam em um aumento das perdas Joules nos mesmos.

Basicamente existem dois fenômenos físicos que se manifestam simultaneamente nos cabos de alimentação, os chamados Efeito Skin e o Efeito de Proximidade.

O Efeito Skin, ou Efeito Pelicular, é o resultado da não uniformidade da indutância própria através das seções retas do condutor. Como o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo que a sua superfície, sua indutância (reatância) nesse ponto é maior que na superfície fazendo com que a corrente circule em menor densidade no centro do condutor. Essa distribuição de corrente faz com que a resistência CA seja maior que CC .

O Efeito de Proximidade é resultado da interação entre dois ou mais condutores. Nesse caso, os campos magnéticos dos condutores próximos interagem entre si, distorcendo a distribuição de correntes dos mesmos e, conseqüentemente, alterando o valor da resistência elétrica.

A título de ilustração, a Figura 2 mostra a relação entre as resistências CA e CC , em função da frequência para diferentes condutores planos de seções circulares. A Figura 3 ilustra os dois efeitos, separadamente, em função da frequência, para um cabo de 95 mm^2 .

Na figura 3 pode ser observado que para altas frequências o efeito Skin é maior, enquanto que para frequências menores predomina o efeito de proximidade.

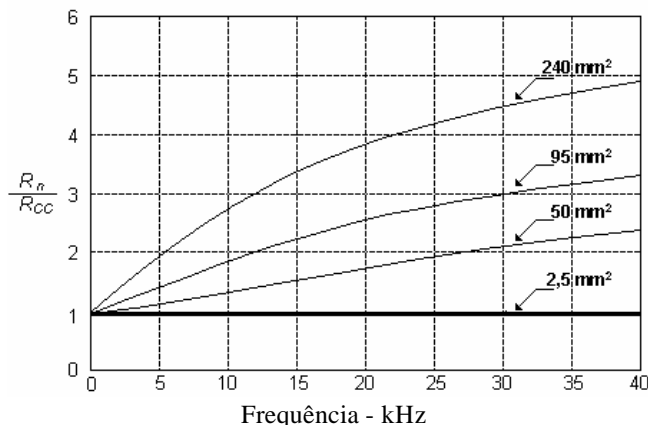


Fig. 2 – Relação entre as resistências CA e CC em função da frequência, para condutores de diferentes seções

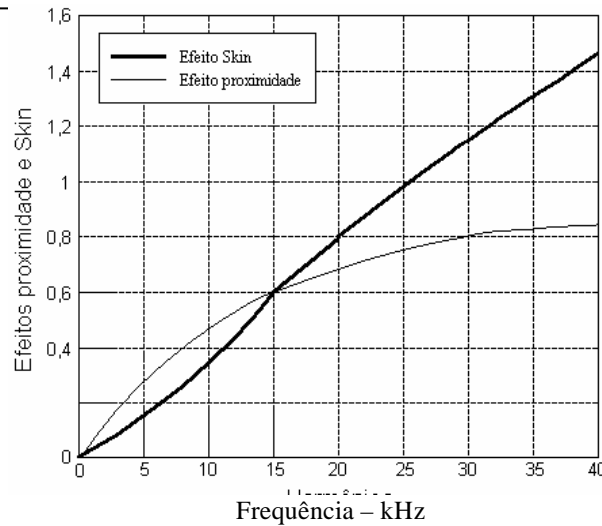


Fig. 3 – Efeitos Skin e de Proximidade em função da frequência, para um condutor de seção circular de 95 mm².

O efeito pelicular restringe a seção condutora para componentes de frequências elevadas.

Devido aos efeitos citados, a norma NBR 5410 da ABNT recomenda a aplicação de um fator de correção nos cabos previamente dimensionados, o que pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – (*) Fatores de correção aplicáveis a circuitos trifásicos a 4 condutores onde é prevista a presença de correntes harmônicas de 3ª ordem.

Porcentagem de 3ª harmônica na corrente de fase (%)	Fator de correção (t)	
	Escolha da seção com base na corrente de fase	Escolha da seção com base na corrente de neutro
0 – 15	1,00	-
15 – 33	0,86	-
33 – 45	-	0,86
> 45	-	1,00

(*) De acordo com a Tabela 45 da NBR 5410/1977

A corrente (I) a ser utilizada é obtida pelas expressões:

* escolha pela corrente de fase : $I \geq \frac{I_B}{f}$

* escolha pela corrente de neutro : $I \geq \frac{1}{t} \cdot I_B \cdot \frac{z}{100} \cdot 3$

onde,

I_B = corrente de projeto do circuito;

z = porcentagem da harmônica de 3ª ordem (Tabela 6);

t = fator de correção (Tabela 6).

3.4.4 Distribuição Sequencial das Correntes Harmônicas em Sistemas Elétricos Trifásicos

De um modo geral, as correntes elétricas distorcidas em um sistema trifásico podem ser representadas genericamente pelas equações (3.1) a seguir.

$$\begin{aligned} i_a &= \sum_{n=1}^{n??} I_{an} \text{sen}[n(\omega t + \theta_a) + \phi_n] \\ i_b &= \sum_{n=1}^{n??} I_{bn} \text{sen}[n(\omega t + \theta_b) + \phi_n] \\ i_c &= \sum_{n=1}^{n??} I_{cn} \text{sen}[n(\omega t + \theta_c) + \phi_n] \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde,

i_a, i_b, i_c = correntes de linha

$\theta_a, \theta_b, \theta_c$ = defasamento angular

ϕ_n, ϕ_n, ϕ_n = ângulo de fase da n ordem harmônica

Para o caso particular de uma alimentação simétrica e equilibrada, tem-se:

$$\theta_a = \theta_b = \theta_c = \theta_n; \quad \theta_a = 0; \quad \theta_b = 2\pi/3; \quad \theta_c = 4\pi/3 \quad (3.2)$$

Nestas condições, as componentes fundamentais das correntes passam a ser dadas por:

$$\begin{aligned} i_{a1} &= \sqrt{3} I_1 \text{sen}(\omega t + \theta_1) \\ i_{b1} &= \sqrt{3} I_1 \text{sen}(\omega t + \theta_1 - 2\pi/3) \\ i_{c1} &= \sqrt{3} I_1 \text{sen}(\omega t + \theta_1 + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Observa-se que as componentes fundamentais formam um sistema trifásico de seqüência de fase positiva (ou direta). Este fato também se repete para as harmônicas de 4ª, 7ª, 10ª, etc... ordens. Entretanto, para as harmônicas de 2ª, 5ª, 8ª, 11ª, etc... ordens, o sistema trifásico resultante possui seqüência negativa (ou inversa). Isto pode ser observado, para a 2ª harmônica, nas expressões (3.4).

$$\begin{aligned}
 i_{a2}(t) &= I_2 \sin(2\omega t - \phi_2) \\
 i_{b2}(t) &= I_2 \sin(2\omega t - \phi_2 - 2\pi/3) \\
 i_{c2}(t) &= I_2 \sin(2\omega t - \phi_2 + 2\pi/3)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

As correntes harmônicas múltiplas da 3ª ordem (3ª, 9ª, 15ª, 21ª,...), formam um sistema trifásico de seqüência zero, conforme pode ser observado nas expressões (3.5). Estas são denominadas de harmônicas “triplens” .

$$\begin{aligned}
 i_{a3}(t) &= I_3 \sin(3\omega t - \phi_3) \\
 i_{b3}(t) &= I_3 \sin(3\omega t - \phi_3) \\
 i_{c3}(t) &= I_3 \sin(3\omega t - \phi_3)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Nos sistemas trifásicos a quatro fios, com cargas monofásicas não-lineares, ainda que equilibradas, as harmônicas triplens tornam-se um assunto importante devido a sua composição no condutor neutro.

As componentes da corrente fundamental e das ordens harmônicas de seqüência positiva e negativa somam-se igual a zero no condutor neutro. Por outro lado, as componentes harmônicas múltiplas de três somam-se, apresentando uma amplitude três vezes maior que sua correspondente nas fases.

A Tabela 7 mostra, resumidamente, a distribuição seqüencial das componentes harmônicas em um sistema trifásico.

Tabela 7 - Distribuição seqüencial das componentes harmônicas.

SEQ.	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª
SEQ +	✓			✓			✓			✓			✓		
SEQ -		✓			✓			✓			✓			✓	
SEQ 0			✓			✓			✓			✓			✓

Embora o desenvolvimento anterior tenha sido realizado para as correntes elétricas não-senoidais simétricas, o mesmo pode ser feito com as tensões, o que leva a resultado físicos idênticos.

3.5 Índices de Conformidade

Nos índices de conformidade recomendados pelas normas avalia-se o grau de solicitação imposta pela rede sobre os equipamentos sensíveis. Assim, pode ser definida a responsabilidade das concessionárias, fabricantes de equipamentos e consumidores.

As principais normas e recomendações sugerem índices de conformidade referentes aos valores máximos de distorção:

?Institute of Electrical and Electronics Engineers-IEEE 519, 1992 [01];

? IEC - International Electrotechnical Commission Standard 61000-3-2 [17];

?ANEEL / ONS .

Os índices de conformidade (em relação à tensão nominal) para a distorção harmônica de tensão constam nas referências [01] e [11]. São discriminados somente os níveis das tensões nominais dos circuitos no ponto de acoplamento comum. Os índices de conformidade são idênticos para todas as ordens harmônicas.

Já os limites de distorção harmônica de corrente são classificados tanto em relação à tensão nominal dos circuitos quanto em relação as ordens harmônicas individuais.

Para os sistemas de baixa e média tensão, a norma IEC [17] apresenta índices (em relação à tensão nominal) diferenciados para as ordens harmônicas individuais e para a distorção harmônica total.

O documento “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, apresenta dois índices de conformidade (em relação à tensão de frequência fundamental) para as tensões harmônicas ou seja: limites globais (grupos de consumidores) para harmônicas individuais e para distorção harmônica total; limites por consumidor.

As amplitudes das ordens harmônicas de corrente devem ser estabelecidas pela concessionária após estudos de penetração harmônica . A Tabela 8 apresenta um resumo desses índices para as distorções de tensão, para as quais recomenda valores bem definidos.

A referência [01] fornece a base para a aplicação de limites harmônicos, tanto para os sistemas de fornecimento quanto para os consumidores. Estes valores vêm sendo utilizados como base para implantação de padrões aceitáveis de distorções em todo o mundo, inclusive no Brasil.

Com esta normalização, apareceram algumas divergências, conforme a seguir, sendo estas resolvidas pela revisão para as recomendações da IEEE-519 para limites e amplitudes para harmônicas de corrente: IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters [18]:

?Onde selecionar o Ponto de Acoplamento Comum (PAC);

?Como selecionar as correntes básicas para avaliar as distorções harmônicas de consumidores individuais;

- ?Avaliar o fluxo harmônico quando um consumidor tem o fator de potência corrigido por capacitores (fixo / variáveis) e/ou filtros harmônicos;
- ?Como avaliar as distorções harmônicas que só ocorrem em curtas durações ou raramente se manifestam (natureza estatística de níveis harmônicos);
- ?Como avaliar tendência por medidas.

3.5.1 Limites de Distorção da Tensão

A Tabela 8 a seguir apresenta, para diferentes níveis de tensão de fornecimento, os valores máximos de distorções harmônicas individuais e a DTHT (Distorção Harmônica Total Tensão).

Tabela 8 – Limites de distorção de harmônicas da tensão em % da tensão na frequência fundamental

HARMÔNICAS DE TENSÃO		Máxima Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)								
		Recomendações / Normas								
		IEEE 519			IEC	ANEEL/ONS				
		V ≥ 69kV	69kV < V < 161kV	V < 161kV	V < 35kV	35kV < V < 69kV	V < 69kV			
Ímpares	5	3,0	1,5	1,0	6,0	5,0	2,0			
	7				5,0	5,0	2,0			
	11				3,5	3,0	1,5			
Não	13				3,0	3,0	1,5			
	17				2,0	2,0	1,0			
	19				1,5	2,0	1,0			
Múltiplas	23				1,5	2,0	1,0			
	25				1,5	2,0	1,0			
	≥ 25				0,2+1,3 (25/h)	1,0	0,5			
De 3	3				3,0	1,5	1,0	5,0	5,0	2,0
	9							1,5	3,0	1,5
	15							0,3	2,0	1,0
	21							0,2	2,0	1,0
	≥ 21							0,2	1,0	0,5
Pares	2				3,0	1,5	1,0	2,0	2,0	1,0
	4	1,0	2,0	1,0						
	6	0,5	2,0	1,0						
	8	0,5	1,0	0,5						
	10	0,5	1,0	0,5						
	12	0,2	1,0	0,5						
DTHT		5,0	2,5	1,5	8,0	6,0	3,0			

A distorção harmônica total da tensão DTHT é dada por :

$$DTHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica individual

V_n - Valor eficaz Tensão fundamental do sistema

h - Ordem harmônica

3.5.2 Limites de Distorção da Corrente

Os limites de distorção da corrente obedecem à relação entre a capacidade da corrente de curto circuito estabelecida no PAC e a corrente eficaz de carga do consumidor, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Limites de distorção das harmônicas de corrente (I_h) em % de I_L

Vn ≥ 69 kV						
I_{SC} / I_L	h=1	11h=17	17h=23	23h=35	35h	DIHT
≥20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 5	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 no PAC (ponto de acoplamento comum)

I_L - valor da corrente eficaz de carga (componente fundamental) no PAC

A distorção harmônica total da corrente DIHT é dada por :

$$DIHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Onde:

I_h - valor eficaz da componente harmônica individual

I_L - Máximo valor eficaz da corrente de carga (componente fundamental)

h - Ordem harmônica

3.6 Potência Média (Ativa)

Em um sistema com sinais distorcidos, tanto a tensão quanto a corrente podem ser expressos como:

$$v(t) = V_o + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t + \theta_n) \quad (3.8)$$

$$i(t) = I_o + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega t + \theta_n) \quad (3.9)$$

Onde:

V_h – Amplitude da componente de ordem h da tensão

I_h – Amplitude da componente de ordem h da corrente

A partir das equações 3.8 e 3.9 é possível demonstrar que a potência média pode ser calculada através da equação (3.10) abaixo.

$$P = V_o I_o + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_h I_h}{2} \cos(\theta_h - \theta_h) \quad (3.10)$$

Desta forma, a energia é transmitida para a carga somente se as componentes harmônicas de $v(t)$ e $i(t)$ contêm termos de mesma frequência. Por exemplo, se a tensão e a corrente possuem termos de terceira harmônica, então estes termos resultarão em potência média igual à equação (3.11) a seguir.

$$P = \frac{V_3 I_3}{2} \cos(\theta_3 - \theta_3) \quad (3.11)$$

3.7 Fator de Potência em Sistemas com Sinais Distorcidos

Para uma eficiente transmissão de energia da fonte para a carga, é desejável maximizar a potência média, com a minimização dos valores eficazes de tensão e corrente e, portanto, minimizando as perdas.

O fator de potência (FP) é uma figura de mérito que avalia o quão eficiente é a

transmissão de energia elétrica. O FP é definido como:

$$FatorPotência = \frac{PotênciaMédia}{(TensãoEficaz).(CorrenteEficaz)} \quad (3.12)$$

O valor eficaz de uma forma de onda de tensão e corrente em termos de suas componentes harmônicas é dado pelas expressões (3.13) e (3.14).

$$TensãoEficaz = \sqrt{V_o^2 + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{2}} \quad (3.13)$$

$$CorrenteEficaz = \sqrt{I_o^2 + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{2}} \quad (3.14)$$

Observa-se que das equações (3.13) e (3.14) que as componentes harmônicas aumentam o valor eficaz da tensão e da corrente, sem necessariamente aumentar o valor médio.

No caso de cargas resistivas lineares e tensões não-senoidais, as harmônicas de corrente estarão em fase e com as amplitudes proporcionais às harmônicas de tensão. Portanto, todas as harmônicas contribuirão para a energia transmitida à carga, e o FP será unitário. A equação (3.15) representa o FP para esta situação.

$$FP = \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (3.15)$$

Onde:

$$\theta_n = \theta_n$$

θ_n - ângulo da tensão

ϕ_n - ângulo da corrente

Para o caso em que a carga é não linear, e a tensão é senoidal as harmônicas de corrente não contribuem para a potência média. Entretanto, as correntes harmônicas aumentam o valor eficaz da corrente, reduzindo o fator de potência. A expressão (3.16) mostra o cálculo do fator de potência para situações deste tipo.

$$FP = \left(\frac{I_1}{\sqrt{2}} \right) \cdot (\cos(\theta_1 - \phi_1)) \quad (3.16)$$

$$\sqrt{I_o^2 + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{2}}$$

Definindo Fator de Distorção (FD) e, Taxa de Distorção Harmônica (DIHT) como equações (3.17) e (3.18), respectivamente, temos:

$$FD = \left(\frac{I_1}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{ou} \quad FD = \frac{1}{\sqrt{1 + (DIHT)^2}} \quad (3.17)$$

$$DIHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3.18)$$

Demonstrando-se de Fator de Deslocamento o termo $\cos(\theta_1 - \theta_1)$, temos que:

$$FP = \frac{\cos(\theta_1 - \theta_1)}{\sqrt{1 + (DHT)^2}} \quad (3.19)$$

A Figura 4 mostra o comportamento do fator distorção em relação à taxa de distorção harmônica total.

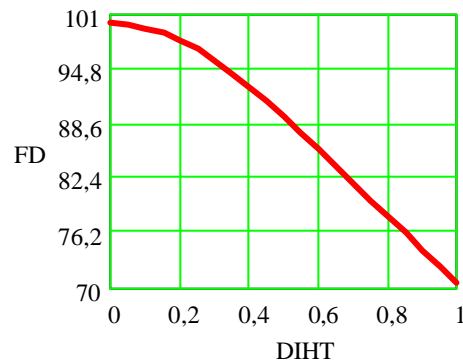


Fig. 4 - Curva FD x DIHT.

Verifica-se na Figura 4 que o fator de distorção diminui com o aumento da DIHT, acarretando uma diminuição do fator de potência. Isto implica que toda vez que uma corrente contiver uma componente harmônica, o fator de potência nunca será unitário e deixa de ser calculado por $\cos(\theta_1 - \theta_1)$.

CAPITULO IV

ANÁLISE INICIAL DA PLANTA INDUSTRIAL

4.1 Introdução

Uma avaliação inicial para a aplicação de técnicas de controle de consumo e desperdício de energia elétrica em uma planta industrial, requer estudos de todos os equipamentos instalados, dos sistemas de distribuição dos circuitos alimentadores e do sistema tarifário praticado.

Neste capítulo foi melhorado um programa computacional que permite fazer uma avaliação inicial do comportamento do consumo da energia elétrica, através da análise das faturas fornecidas pela concessionária.

As análises decorrentes foram realizadas em uma Indústria Metalúrgica que produz eixos para caminhões, carrocerias metálicas e caçambas, possuindo uma carga elétrica total instalada de 525 kVA, com tensões de fornecimento de 13,8 kV //220/127V e medição na alta tensão.

4.2 Programa Para Avaliação de Faturas “ACTEE”

Com o objetivo de se avaliar o desempenho mensal e anual da utilização da energia elétrica por parte da indústria, foi melhorado um programa e denominado de “Análise de Fatura de Tarifação de Energia Elétrica”.

Este programa foi desenvolvido em ambiente amigável e permite ao usuário fazer as análises, num período de tempo pré-determinado, através de tabelas e gráficos.

4.2.1 Estrutura do Programa

O programa foi estruturado segundo os dados constantes na fatura de energia elétrica do consumidor. Os seguintes passos são possíveis de serem executados:

- ✍ montar um banco de dados do consumo de energia;

- ✍ avaliar mensalmente, através de gráficos, os parâmetros físicos e econômicos do consumo de energia;
- ✍ avaliar o fator de potência;
- ✍ verificar se ocorre redução dos custos de energia elétrica através de procedimentos adotados;
- ✍ avaliar a demanda contratada com o objetivo de ajuste.

A Figura 5 mostra a tela principal do programa, onde é possível observar, de uma maneira geral, os dados de entrada e saída do programa.

Consumo /KWh	32400	Demanda Contratada (KW)	249
Consumo Reativo/KWh	0	Demanda Medida (KW)	216
Consumo Fora de Ponta /KWh	0	Demanda Reativa (KW)	0
Consumo de Ponta /KWh	0	Enc.Capacidade Emergencial / KWh	42105
Consumo Reativo Fora de Ponta /KWh	0	Fator de Potência	96.557
Consumo Reativo de Ponta /KWh	0		
Tarifa Consumo R\$		Tarifa Demanda R\$	6.83
Tarifa Consumo Reativo R\$		Tarifa Demanda Reativa R\$	0
Tarifa Consumo Fora de Ponta R\$	0	Tarifa Enc.Capacidade Emergencial R\$	0
Tarifa Consumo de Ponta R\$	0	Base de Cálculo R\$	5973.75
Tarifa Consumo Reativo Fora de Ponta R\$	0	ICMS %	18
Tarifa Consumo Reativo de Ponta R\$	0	Valor Total da Fatura R\$	5973.75

Fig. 5 - Tela principal do programa ACTEE

Os passos para a utilização encontram-se no Apêndice A.

4.3 – Aplicação do Programa na Planta da Indústria Metalúrgica

Através do programa foi possível fazer uma avaliação do comportamento da energia elétrica contratada e consumida pela indústria metalúrgica.

A tarifa praticada é a convencional, do Subgrupo A4, com uma demanda contratada de 249 kW.

A empresa é alimentada através do Alimentador – 6, da ELEKTRO, nas tensões 13,8 kV // 220/127 Volts.

A Tabela A1 mostra os valores constantes nas faturas de energia elétrica durante um período de dois anos ou seja, de Janeiro de 2001 a Novembro de 2002. Através destes valores

foi possível fazer uma comparação do comportamento de consumo da indústria.

Na Figura 6 é possível observar o desempenho do consumo de energia ativa (Watt/hora) e o seu respectivo faturamento para o período correspondente a dezembro de 2001 a novembro 2002. Comparando com os outros meses deste período, em abril e maio houve um aumento do consumo de energia ativa devido ao aumento de produção.

Na Figura 7 foi feita uma comparação mensal do comportamento do consumo para os anos de 2001 e 2002. Pode ser observado que houve um crescimento de consumo maior nos meses abril a maio e novembro, e uma redução nos meses de março e setembro.

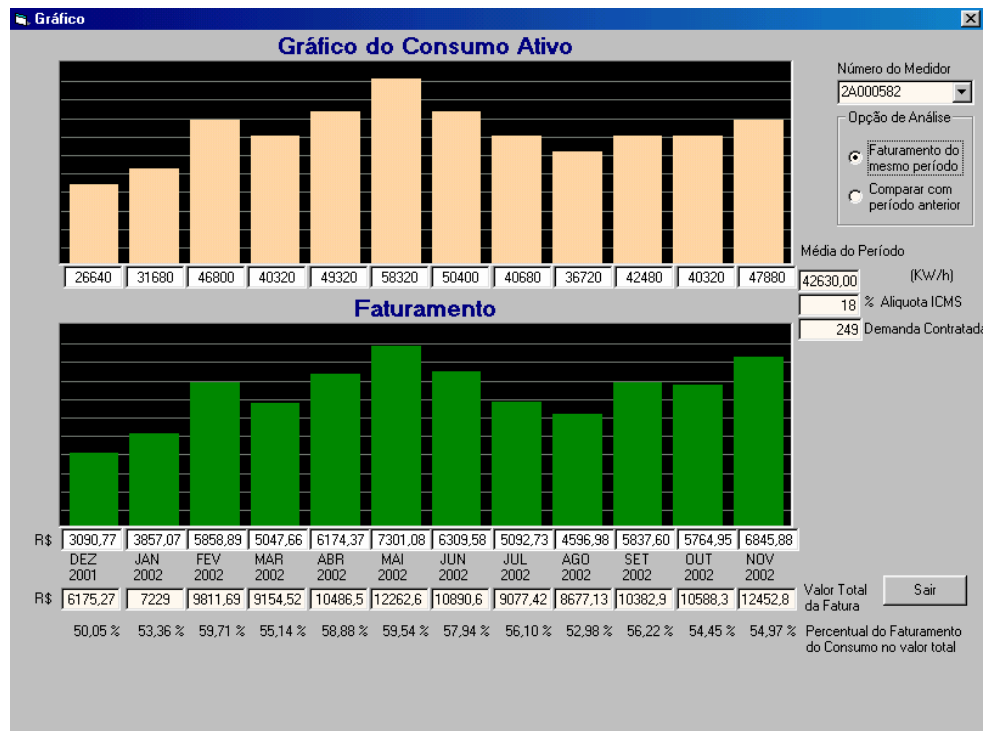


Fig. 6 – Gráfico de análise do consumo de energia ativa

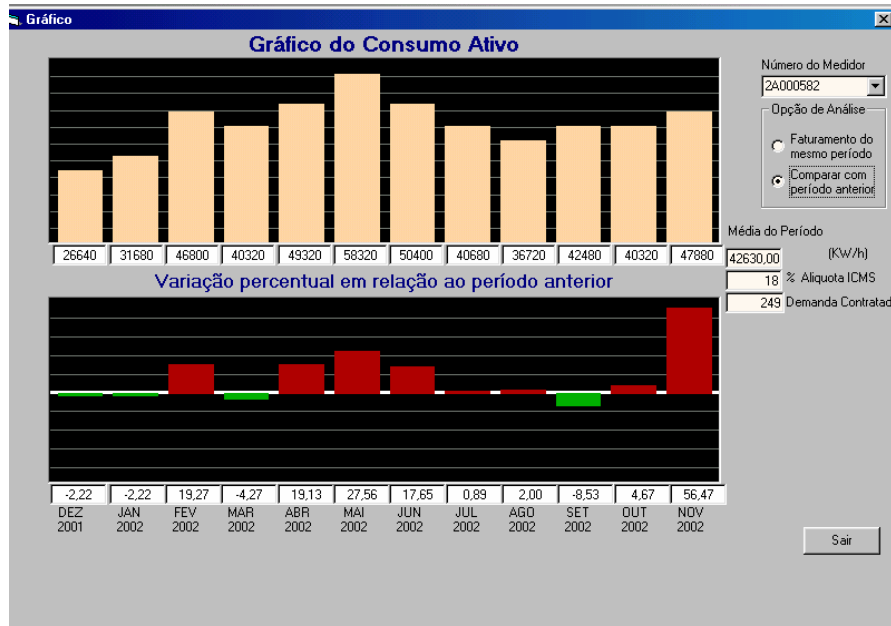


Fig. 7 – Comparação do gráfico de análise do consumo de energia ativa com o período anterior

A Figura 8 mostra o desempenho da demanda (kW) e seu faturamento durante o período de dezembro 2001 a novembro 2002.

Pode ser observado um aumento de demanda no mês de novembro/2002, ficando a mesma 18% acima da contratada, conforme mostra a Figura 8. Isto acarretou em uma multa por ultrapassagem.

Na Figura 9, em comparação com o ano de 2001, em 2002 a demanda praticamente se manteve ficando só o mês de novembro com um valor elevado.

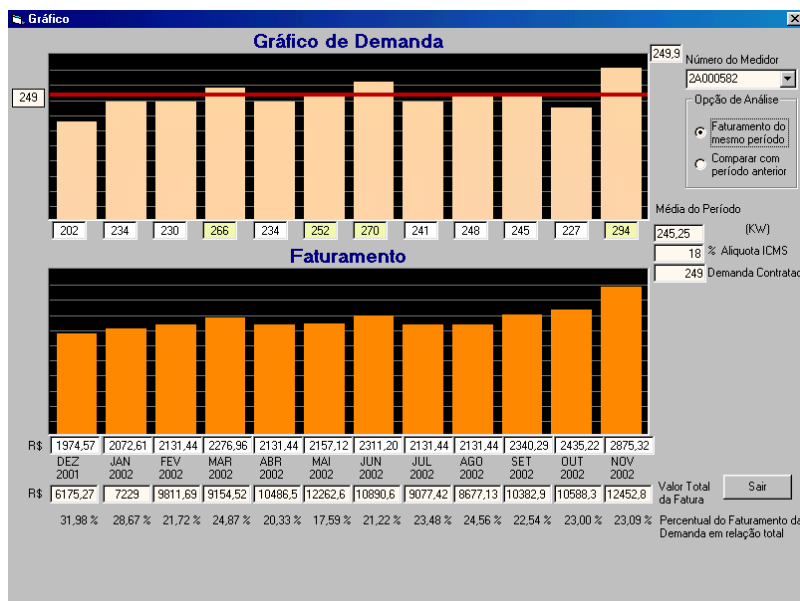


Fig. 8– Gráfico de análise da demanda

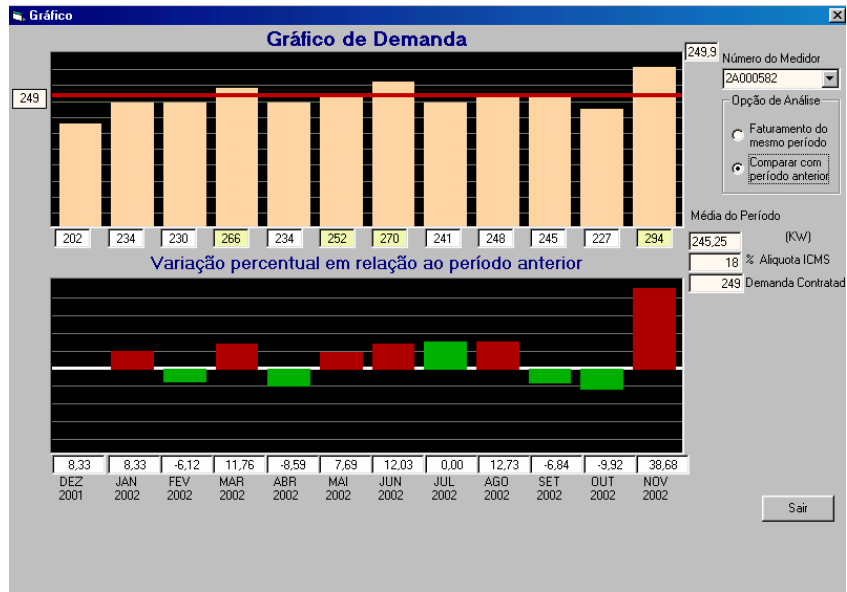


Fig. 9 – Comparação do gráfico de análise demanda com o período anterior

Na Figura 10 foi feita um avaliação do fator de potência da instalação. Somente no mês de novembro de 2002 o mesmo se manteve abaixo do mínimo exigido ou seja, 89,50%.

Comparando com o período anterior, houve uma diminuição no fator de potência nos meses de setembro e outubro, conforme mostra a Figura 11.



Fig. 10 – Gráfico de análise do fator de potência

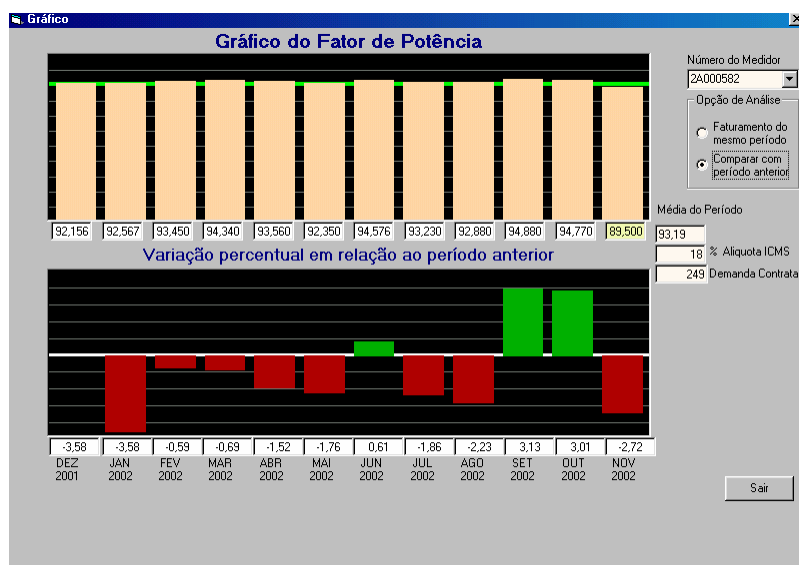


Fig. 11 – Comparação do gráfico de fator de potência com o período anterior

4.4 Valores Recuperados Pelo ICMS

A Tabela 10 mostra a economia de energia no período de um (01) ano, com a recuperação do ICMS em forma de crédito.

Tabela 10– Valores das contas de energia da indústria no período de 12 meses

Período 2001	Valor conta	Valor ICMS Recuperado R\$	Valor ICMS Recuperado U\$	% Valor Conta	Dólar do mês
Janeiro	5.973,75	1.034,70	530.34	20,95	1,951
Fevereiro	6.850,96	1.228,25	616.90	21,84	1,991
Março	7.191,50	1.280,94	627.60	21,67	2,041
Abril	7.178,54	1.292,13	600.15	21,95	2,153
Mai	7.624,31	1.353,93	614.03	21,59	2,205
Junho	7.283,77	1.301,24	546.28	21,75	2,382
Julho	6.976,60	1.245,95	538.91	21,74	2,312
Agosto	6.418,55	1.119,68	448.77	21,13	2,495
Setembro	8.505,77	1.569,49	611.89	22,62	2,565
Outubro	7.673,46	1.419,68	529.93	22,70	2,679
Novembro	6.459,45	1.148,34	429.29	21,62	2,675
Dezembro	6.095,42	1.030,08	419.93	20,33	2,453
TOTAL	83.872,08	15.024,41	6,514.02	21,66	

4.5 – Análise dos Resultados e Conclusões Parciais

A análise das contas de energia para eficiência energética, é através do programa no qual nos mostrará as condições reais da indústria na questão dos aspectos relacionados ao consumo e demanda de energia elétrica da indústria metalúrgica. Observou-se que houve um consumo quase que constante no período, e a demanda teve um aumento em torno de 18% no mês de novembro, acarretando uma multa devido ao consumo e demanda de energia reativa excedente.

O fator de potência ficou abaixo da norma no mês de novembro, acarretando multa devido o consumo e demanda de energia reativa excedentes.

Na recuperação dos valores pelo ICMS, constatou-se um ganho expressivo no final de um ano, em torno de U\$\$ 6,514.02 equivalente a dois meses de consumo da indústria no período analisado.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA PLANTA INDUSTRIAL

5.1 – Introdução

Com o objetivo de analisar o desempenho das instalações elétricas da indústria, foram realizadas várias medições tanto na entrada da alta tensão quanto nos alimentadores da baixa tensão, visando principalmente, observar eventuais ocorrências de fenômenos que interferem no bom desempenho do sistema elétrico da indústria. São apresentados os resultados das medições das correntes e das tensões nos barramentos pré-determinados da indústria, com o objetivo de avaliar a conformidade do sistema. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos e tabelas.

5.2 – Procedimentos Experimentais

As medições e as análises decorrentes são direcionadas no sentido de se obter:

? A qualidade das tensões de entrada fornecidas pela concessionária local, através de medições no lado da alta tensão, utilizando os Tp's existentes na cabina de entrada de energia elétrica, observando principalmente os afundamentos momentâneos (sag's), as elevações momentâneas de tensão (swell), os transitórios de chaveamentos e de manobras;

? Avaliação dos níveis de distorções harmônicas das tensões e das correntes no lado da alta tensão e nos barramentos escolhidos, bem como outros fenômenos que possam ocorrer;

? Avaliar, quantificar e sugerir quais são os procedimentos que deverão ser tomados para controlar o desperdício de energia elétrica;

? Orientar sobre o uso racional da energia elétrica, atuando na substituição de equipamentos e dispositivos pelos mais eficientes;

? Ajustes do sistema tarifário praticado pela indústria.

A Figura 12 mostra o diagrama unifilar da indústria com os circuitos de distribuição que suprem potência para os diferentes quadros de acionamento, comando e proteção do setor de produção.

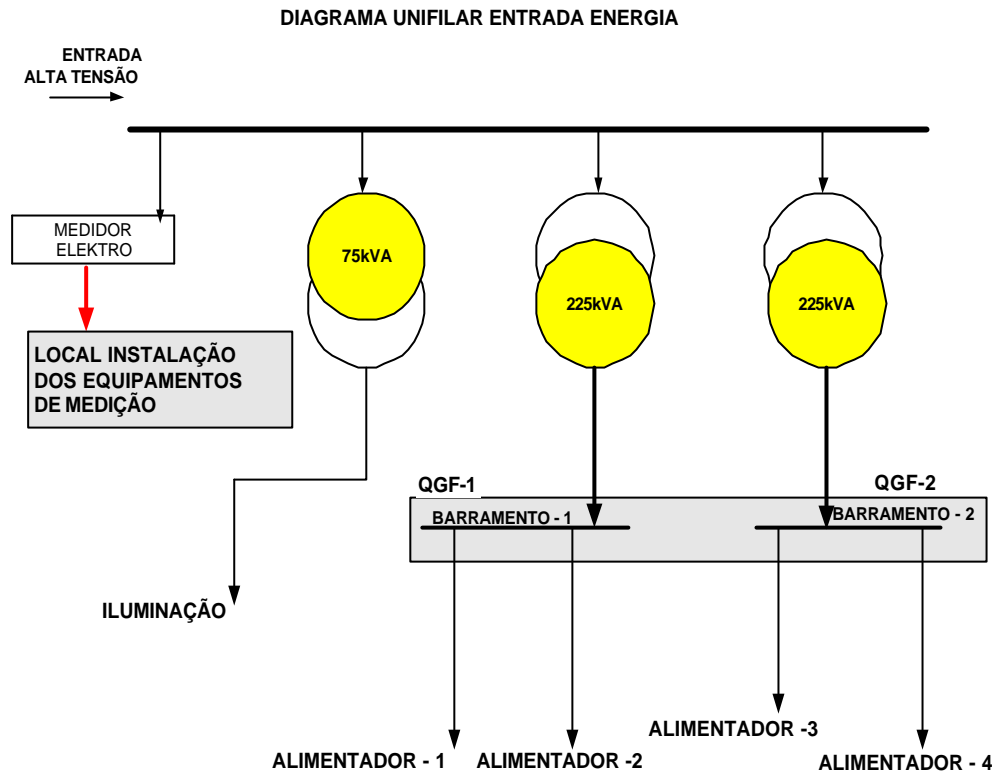


Fig. 12 – Diagrama unifilar da indústria metalúrgica

Todas as medidas serão conduzidas com a utilização dos seguintes equipamentos:

- a) SAGA-4000 – Modelo 1380 - Analisador de Grandezas Elétricas;
- b) FLUKE - modelo 41B - Power Harmonics Analyzer

Grandezas a serem monitoradas:

- Frequência - Hz;
- Tensões eficazes de linha e de fase - V;
- Correntes eficazes de linha e de fase - A;
- Potência Ativa por fase e a trifásica – W;
- Potência Reativa (VAr) por fase e a trifásica sem Harmônicos - Qsh
- Potência Reativa (VAr) por fase e a trifásica com Harmônicos – Qch
- Fator de potência por fase e o trifásico distorcido;
- Potência Aparente trifásica (VA) – S;
- Distorções Harmônicas de Tensão – DTHT;

- Distorções Harmônicas de Corrente – DIHT

5.3 – Resultados das Medições

5.3.1 – Lado da Alta Tensão – “Medição no Alimentador de Entrada”

5.3.1.1 - Tensões de Linha

Os valores eficazes das tensões de linha obtidas no lado da alta tensão, são mostrados nas Tabelas 11 e 12, durante 7 (sete) dias de amostragem. A Tabela 5 na página 21, apresenta os valores máximos e mínimos normatizados.

Tabela 11 – Tensões eficazes de linha

V_{AB} = tensão eficaz na fase (V)	V_{CB} = tensão eficaz fase (V)
13.387,80	13.376,90

Tabela 12 – Valores eficazes máximos e mínimos das tensões de linha

Tensões de linha	Valor Máximo (V)	Valor Mínimo (V)
V_{AB} = tensão eficaz na fase	14.002,5	13.177,5
V_{CB} = tensão eficaz na fase	14.205,0	13.260,0

O oscilograma da Figura 13 mostra os valores eficazes das tensões para o período de sete dias de amostragem.

Verificou-se que a tensão eficaz de linha da fase A está entre 95,5% a 101,47% e a fase C está entre 96% a 102,94%, portanto dentro dos parâmetros estabelecidos pela ANEEL.

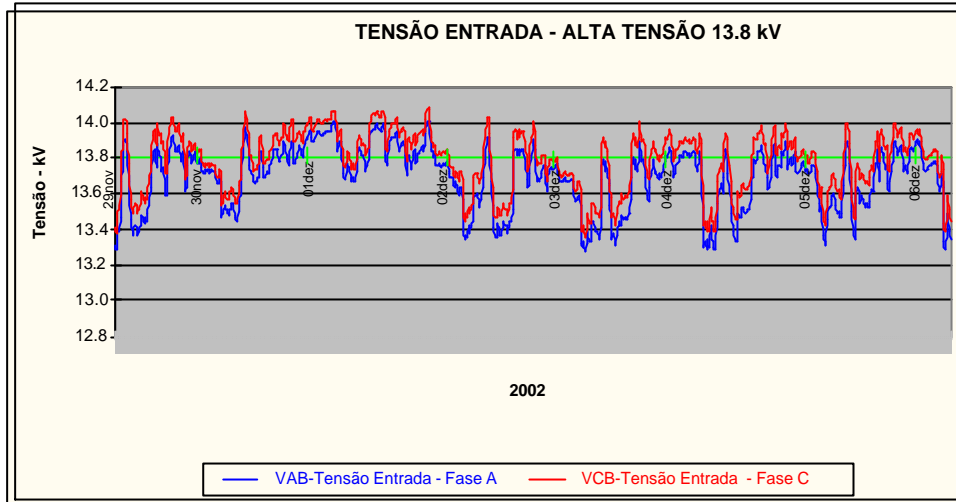
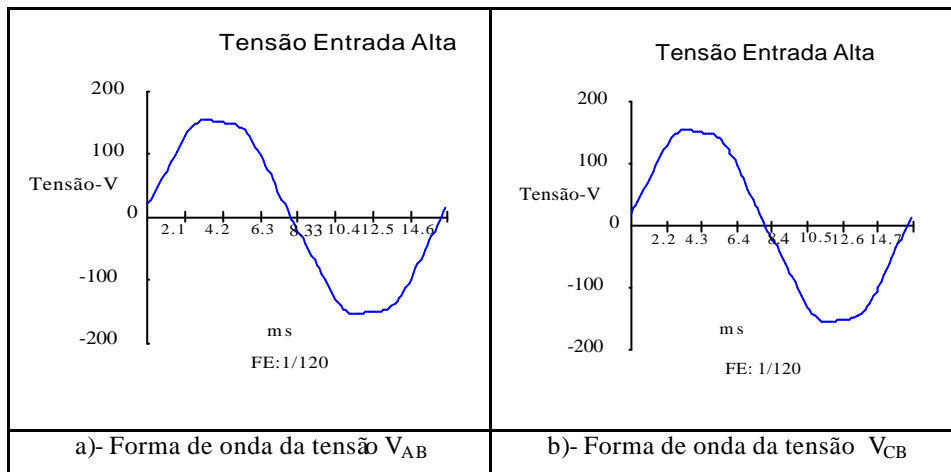


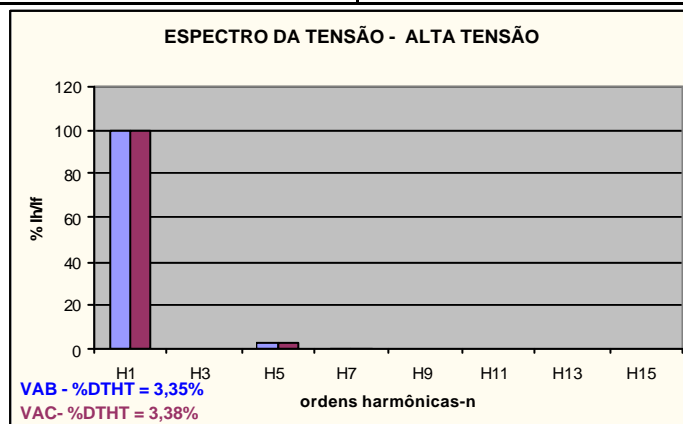
Fig. 13 – Oscilograma dos valores eficazes das tensões de linha- período: 29/11/02 a 06/12/2002

As Figuras 14(a) e 14(b) mostram as formas de ondas das tensões de linha V_{AB} e V_{CB} . Foram obtidas do lado da alta tensão nos terminais dos TP's, cuja relação de transformação é 1:120.



a)- Forma de onda da tensão V_{AB}

b)- Forma de onda da tensão V_{CB}



c) – Espectro harmônico das tensões de Linha

Fig. 14 – Formas de onda e respectivo espectros das tensões de linha

O espectro da Figura 14(c) mostra o conteúdo harmônico das tensões de linha analisadas. Pode ser observado que a distorção harmônica total (DTHT's) das mesmas não

ultrapassam 3,5% da fundamental, o que está em conformidade com os limites impostos pela norma IEEE-519-2 (ver Tabela 8 Capítulo III, pág. 47).

A Tabela 13 mostra as ordens harmônicas e suas respectivas amplitudes, bem como a distorção harmônica total para as tensões de linha referentes ao espectro da Figura 14(c).

Tabela 13 – Valores percentuais das distorções harmônicas das tensões eficazes de linha

Tensões de linha (kV)		%DTHT (individual)						%DTHT	
		3	5	7	9	11	13		15
V_{AB}	13.387,80	0,11	3,27	0,69	0,02	0,06	0,06	0,04	3,35
V_{CB}	13.376,90	0,12	3,29	0,71	0,05	0,08	0,06	0,01	3,38

5.3.1.2 – Correntes de Linha

A corrente de curto circuito simétrico I_{SC} , no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), fornecida pela concessionária de energia elétrica local é de:

$$I_{SC} = 2.299 \text{ A}$$

Os valores máximos e mínimos destas correntes estão na Tabela 14.

A relação de transformação dos TC's utilizados é de 15:5.

Tabela 14 – Valores máximos e mínimos das correntes de linha

Correntes de linha	Valor Máximo (A)	Valor Mínimo (A)
I_A	10,28	1,47
I_C	10,47	2,22

A Figura 15 apresenta o oscilograma dos valores eficazes das duas correntes de linha durante o período de amostragem de 7 dias.

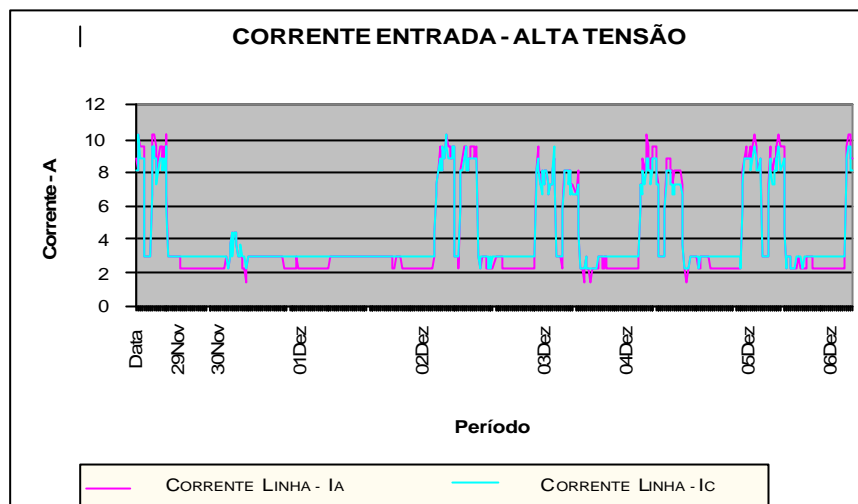


Fig.15 – Oscilograma dos valores eficazes das correntes de linha- período: 29/11/02 a 06/12/2002

As formas de onda das correntes I_A e I_C , obtidas do lado da alta tensão, são mostradas nas Figuras 16(a) e 16(b) respectivamente.

O conteúdo harmônico das correntes de linha I_A e I_C pode ser observado no espectro da Figura 16 (c). A taxa de distorção harmônica total (DITH), para as duas correntes, não ultrapassa 4,0%, o que está em conformidade com os limites impostos pela norma IEEE-519-2.

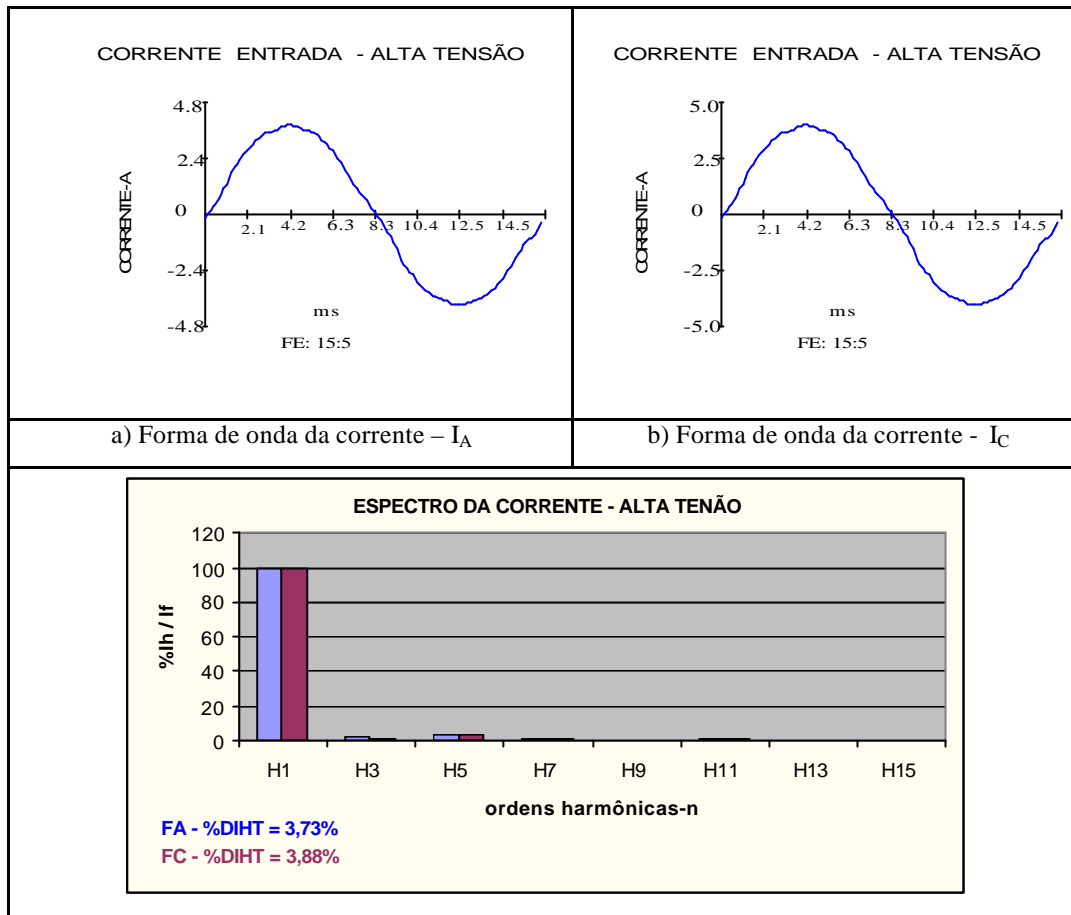


Fig.16 – Formas de onda e espectro harmônico das correntes de linha I_A e I_C

A Tabela 15 apresenta os valores das ordens harmônicas e suas respectivas amplitudes, bem como a distorção harmônica total.

Tabela 15 – Distorção harmônica individual e total das correntes de linha

Correntes eficazes de linha (A)		%DIHT _(individual)							%DIHT
		3	5	7	9	11	13	15	
I_A	14,10	1,38	3,37	0,96	0,18	0,74	0,38	0,05	3,88
I_C	17,30	1,56	2,84	1,32	0,31	1,18	0,11	0,04	3,73

Para efeito da análise de conformidade, de acordo com a norma IEEE-519, a seguir, é calculada a relação entre a corrente de ordem harmônica (I_h) e a corrente de carga I_L , com o objetivo de obter os limites máximos de distorção harmônica para ordens inferiores a 11ª ($h < 11$).

Aplicando esta relação, para as duas correntes de carga analisadas, resulta:

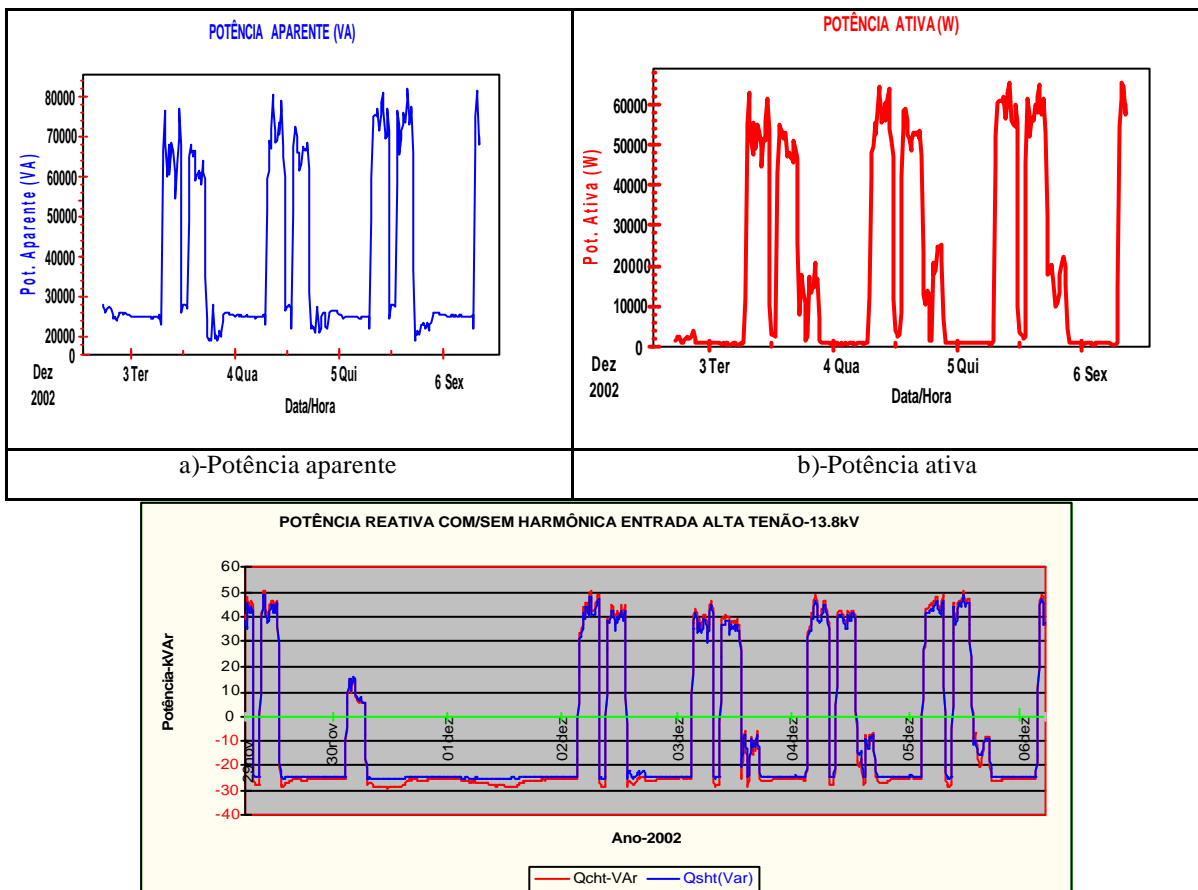
$$\frac{I_{SC}}{I_A} \approx \frac{2.299}{8,46} \approx 271,8 \qquad \frac{I_{SC}}{I_C} \approx \frac{2.299}{10,38} \approx 221,5$$

Pode ser observado que os valores da Tabela 15 estão abaixo dos limites recomendados pela norma citada (ver Tabela 9, página 33).

5.3.1.3 - Potências : Ativa – Reativa - Aparente

O comportamento das potências aparente e ativa, durante o período de amostragem entre os dias 29/11 a 06/12/02, pode ser observado nas Figuras 17(a) e 17 (b), respectivamente.

A influência da distorção harmônica pode ser observada na potência reativa, conforme mostra o gráfico da Figura 17(c). Nos períodos em que a demanda é baixa, os bancos de capacitores passam a atuar, o que de certa forma contribui para a amplificação da distorção das correntes.



c)– Potência reativa com e sem a influência das harmônicas.

Fig.17 – Comportamento das potências ativa, reativa e aparente medidas do lado da alta tensão

5.3.1.4 – Fator de Potência

A Figura 18 mostra o comportamento do fator de potência durante o intervalo de medição.

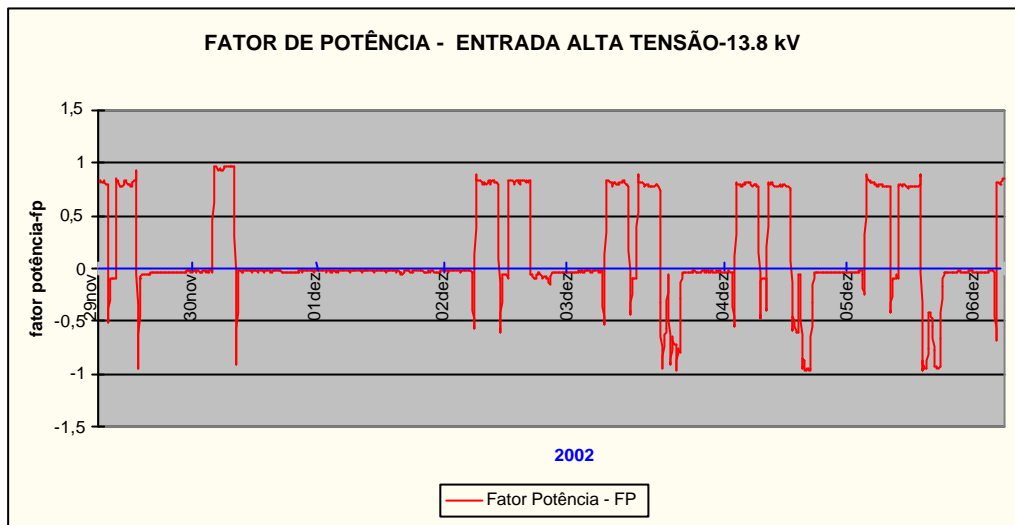


Fig. 18- Fator de potência lado da alta tensão

A Tabela 16 apresenta os valores máximos e mínimos do fator de potência. O fator de potência médio no período de 30/11/02 a 06/12/02 foi de aproximadamente 89%, o que não atende o estabelecido por Norma.

Tabela 16 – Valores máximos e mínimos do fator de potência

Fator de potência	Valor Máximo	Valor Mínimo
Cos? - Fase A	0,75	- 0,56
Cos? - Fase C	0,99	- 0,99
cos? - Total	0,98	- 0,92

5.3.2 – Lado da Baixa Tensão – “Medição das Tensões e Correntes nos Alimentadores”

Para verificar o comportamento das tensões e das correntes nos circuitos alimentadores dos quadros gerais de distribuição interno da indústria, foram realizadas medições nos barramentos de dois quadros gerais de distribuição. Os resultados são apresentados através de gráficos e tabelas a seguir.

As características gerais de carga destes dois quadros e suas respectivas descrições são também apresentadas a seguir.

QUADRO GERAL DE DISTRIBUIÇÃO Nº 1 – Deste quadro são derivados os circuitos alimentadores 1 e 2, os quais suprem potência para as máquinas de solda a ponto e tornos de comando numérico. A Figura 19 mostra o quadro.

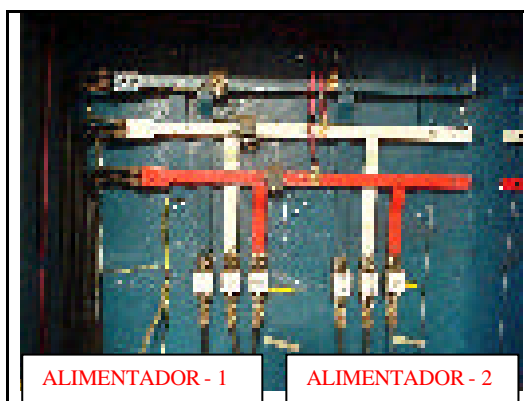


Fig. 19 – Quadro geral de distribuição nº 1

Este quadro é alimentado a partir do quadro geral de proteção da cabine transformadora através de um circuito trifásico de bitola $2 \times (3F \# 120\text{mm}^2)$ mais um condutor neutro de bitola $\# 120\text{mm}^2$. A proteção é feita através de uma chave tripolar blindada de 600 A, com fusíveis de 600 A, e abertura sob carga.

O gráfico da Figura 20 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases na entrada do barramento. O desbalanceamento das correntes das fases foi de aproximadamente 20%.

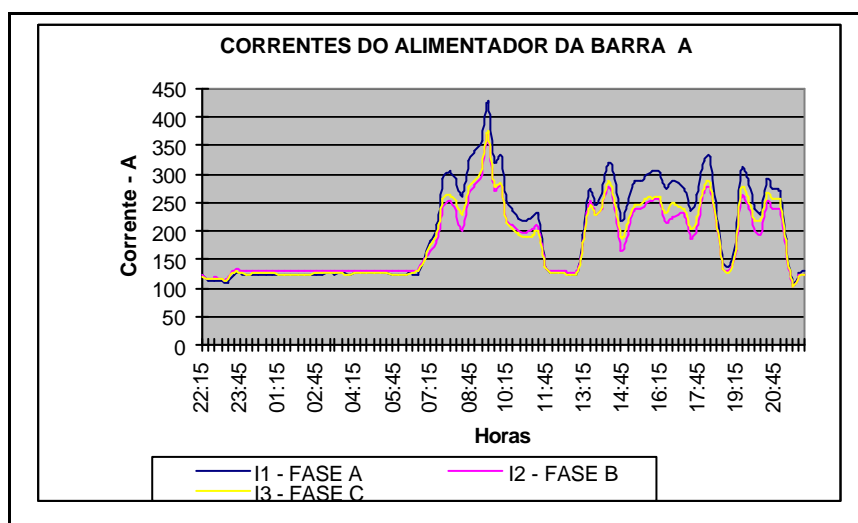


Fig. 20 - Comportamento do valor eficaz das três correntes de linha no barramento 1

Os gráficos das Figuras 21(a) e 21(b) mostram a forma de onda da corrente e o respectivo espectro harmônico para a fase A do barramento na condição de plena carga.

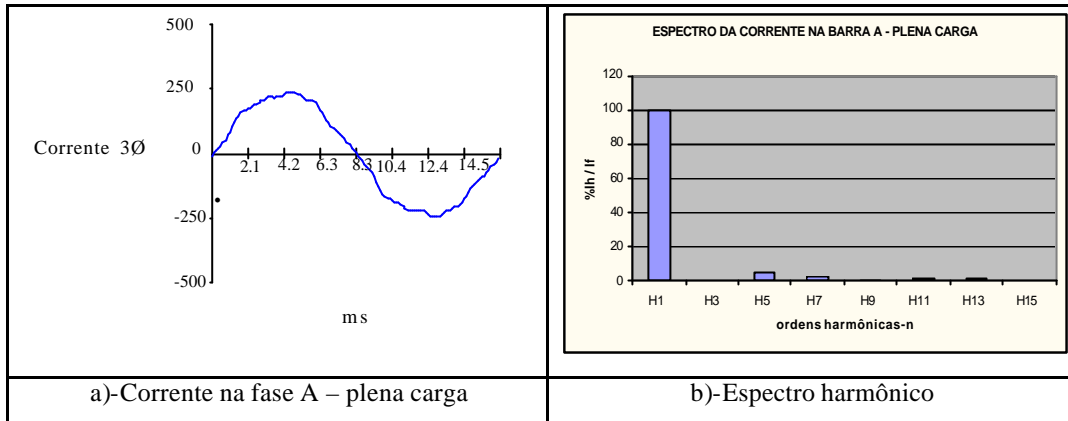


Fig. 21 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do barramento 1 – plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DIHT = 2,89\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Fora do horário de plena produção da industria ou seja, no período noturno onde a mesma é reduzida, foram realizadas medições e os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 22(a) e 22(b).

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 14,89\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

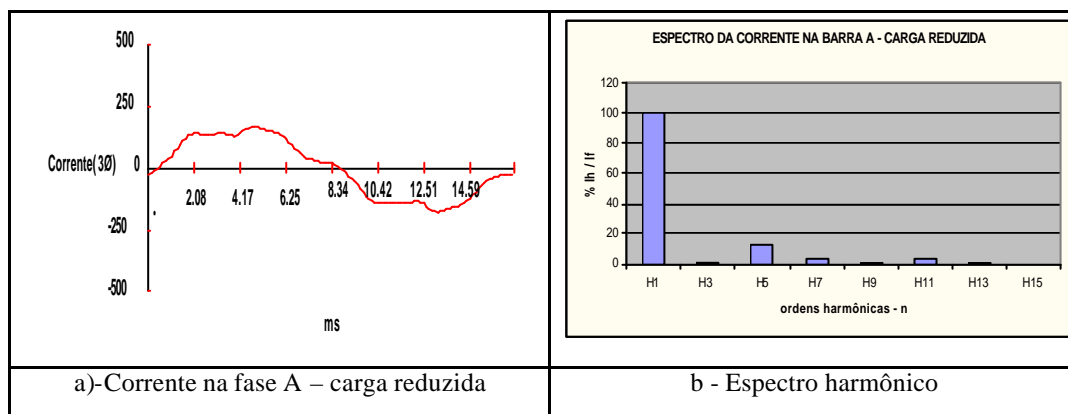


Fig.22 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do barramento 1 – carga reduzida

O gráfico da Figura 23 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases na entrada do barramento. O desbalanceamento das tensões das fases foi de aproximadamente 1%.

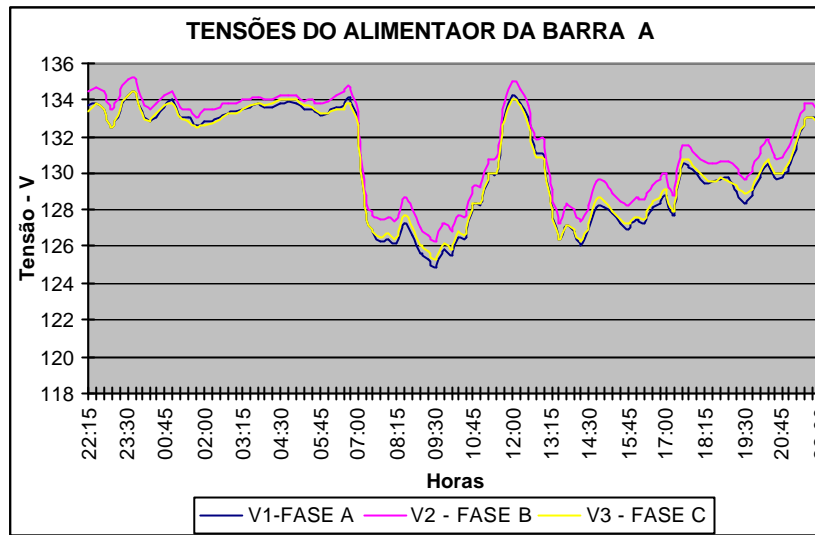


Fig. 23 - Comportamento do valor eficaz das três tensões de linha no barramento 1

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 6,48\%$ e na 3ª ordem é de $8,25\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

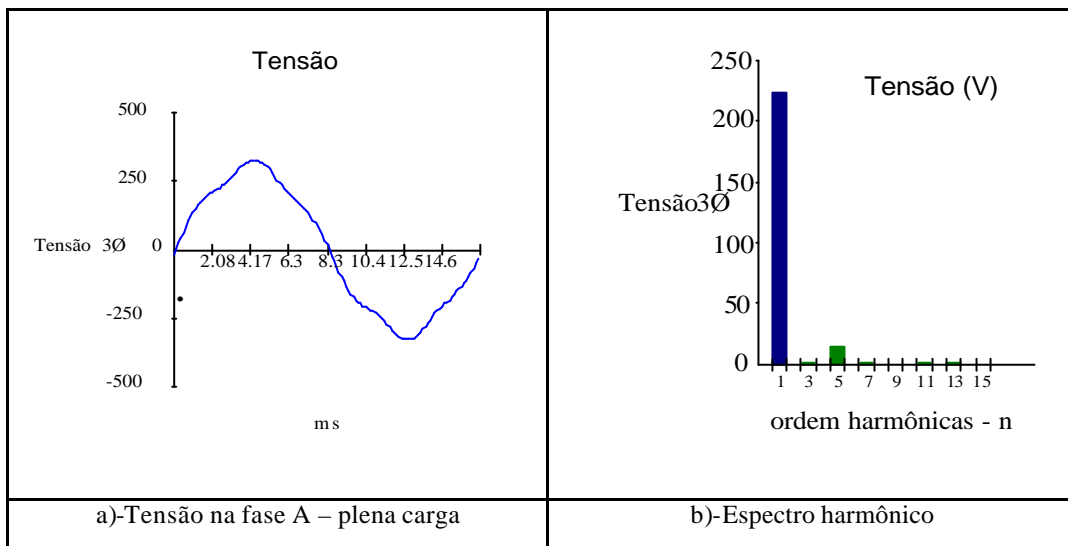


Fig.24 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do barramento 1

A Figura 25 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção ou seja, com plena carga e carga reduzida.

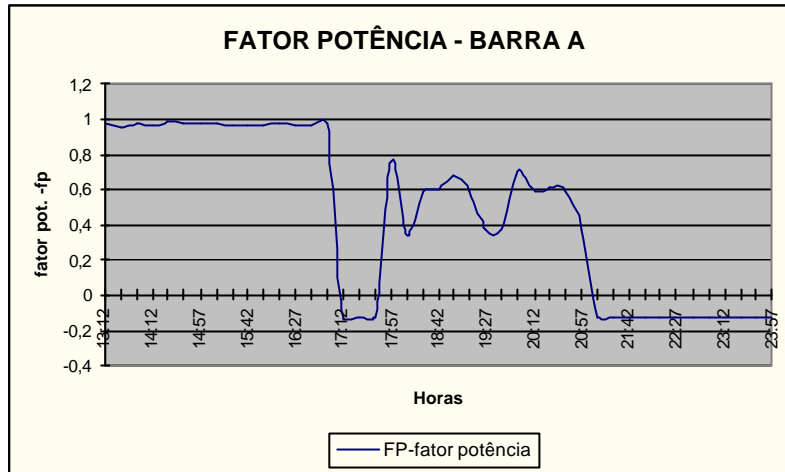


Fig. 25 – Comportamento do fator de potência - fase A do barramento 1

O banco fixo de capacitores que está conectado ao barramento é de 87,5kVAr. Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 78%.

Há uma injeção de reativos capacitivos excedentes nos períodos noturno e finais de semana.

QUADRO GERAL DE DISTRIBUIÇÃO Nº 2: Deste barramento, são derivados os circuitos alimentadores 3 e 4, os quais suprem energia para as máquinas de solda a ponto e prensas hidráulicas . A Figura 26 mostra detalhes deste quadro.

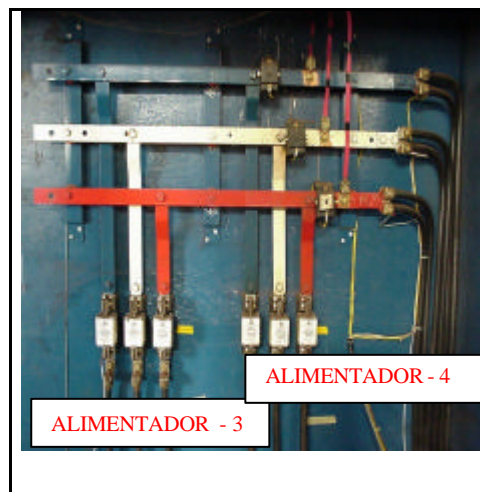


Fig. 26 – Quadro geral de distribuição nº 2

Este quadro é alimentado a partir do quadro geral de proteção da cabine transformadora através de um circuito trifásico de bitola $2 \times (3F \# 120\text{mm}^2)$ mais um condutor neutro de bitola $\# 120\text{mm}^2$. A proteção é feita através de uma chave tripolar blindada de 600 A, com fusíveis de 600 A, e abertura sob carga.

O gráfico da Figura 27 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente 7%.

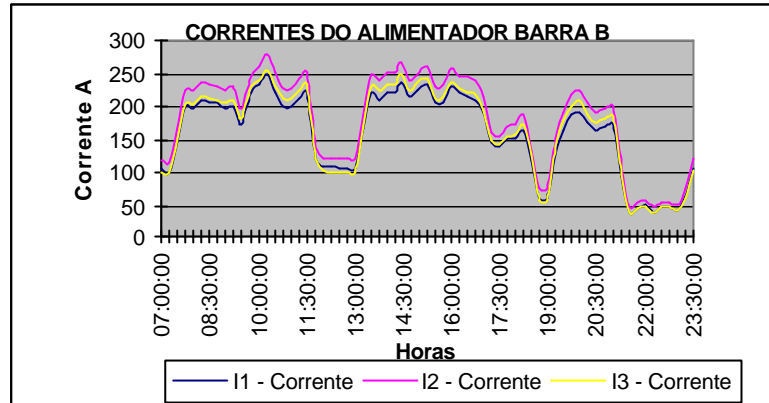


Fig. 27 - Comportamento do valor eficaz das três correntes de linha no barramento 2

Os gráficos das Figuras 28(a) e 28(b) mostram a forma de onda da corrente e o respectivo espectro harmônico para a fase A do barramento, na condição de plena carga.

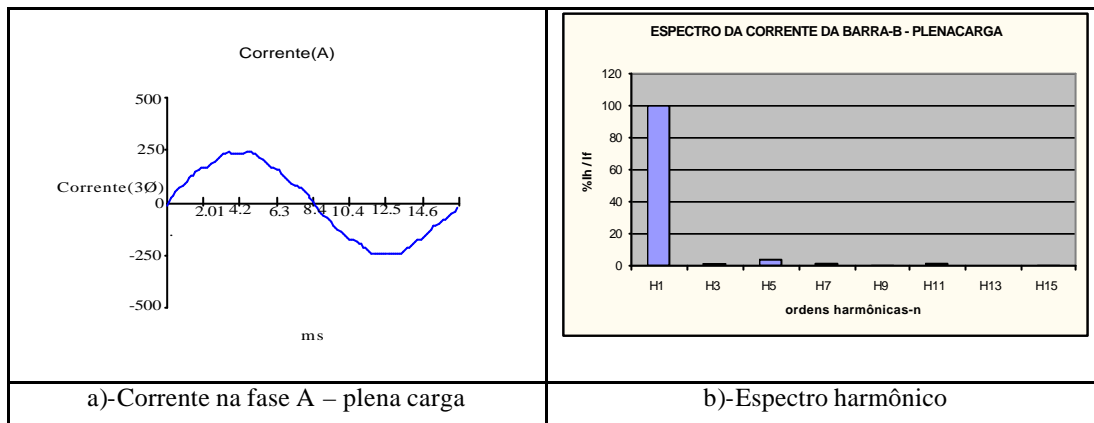


Fig. 28 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do barramento 2 - plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DIHT = 4,02\%$, e na 5ª ordem é de $4,09\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Como no caso anterior, foram feitas medições fora do horário de plena produção da indústria e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 29(a) e 29(b).

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 23,69\%$, e na 5ª ordem de $25,04\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

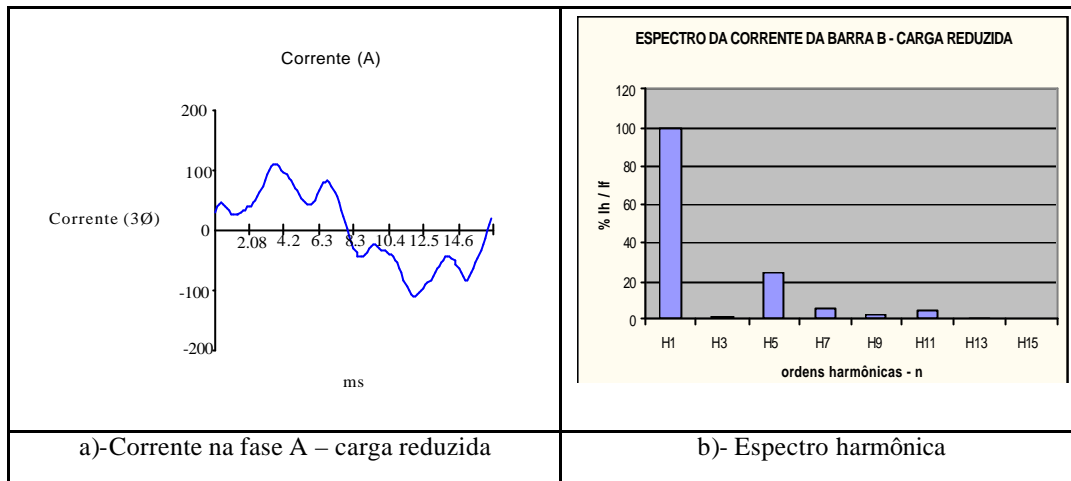


Fig.29 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do barramento 2 – carga reduzida

O gráfico da Figura 30 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente 0,7%.

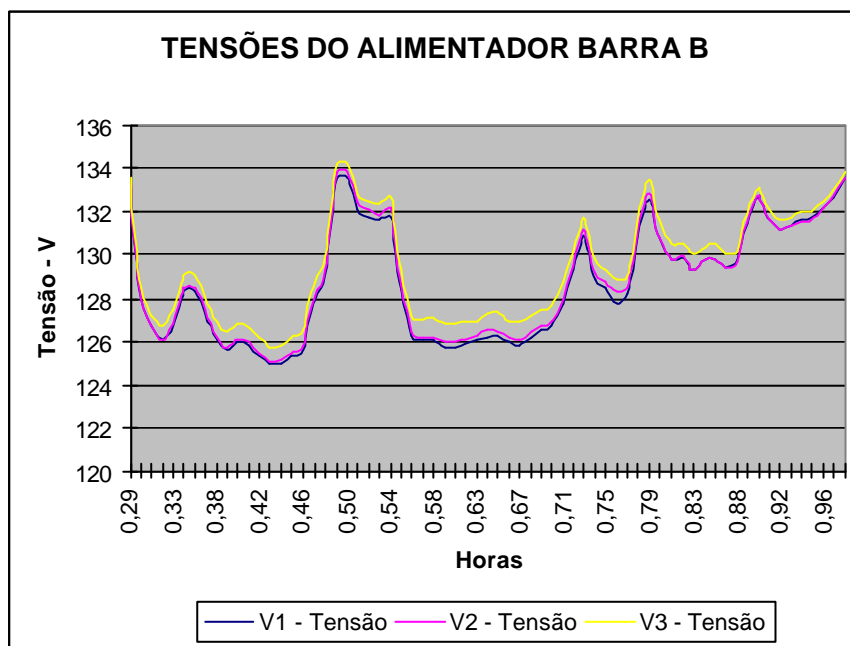


Fig. 30 - Comportamento do valor eficaz das três tensões de linha no barramento 2

Os gráficos das Figuras 31(a) e 31(b) mostram a forma de onda da tensão e respectivo espectro harmônico para a fase A do barramento 2, na condição de plena carga.

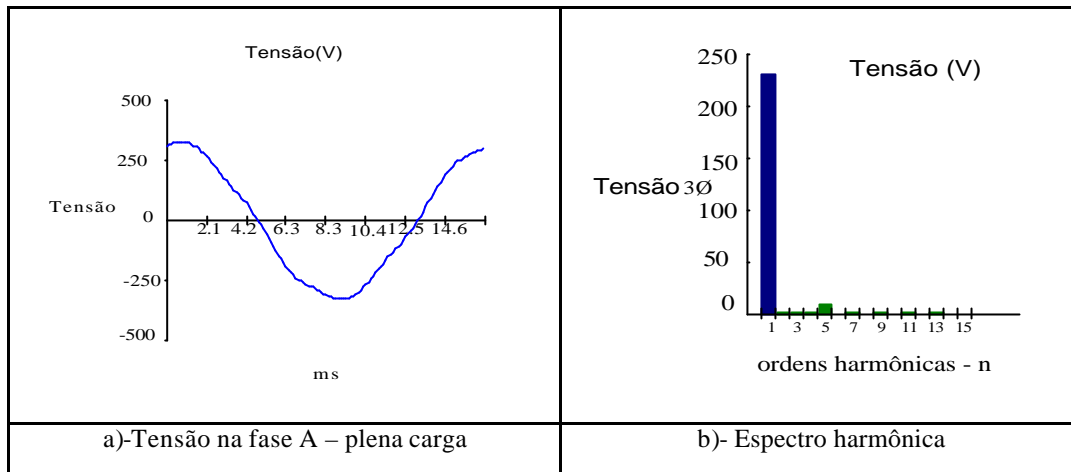


Fig.31 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do barramento 2

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 2,72\%$, e na 5ª ordem é de $3,25\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

A Figura 32 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção, ou seja, com plena carga e carga reduzida.

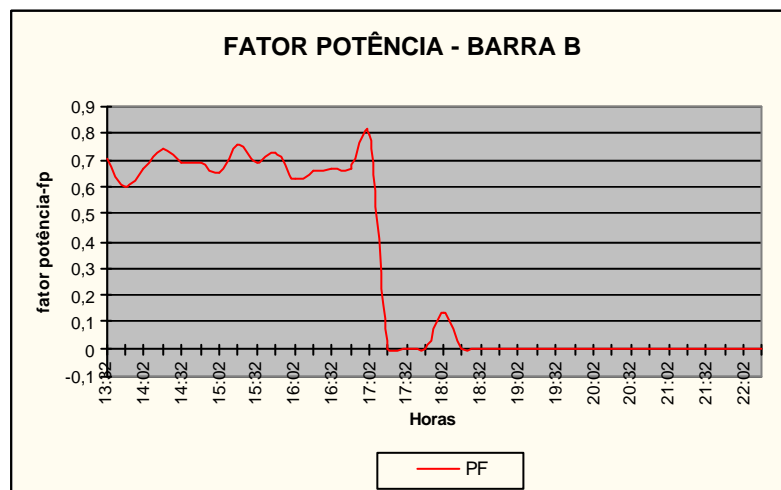


Fig. 32 – Comportamento do fator de potência - fase A do barramento 2

O banco fixo de capacitores que está conectado ao barramento é de 50 kVAr.

Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 54%. Há uma injeção de reativos capacitivos excedentes nos períodos noturno e finais de semana.

A seguir, foram realizadas medições nos quatro alimentadores e em particular, em

alguns equipamentos instalados nestes e no alimentador de iluminação.

a) ALIMENTADOR 1: Este Alimentador supre potência para as máquinas relacionadas na Tabela 17.

Este alimentador é composto por 3Fases # 120mm² e 1Neutro # 16mm², sendo protegido por uma chave tripolar NH 400, com fusível de 400A.

Tabela 17 – Equipamentos instalados no Alimentador 1

Item	Descrição	Potência – kW	Qtides.
01	Máquina Solda	8,60	17
02	Prensa Manual	4,48	02
03	Prensa Hidráulica	4,48	01
04	Torno Mecânico	6,44	01
04	Torno Mecânico	4,48	01
05	Talha Elétrica	1,04	03
06	Furadeira Bancada	0,55	02
07	Furadeira Manual	0,79	02
09	Lixadeira para Chassi	2,96	04
10	Compressores	6,64	01
11	Compressores	13,32	01
12	Compressores	16,67	02
13	Compressores	25,0	03

O gráfico da Figura 33 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases. O desbalanceamento apresentado entre as fases foi de aproximadamente de 3%.

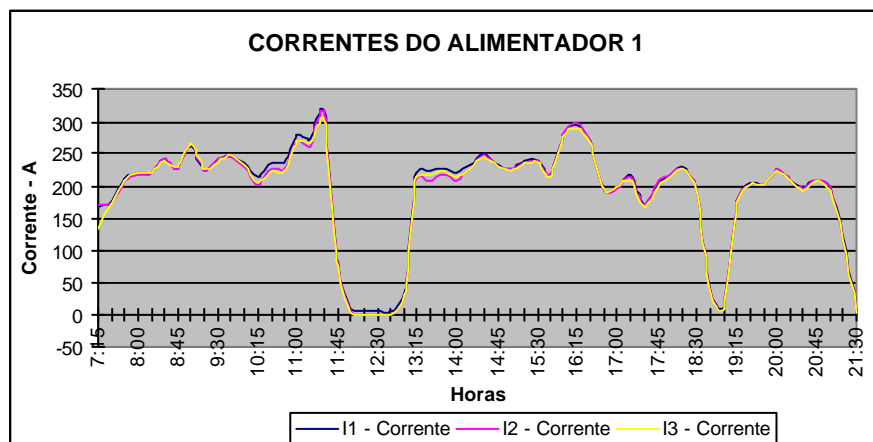


Fig. 33- Comportamento do valor eficaz das correntes do Alimentador 1

Os gráficos das Figuras 34(a) e 34(b) mostram a forma de onda da corrente e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 1, na condição de plena carga.

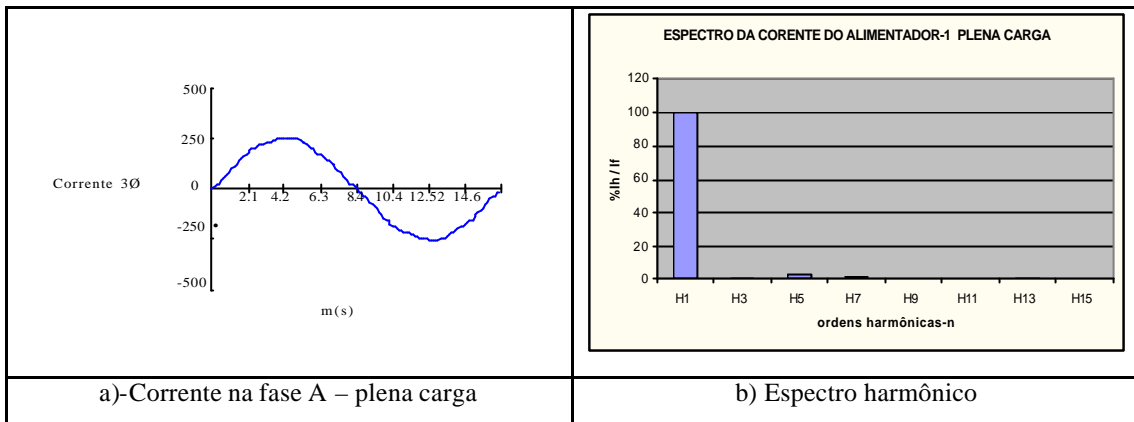


Fig.34 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 1 - plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga foi de aproximadamente DIHT = 9,33% e na 5ª ordem de 8,49%. Esta situação se repete para as fases B e C.

Como nos casos anteriores, foram feitas medições fora do horário de plena produção da indústria e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 35(a) e 35(b).

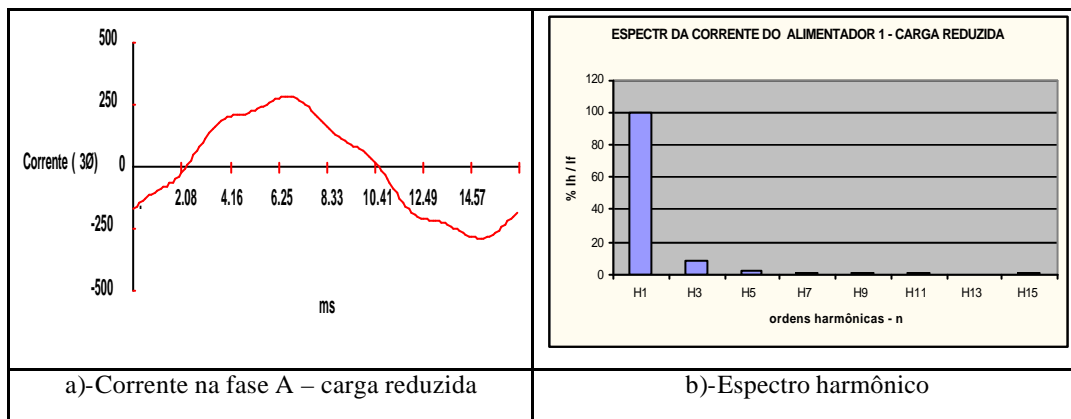


Fig.35 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 1- carga reduzida

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente DIHT = 8,45% e na 3ª ordem de 5,09%. Esta situação se repete para as fases B e C.

O gráfico da Figura 36 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente 0,9%.

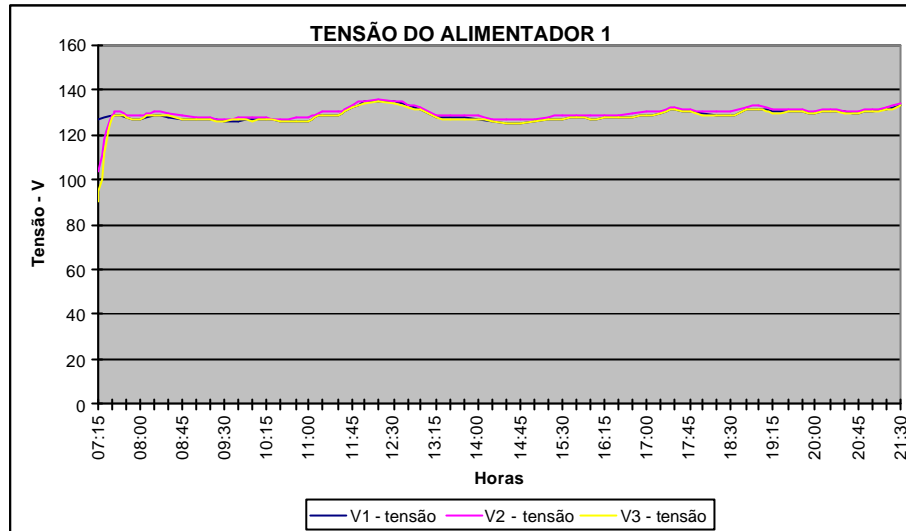


Fig. 36 - Comportamento do valor eficaz das três tensões do alimentador 1

Os gráficos das Figuras 37(a) e 37(b) mostram a forma de onda da tensão e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 1, na condição de plena carga.

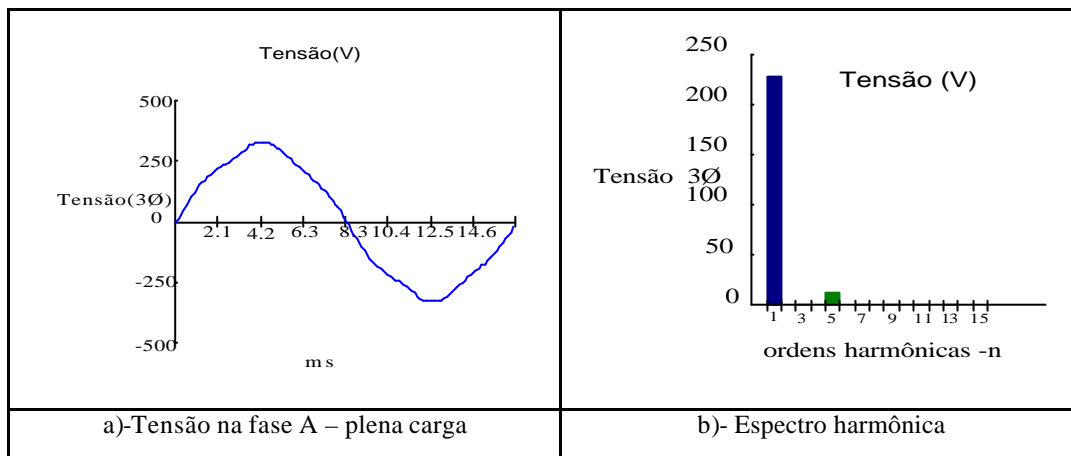


Fig.37 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do Alimentador 1– carga

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 4,89\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

A Figura 38 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção ou seja, plena carga e carga reduzida.

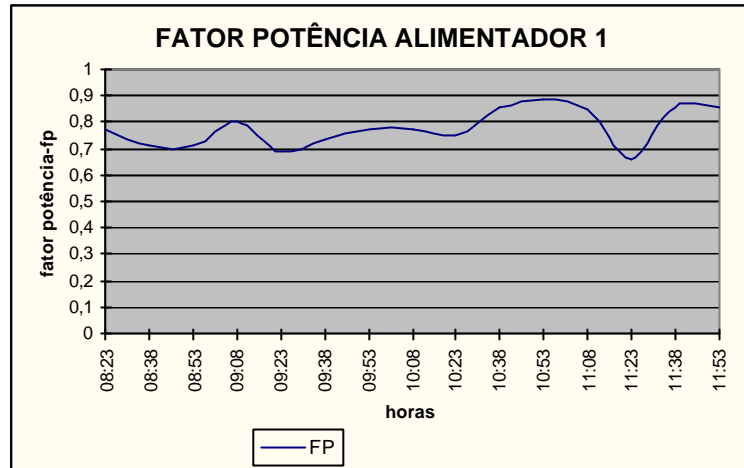


Fig. 38 – Comportamento do fator de potência do Alimentador 1

Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 71%, sendo que o mesmo encontra-se abaixo do exigido pela Norma. Devido ao grande número de máquinas de solda neste alimentador, já era previsto este baixo valor.

Entre os equipamentos supridos pelo alimentador 1, encontra-se a “**MÁQUINA SOLDA ESM-43**”. Para esta máquina, foram feitas medições para observar o seu comportamento e sua influência neste alimentador.

Os dados técnicos das máquinas de solda instaladas são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Dados técnicos dos modelos das máquinas de solda

MODELO: TMB 325-60HZ		MODELO: TRR 3100S –60HZ	
In soldagem	325 A	In soldagem	300 A
Vn soldagem	32,5 V	Vn soldagem	32,0 V
Fator Trabalho	60 %	Fator Trabalho	100 %
Tensão de circuito aberto mín.	18 V	Tensão de circuito aberto min.	16 V
Tensão de circuito aberto Max.	48 V	Tensão de circuito aberto max.	42 V
Frequência	60 Hz	Frequência	60 Hz
Tensão alimentação	220 V	Tensão alimentação	220 V
In alimentação	30 A	In alimentação	33 A
Potência aparente absorvida rede	11,5 kVA	Potência aparente absorvida rede	12,5 kVA
Classe isolamento	B	Classe isolamento	F

A Tabela 19 mostra os valores medidos e armazenados com equipamento FLUKE-41B.

Tabela 19 – Dados medidos máquina de solda

	Corrente	Tensão	Potência Ativa	4,12 Kw
RMS	13,56 A	205,1V	Potência Aparente	4,82 Kva
Pico	19,82A	300,6 V	Potência Reativa	- 2,10 kVAr
DIHT	12,46%		Fator de deslocamento)-(FP)	0,86
DTHT		3,99%	Cós (DPF)	0,89
			Fase	Atrasado de 27°

O gráfico da Figura 39(a) mostra o comportamento do valor eficaz da corrente na fase A quando a máquina encontra-se operando. O gráfico da Figura 39(b) mostra o respectivo espectro harmônico da corrente da fase A. A distorção harmônica total da corrente foi de DIHT = 12,46% e a distorção harmônica total da tensão foi de DTHT = 3,99% .

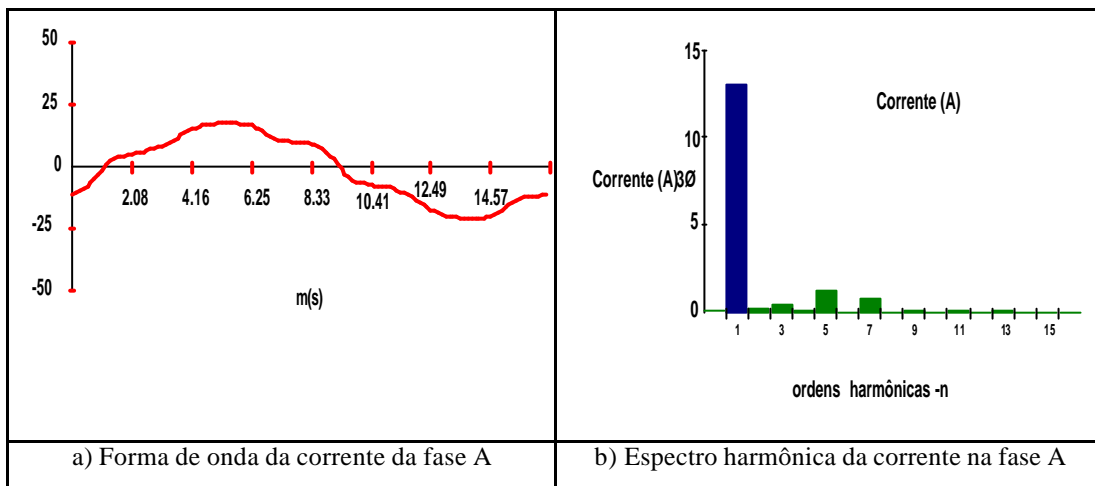


Fig. 39 - Forma de onda e respectivo espectro harmônica da corrente na fase A - máquina solda ESM-43 -

As ordens harmônicas presentes são as de 3^a , 5^a e 7^a . A harmônica de 5^a ordem apresenta um valor de 1,25% da fundamental, enquanto a de sétima ordem é de 0,75%. A harmônica de 3^a ordem é aquela que apresenta a menor amplitude entre as presentes, ou seja, é da ordem de 0,50% da fundamental.

As correntes nas outras duas fases apresentam comportamentos semelhantes.

b) ALIMENTADOR 2: Este Alimentador supre potência para as máquinas relacionadas na Tabela 20.

Este alimentador é composto por 3Fases # 120mm² e 1Neutro # 16mm², sendo protegido por uma chave tripolar NH 400, com fusível de 400A.

Tabela 20 – Equipamentos instalados no Alimentador 2

Item	Descrição	Potência – kW	Qtides.
01	Máquina Solda	8,6	02
02	Motores	2,96	03
03	Torno Mecânico	8,6	02
04	Torno Mecânico	2,96	02
05	Torno Mecânico	6,64	07
06	Talha Elétrica	1,04	06
07	Furadeira Bancada	0,55	02
08	Lixadeira para Chassi	1,85	01
09	Furadeira Coluna	2,96	02
10	Torno Comando Num.	13,32	02
11	Serra Fita	2,96	01
12	Plaina	4,48	01

O gráfico da Figura 40 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases. O desbalanceamento apresentado entre as fases foi de aproximadamente 25%.

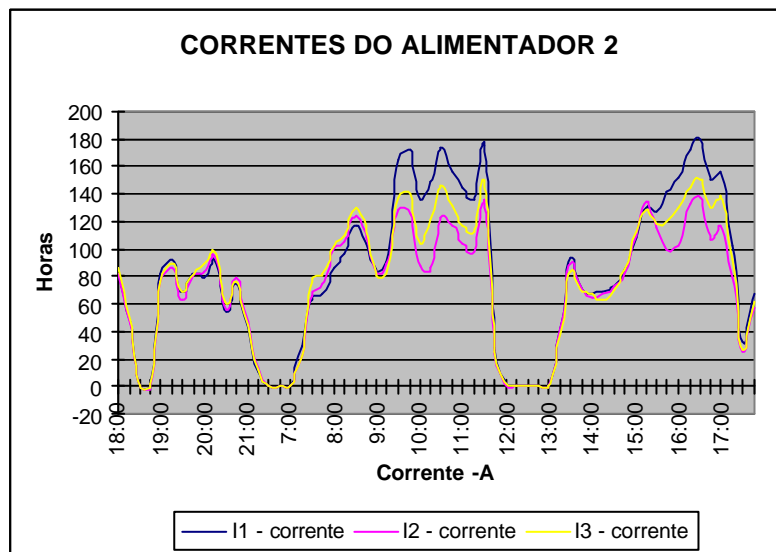


Fig. 40 - Comportamento do valor eficaz das correntes do Alimentador 2

Os gráficos das Figuras 41(a) e 41(b) mostram a forma de onda da corrente e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 2, na condição de plena carga.

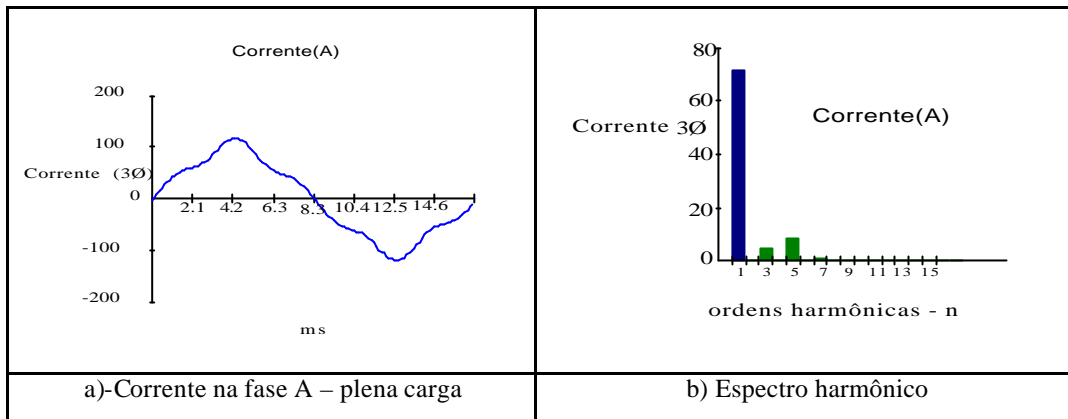


Fig.41 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 2- plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DIHT = 13,51\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Como nos casos anteriores, foram feitas medições fora do horário de plena produção da indústria e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 42(a) e 42(b).

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 14,69\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

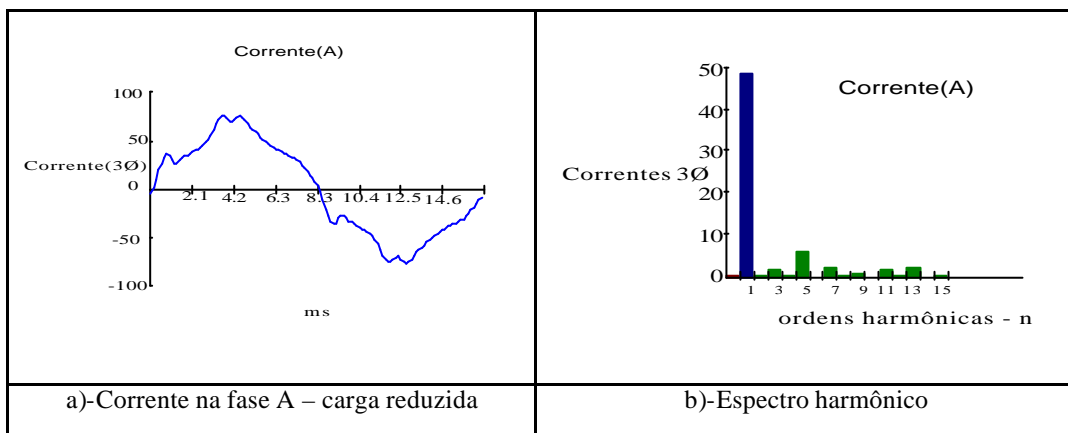


Fig.42 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 2- carga reduzida

O gráfico da Figura 43 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases do alimentador 2. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente 1,0%.

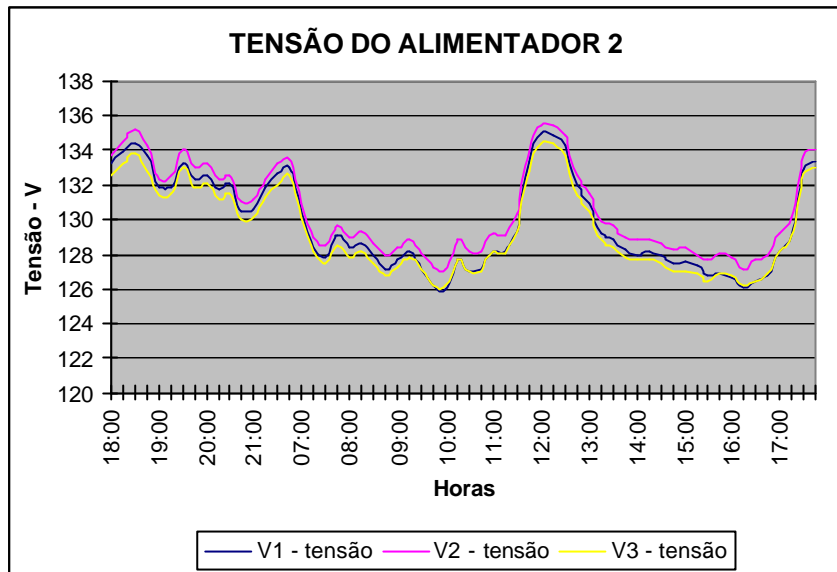


Fig. 43 - Comportamento do valor eficaz das três tensões do alimentador 2

Os gráficos das Figuras 44(a) e 44(b) mostram a forma de onda da tensão e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 2, na condição de plena carga.

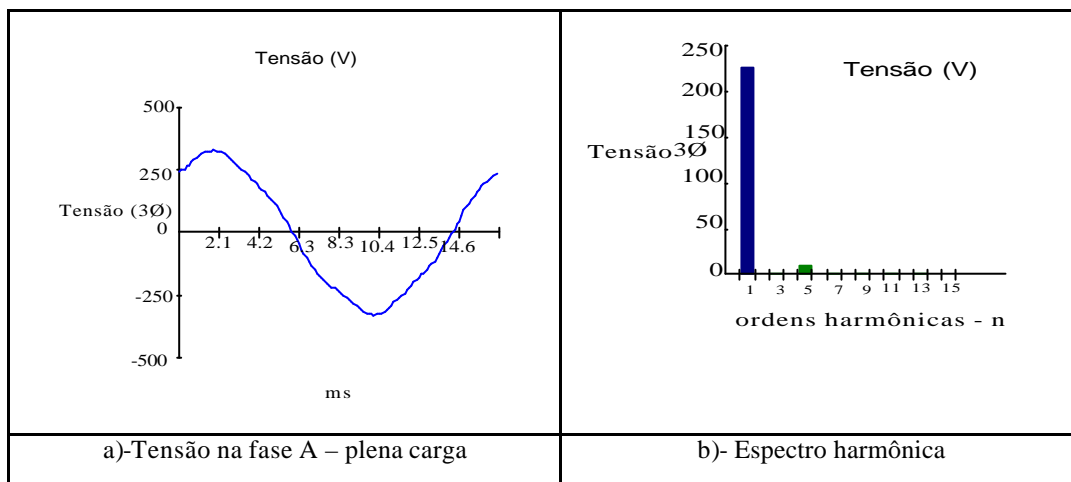


Fig.44 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do Alimentador 2– carga

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 4,26\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

A Figura 45 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção ou seja, plena carga e carga reduzida.

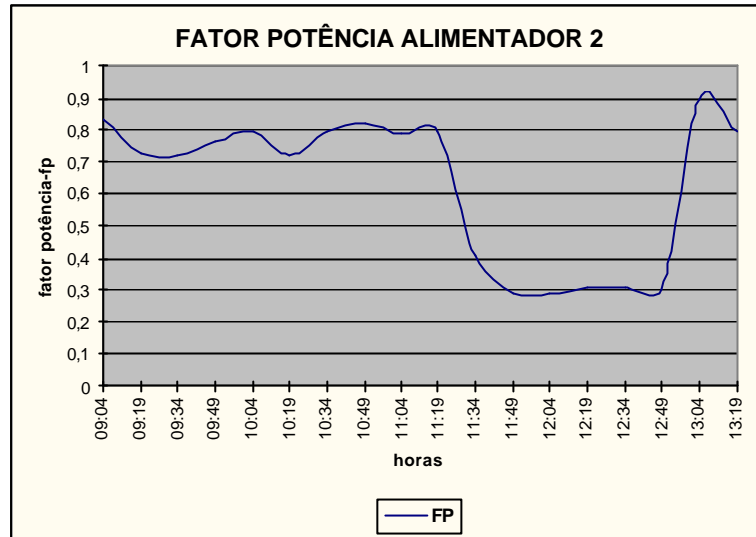


Fig. 45 – Comportamento do fator de potência do Alimentador 2

Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 57%, sendo que o mesmo encontra-se abaixo do exigido pela Norma. Devido ao grande número de máquinas de solda neste alimentador, já era previsto este baixo valor.

Entre os equipamentos supridos pelo alimentador 2, encontra-se a “**TORNO COMANDO NUMÉRICO T-2**”. Para este torno, foram feitas medições para observar o seu comportamento e sua influência neste alimentador. Os dados técnicos do torno de comando numérico são mostrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Dados técnicos dos modelos dos tornos de comandos numéricos utilizados, com alimentação 220V, frequência 60Hz e comando 110V.

Potência instalada	kW
Motor principal	6,64 / 4,48
Motor bomba para refrigeração de corte	0,55
Motor de lubrificação centralizada	0,32

A Tabela 22 mostra os valores medidos e armazenados com equipamento FLUKE-41B.

Tabela 22 – Dados medidos no torno de comando numérico

	Corrente	Tensão		
RMS	19,78 A	217,6 V	Potência Ativa	3,91 kW
Pico	26,69 A	316,6 V	Potência Aparente	7,45 kVA
DIHT	32,24 %		Potência Reativa	- 5,88 kVAr
DTHT		3,81 %	Fator de deslocamento) - (FP)	0,52
			Cós (DPF)	0,56
			Fase	Atrasado de 56°

O gráfico da Figura 46(a) mostra o comportamento do valor eficaz da corrente na fase A quando a máquina encontra-se operando. O gráfico da Figura 46(b) mostra o respectivo espectro harmônico da corrente da fase A. A distorção harmônica total foi de aproximadamente DIHT = 32,24%.

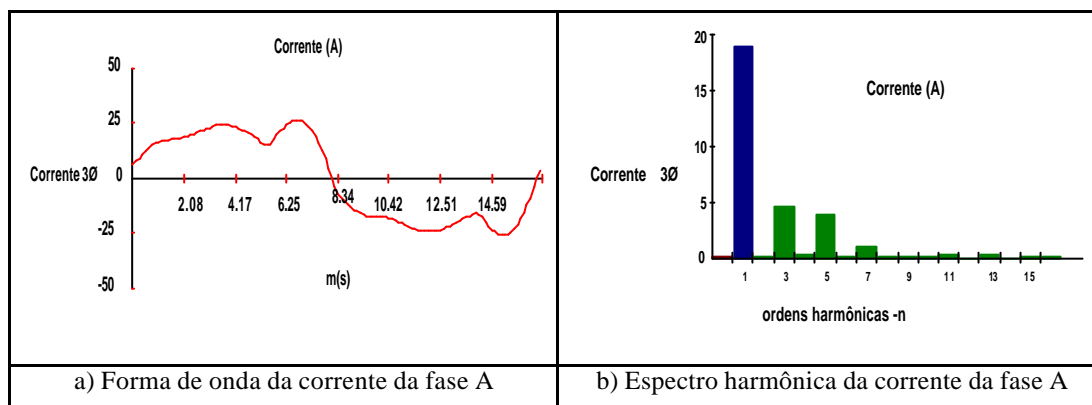


Fig. 46 - Forma de onda e respectivo espectro harmônica da corrente na fase A - torno de comando numérico

As ordens harmônicas presentes são as de 3ª , 5ª e 7ª . A harmônica de 3ª ordem apresenta um valor de 4,48% da fundamental, enquanto a de 5ª ordem é de 3,79%. A harmônica de 7ª ordem é aquela que apresenta a menor amplitude entre as presentes, ou seja, é da ordem de 1,07% da fundamental.

As correntes nas outras duas fases apresentam comportamentos semelhantes.

c) ALIMENTADOR 3: Este Alimentador supre potência para as máquinas relacionadas na Tabela 23.

Este alimentador é composto por 3Fases # 120mm² e 1Neutro # 16mm², sendo protegido por uma chave tripolar NH 400, com fusível de 400A.

Tabela 23 – Equipamentos instalados no Alimentador 3

Item	Descrição	Potência – kW	Qtides.
01	Máquina Solda	8,60	11
02	Prensa Viradeira	16,67	04
03	Prensa Excêntrica	16,67	01
04	Prensa Excêntrica	4,48	02
05	Prensa Excêntrica	6,64	01
06	Prensa Excêntrica	2,96	02
07	Prensa Excêntrica	1,85	01
08	Prensa Hidráulica	4,48	02
09	Prensa Hidráulica	2,96	01
10	Tesoura Mecânica	16,67	02
11	Tesoura Hidráulica	30,00	01
12	Tesoura Hidráulica	33,16	01
13	Talha Elétrica	1,04	03
14	Furadeira Bancada	0,55	01
15	Furadeira Coluna	2,96	01
16	Lixadeira para Chassi	2,96	05
17	Esmeril	0,55	02
18	Balancedora Eletrônica	2,96	01

O gráfico da Figura 47 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases. O desbalanceamento apresentado entre as fases foi de aproximadamente 5%.

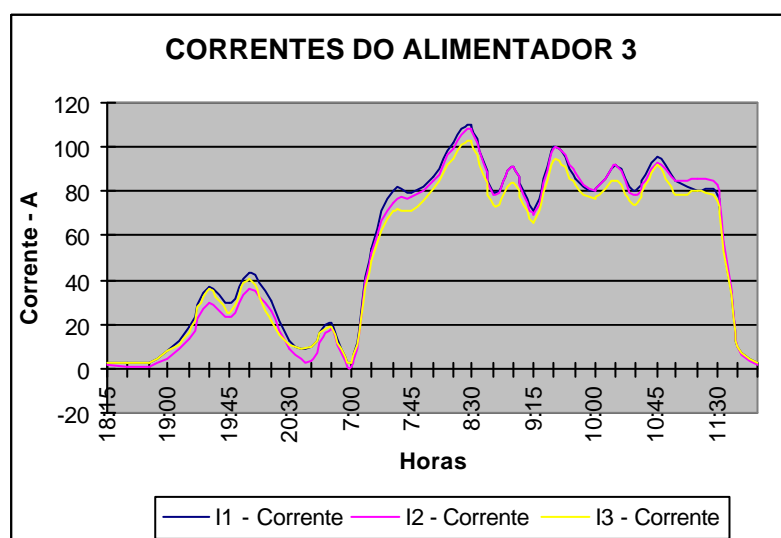


Fig. 47- Comportamento do valor eficaz das correntes do Alimentador 3

Os gráficos das Figuras 48(a) e 48(b) mostram a forma de onda da corrente e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 3, na condição de plena carga.

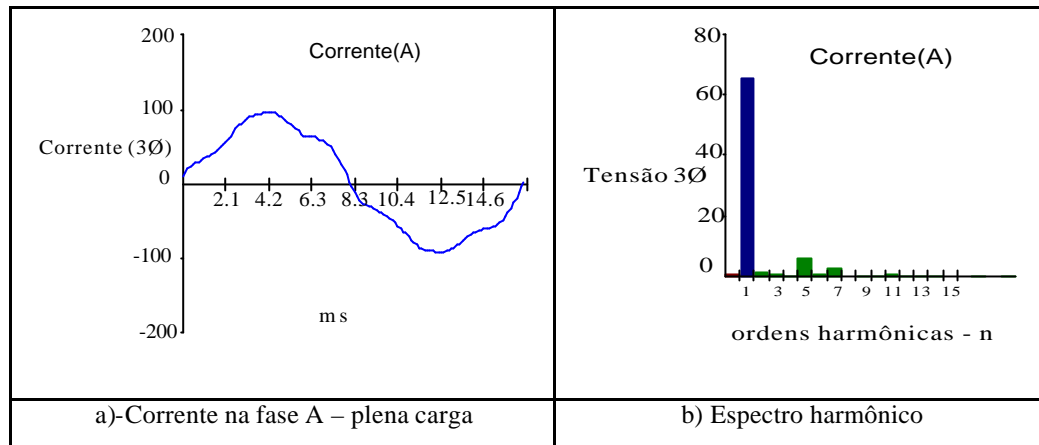


Fig.48 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 3- plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DIHT = 9,95\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Como nos casos anteriores, foram feitas medições fora do horário de plena produção da indústria e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 49(a) e 49(b).

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 7,30\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

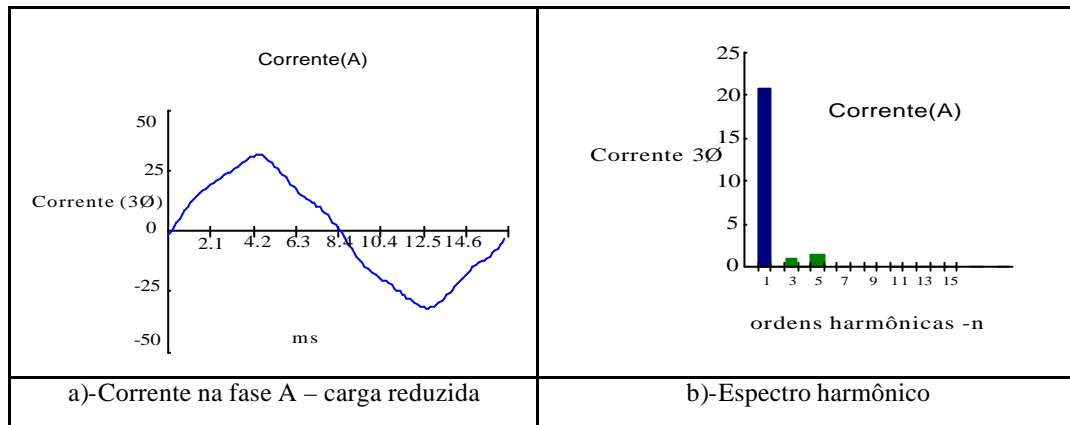


Fig.49- Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 3- carga reduzida

O gráfico da Figura 50 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases do alimentador 3. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente $0,2\%$.

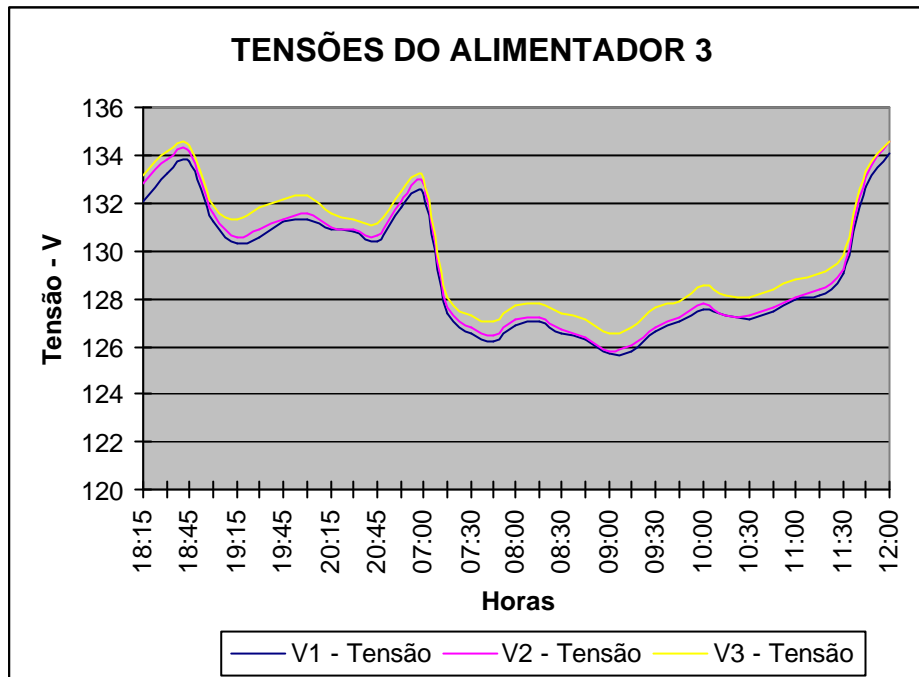


Fig. 50 - Comportamento do valor eficaz das três tensões do alimentador 3

Os gráficos das Figuras 51(a) e 51(b) mostram a forma de onda da tensão e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 3, na condição de plena carga.

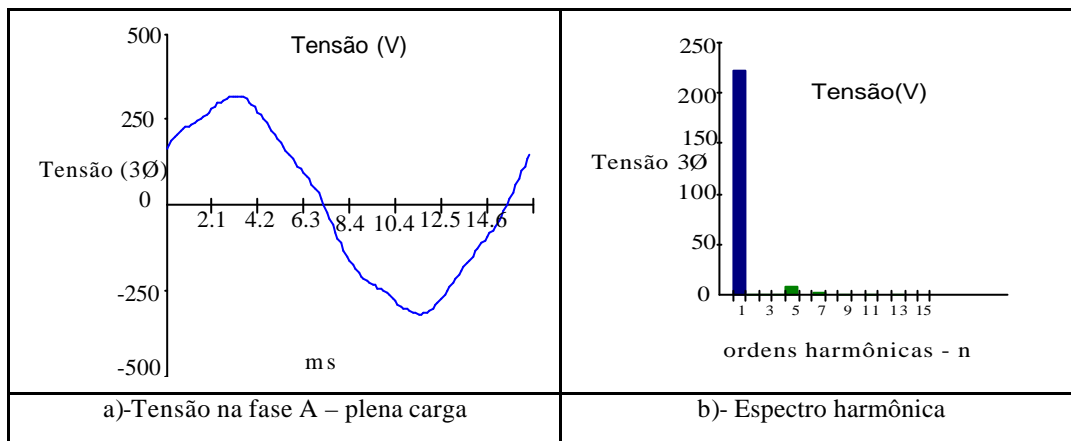


Fig.51 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do Alimentador 3– carga

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 5,53\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

A Figura 52 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção ou seja, plena carga e carga reduzida.

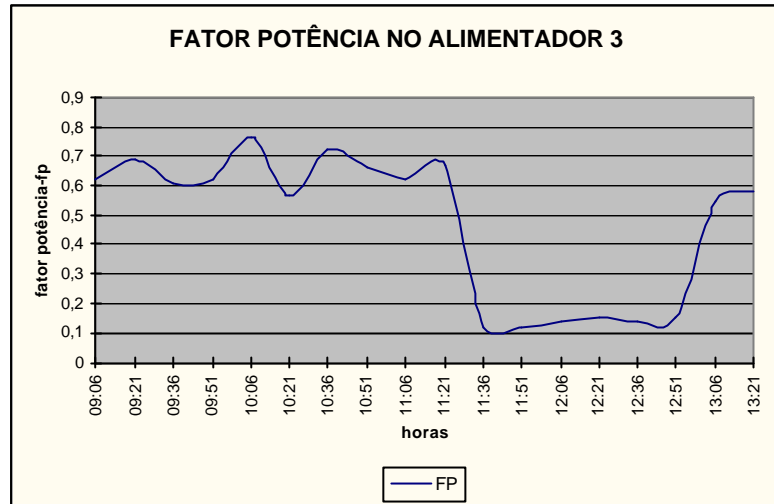


Fig. 52 – Comportamento do fator de potência do Alimentador 3

Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 48%, sendo que o mesmo encontra-se abaixo do exigido pela Norma. Devido ao grande número de máquinas de solda neste alimentador, já era previsto este baixo valor.

d) ALIMENTADOR 4: Este Alimentador supre potência para as máquinas relacionadas na Tabela 24.

Este alimentador é composto por 3Fases # 185mm² e 1Neutro # 16mm², sendo protegido por uma chave tripolar NH 400, com fusível de 400A.

Tabela 24 – Equipamentos instalados no Alimentador 4

Item	Descrição	Potência – kW	Qtides.
01	Máquina Solda	8,60	29
02	Prensa Viradeira	11,58	01
03	Prensa Hidráulica	4,48	01
04	Motor	6,64	02
05	Ponte Rolante	5,11	01
06	Ponte Rolante	3,22	01
07	Policorte	2,96	01
08	Exaustor Pintura	1,85	13
09	Exaustor Pintura	6,64	08
10	Exaustor Pintura	8,60	01

O gráfico da Figura 53 mostra o comportamento dos valores eficazes das correntes de linha nas três fases. O desbalanceamento apresentado entre as fases foi de aproximadamente

7%.

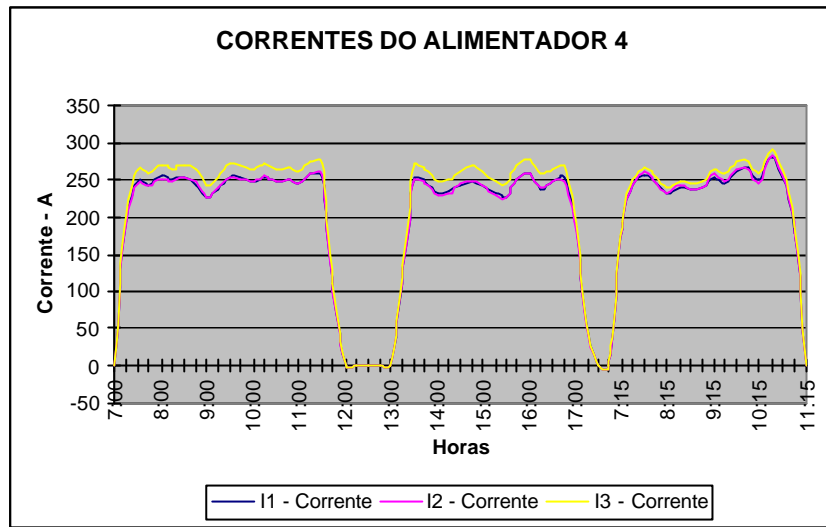


Fig. 53- Comportamento do valor eficaz das correntes do Alimentador 4

Os gráficos das Figuras 54(a) e 54(b) mostram a forma de onda da corrente e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 4, na condição de plena carga.

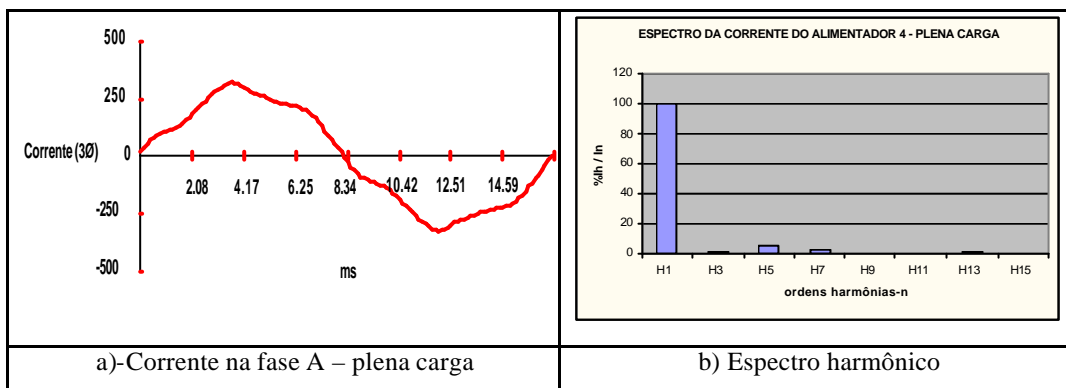


Fig.54 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 4 - plena carga

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à plena carga, foi de aproximadamente $DIHT = 9,76\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Como nos casos anteriores, foram feitas medições fora do horário de plena produção da indústria e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 55(a) e 55(b).

A distorção harmônica total da corrente na fase A, à carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 26,45\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

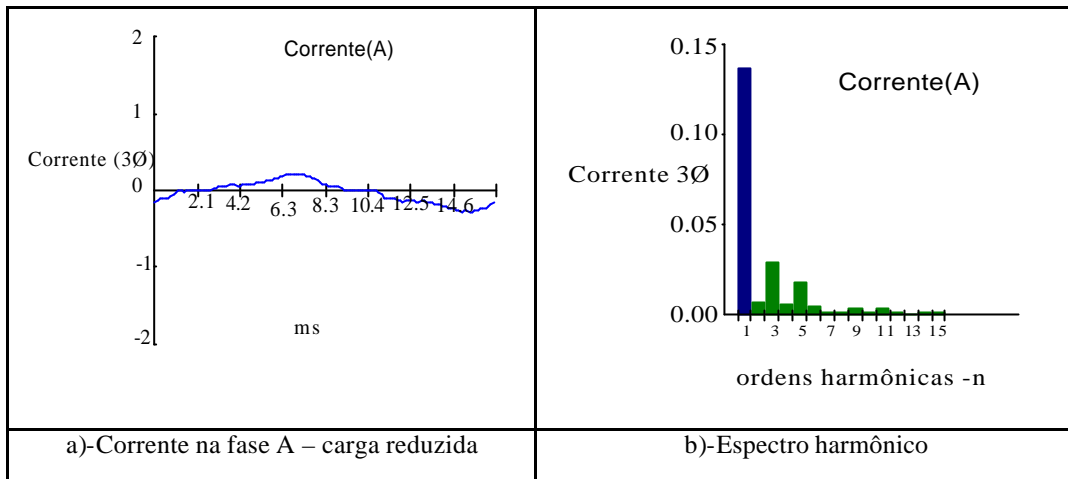


Fig.55 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico da fase A do Alimentador 4 carga reduzida

O gráfico da Figura 56 mostra o comportamento dos valores eficazes das tensões de linha nas três fases do alimentador 4. O desbalanceamento entre as fases foi de aproximadamente 0,6%.

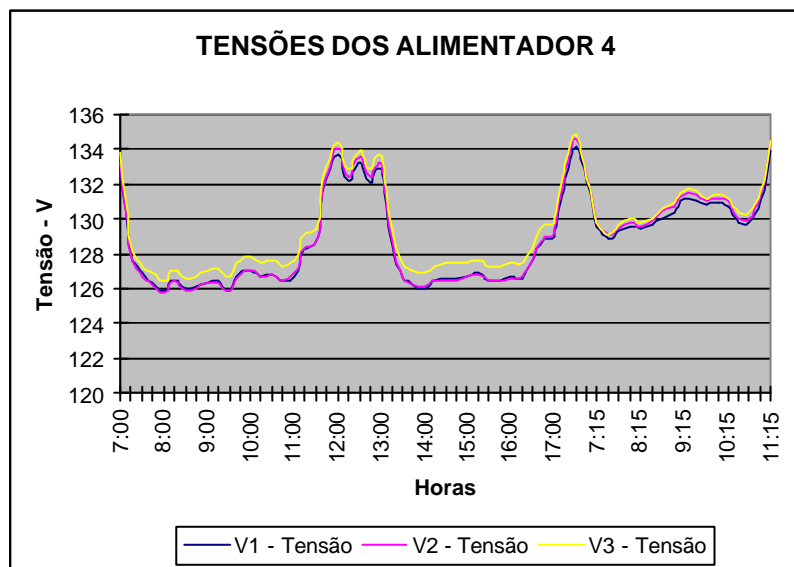


Fig. 56 - Comportamento do valor eficaz das três tensões do alimentador 4

Os gráficos das Figuras 57(a) e 57(b) mostram a forma de onda da tensão e respectivo espectro harmônico para a fase A do alimentador 4, na condição de plena carga.

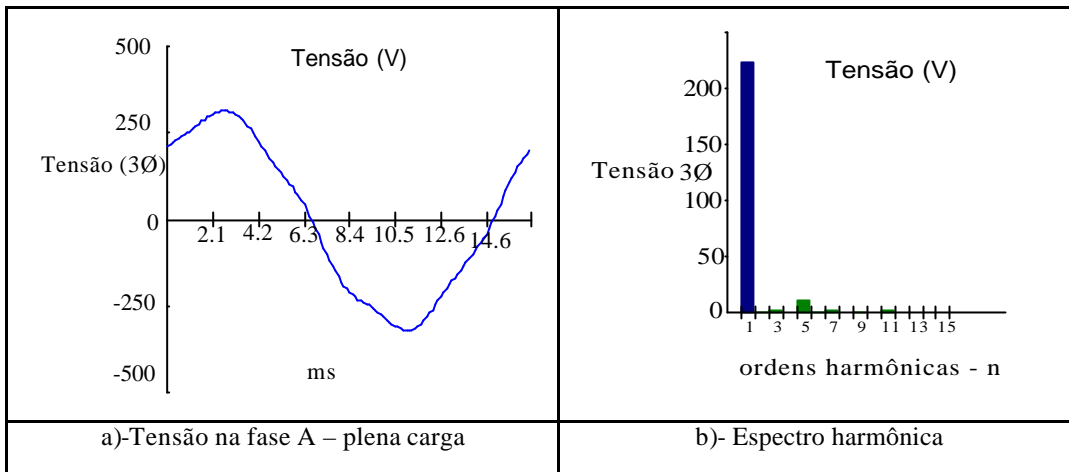


Fig.57 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico da fase A do Alimentador 4 - plena carga

A distorção harmônica total da tensão na fase A, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 5,22\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

A Figura 58 mostra o comportamento do fator de potência durante todo o intervalo de medição, abrangendo as duas condições de produção ou seja, plena carga e carga reduzida.

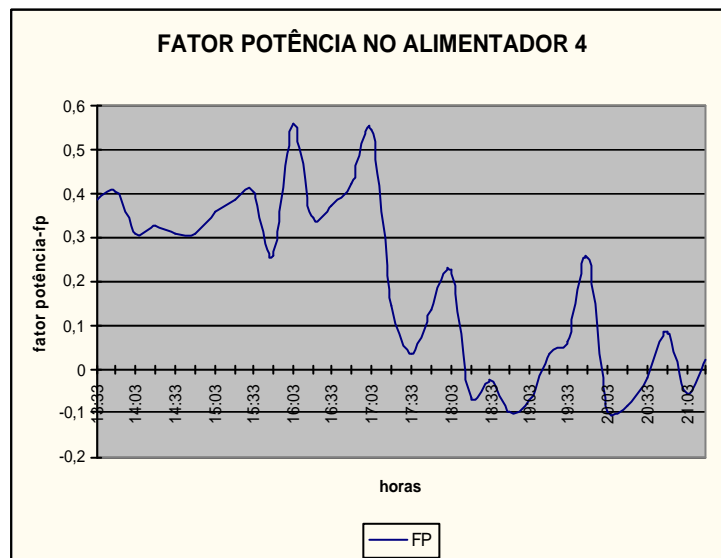


Fig. 58 – Comportamento do fator de potência do Alimentador 4

Durante o período da figura acima, o valor médio medido para o fator de potência foi de aproximadamente 32%, sendo que o mesmo encontra-se abaixo do exigido pela Norma. Devido ao grande número de máquinas de solda neste alimentador, já era previsto este baixo valor.

e) ALIMENTADOR ILUMINAÇÃO: Este Alimentador supre potência para a iluminação da indústria relacionadas na Tabela 25.

Este alimentador é composto por 3Fases # 25mm² e 1Neutro # 25mm², sendo protegido por uma chave tripolar NH 00, com fusível de 25A.

Tabela 25 – Equipamentos instalados no Alimentador iluminação

Item	Descrição	Quantidade
01	Lâmpada V.Metálico –250W	25
02	Lâmpada Mista – 250W	213
03	Lâmpada Mista – 500W	16
04	Lâmpada Fluorescente-1x40W	235

A Tabela 26 mostra os valores medidos e armazenados com equipamento FLUKE-41B.

Tabela 26 – Dados medidos entrada quadro iluminação

	Corrente	Tensão
RMS	90,88 A	212,5 V
Pico	134,88 A	310,1 V
DIHT	3,44 %	
DTHT		3,26%

Potência Ativa	31,22 kW
Potência Aparente	33,45 kVA
Potência Reativa	- 11,98 kVAr
Fator de deslocamento)	0,93
Cós (DPF)	0,93
Fase	Atrasado de 21°

O gráfico da Figura 59(a) mostra o comportamento do valor eficaz da corrente na fase A quando alimenta o quadro de distribuição de iluminação. O gráfico da Figura 59(b) mostra o respectivo espectro harmônico da corrente da fase A. A distorção harmônica total foi de DIHT= 3,44%.

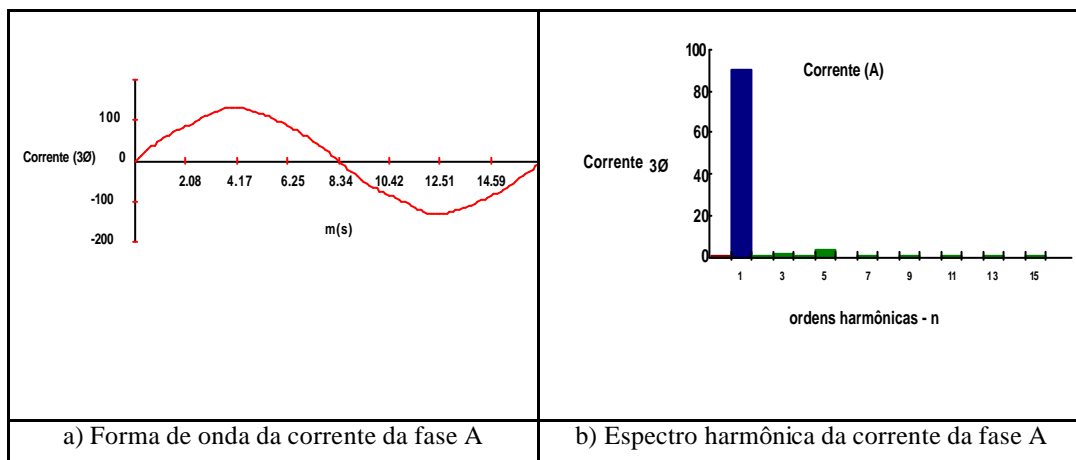


Fig. 59 - Forma de onda e respectivo espectro harmônica da corrente na fase A iluminação indústria -

As ordens harmônicas presentes são as de 3^a, 5^a e 7^a. A harmônica de 3^a ordem

apresenta um valor de 1,58% da fundamental, enquanto a de 5ª ordem é de 3,16%. A harmônica de 7ª ordem é aquela que apresenta a menor amplitude entre as presentes, ou seja, é da ordem de 1,05% da fundamental.

As correntes nas outras duas fases apresentam comportamentos semelhantes.

5.3.3 – Lado de Baixa Tensão – “Medição das Correntes e Tensões Fase A / Neutros dos Alimentadores”

QUADRO GERAL DISTRIBUIÇÃO N^o 1:

Os gráficos das Figuras 60(a) e 60(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 61(a) e 61(b) mostram a forma de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador quadro geral de distribuição n^o 1, na condição de plena carga.

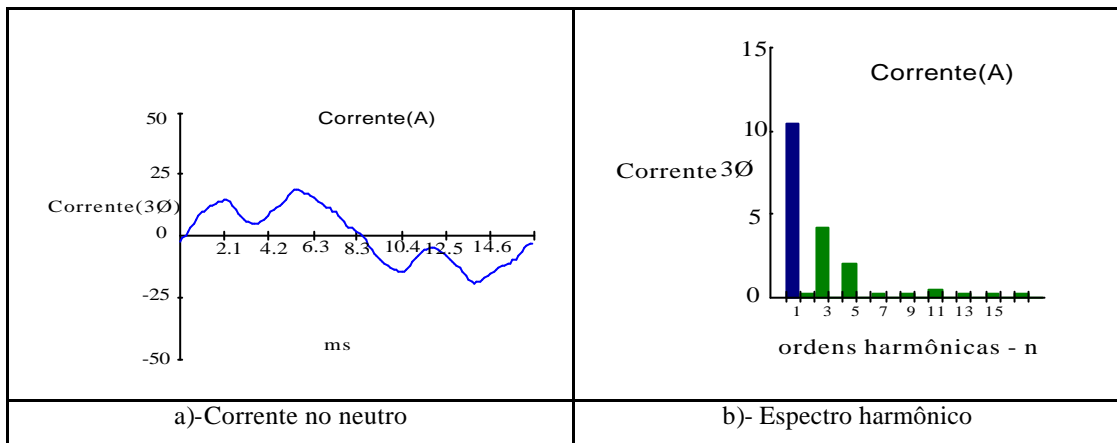


Fig.60 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do barramento 1

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga foi de aproximadamente DIHT = 44,96% . Esta situação se repete para as fases B e C.

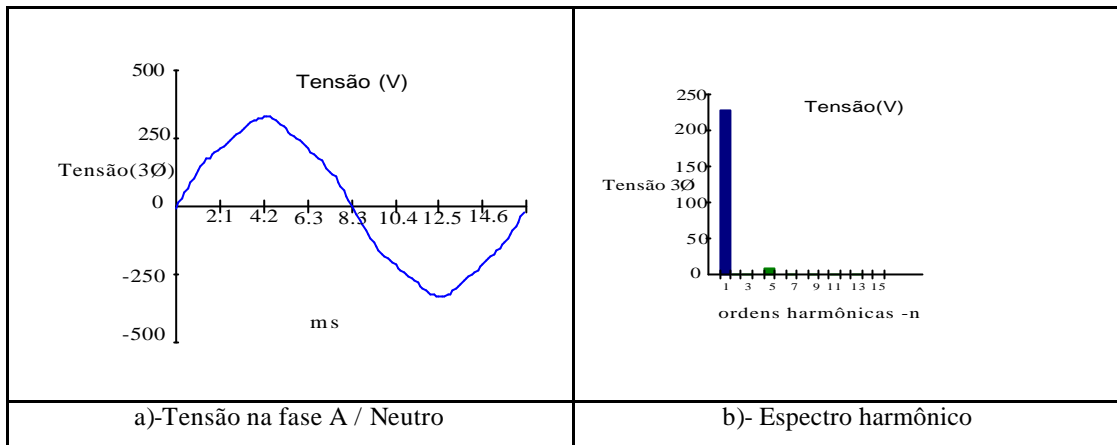


Fig.61 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do barramento 1

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, à plena carga, foi de aproximadamente $DTHT = 4,59 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 62(a), 62(b), 63(a) e 63(b) mostram os resultados obtidos.

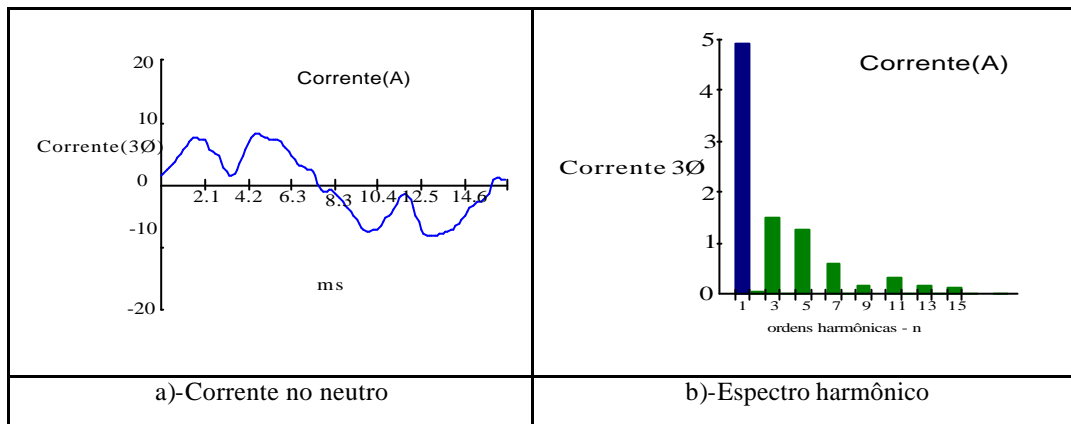


Fig.62 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do barramento 1

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 42,82 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

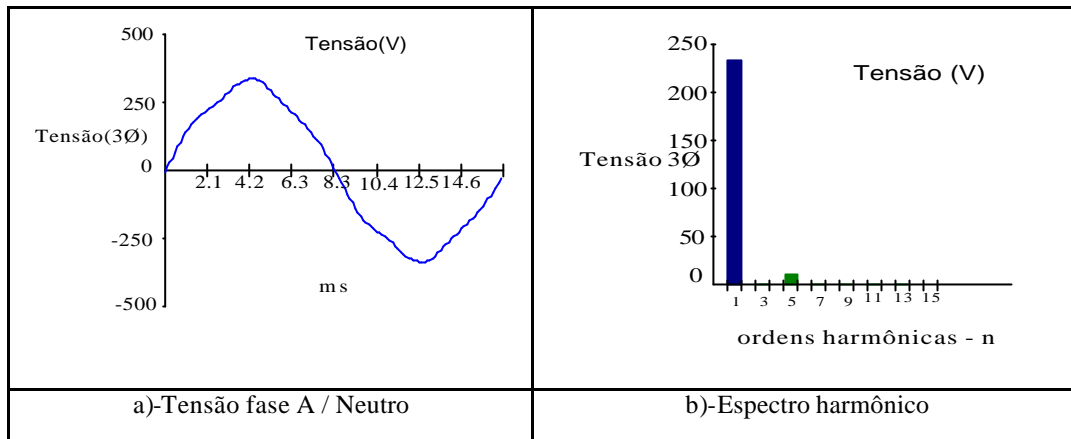


Fig.63 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico do neutro do barramento 1

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, com carga reduzida foi de DTHT = 4,92 %. Esta situação se repete para as fases B e C.

QUADRO GERAL DISTRIBUIÇÃO N^o 2:

Os gráficos das Figuras 64(a) e 64(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 65(a) e 65(b) mostram a forma de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador quadro geral de distribuição n^o 2, na condição de plena carga.

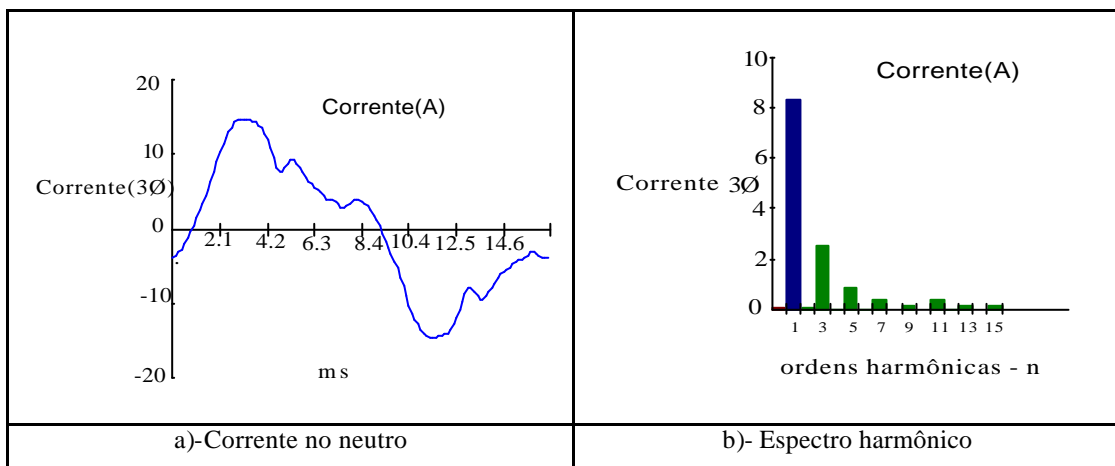


Fig.64 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do barramento 2

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga, foi de aproximadamente DIHT = 33,33% . Esta situação se repete para as fases B e C.

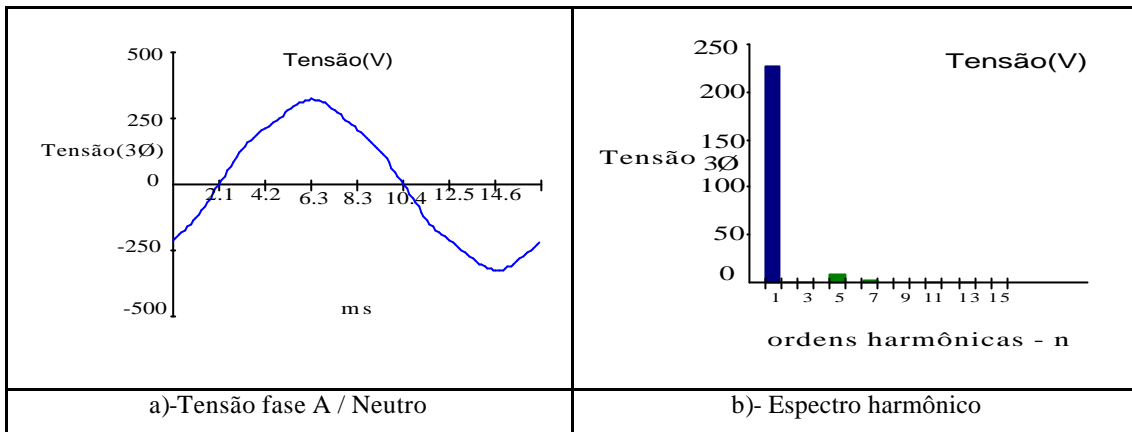


Fig.65 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do barramento 2

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 3,93\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 66(a), 66(b), 67(a) e 67(b) mostram os resultados obtidos.

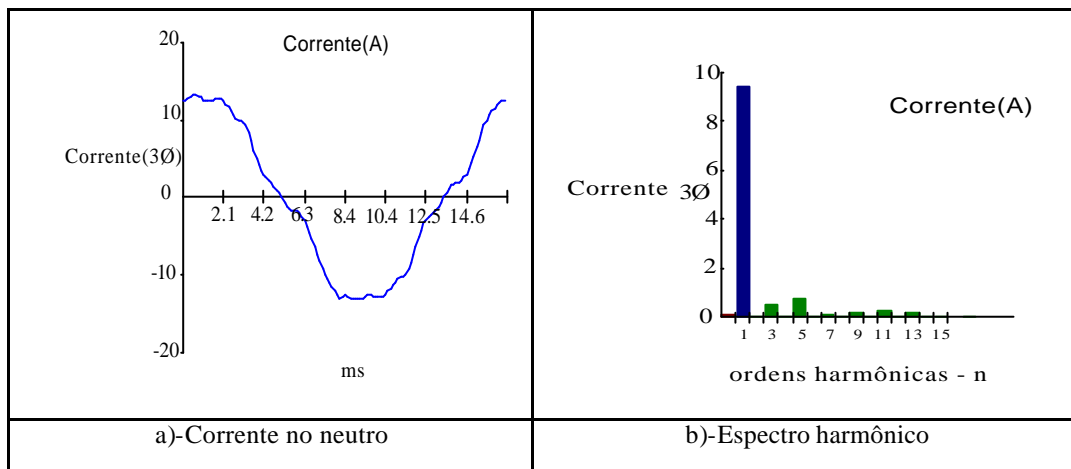


Fig.66- Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do barramento 2

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 10,37\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

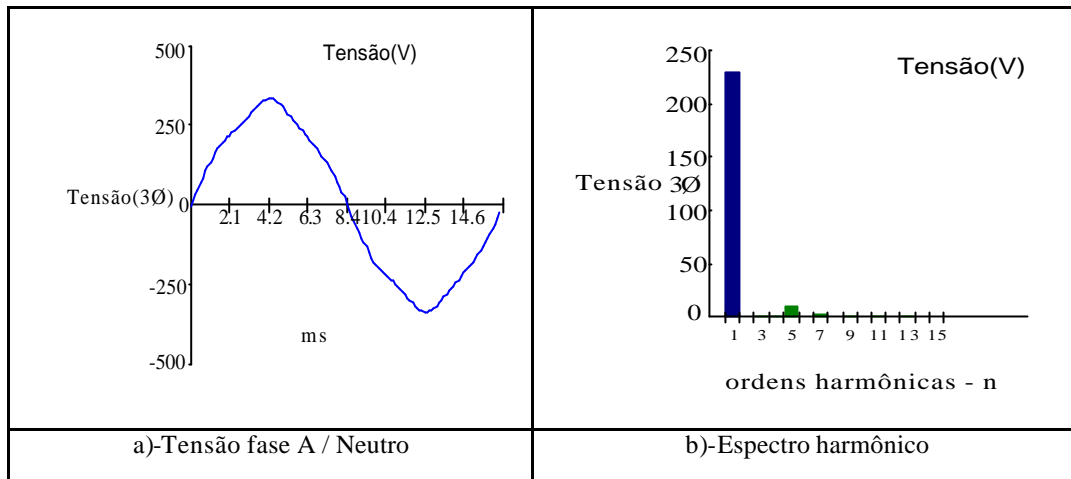


Fig.67 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do barramento 2

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, com carga reduzida foi de DTHT = 4,82 %. Esta situação se repete para as fases B e C.

a) ALIMENTADOR 1 :

Os gráficos das Figuras 68(a) e 68(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 69(a) e 69(b) mostram a forma de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador 1, na condição de plena carga.

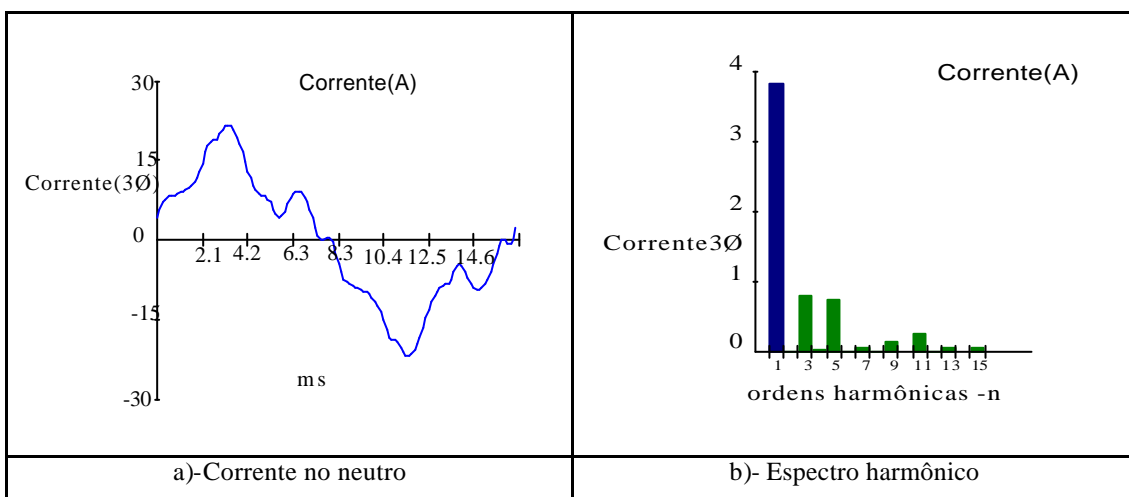


Fig.68 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 1

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga, foi de aproximadamente DIHT = 29,50% . Esta situação se repete para as fases B e C.

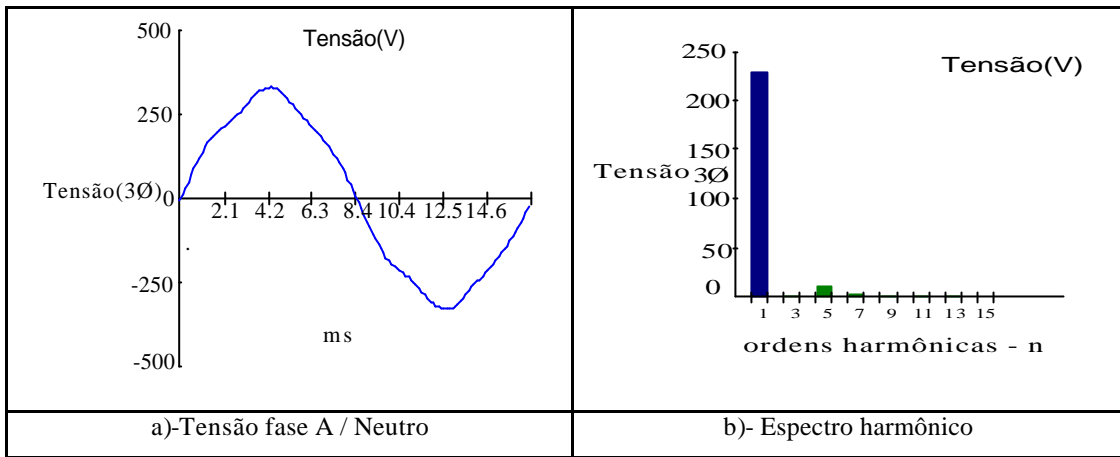


Fig.69 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico do neutro do alimentador 1

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, à plena carga, foi de aproximadamente $DTHT = 4,89 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 70(a), 70(b), 71(a) e 71(b) mostram os resultados obtidos.

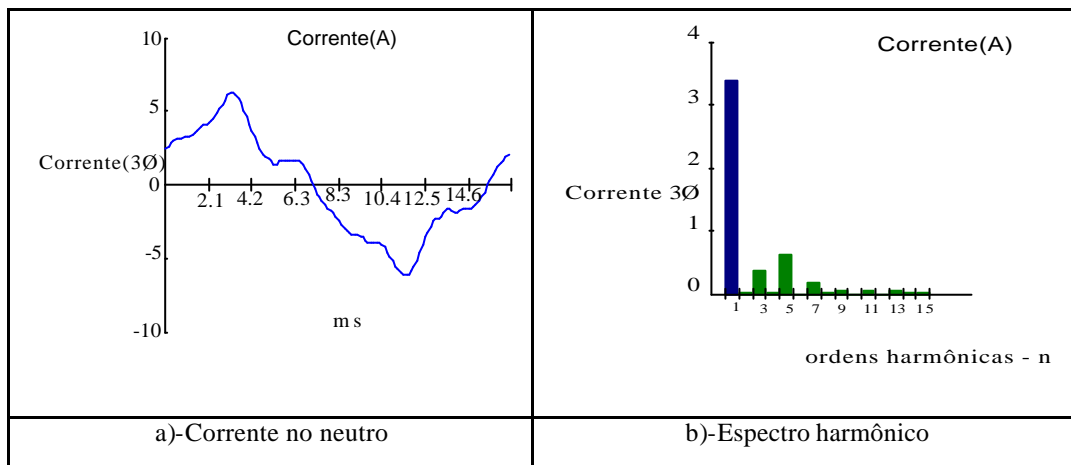


Fig.70- Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 1

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 21,89\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

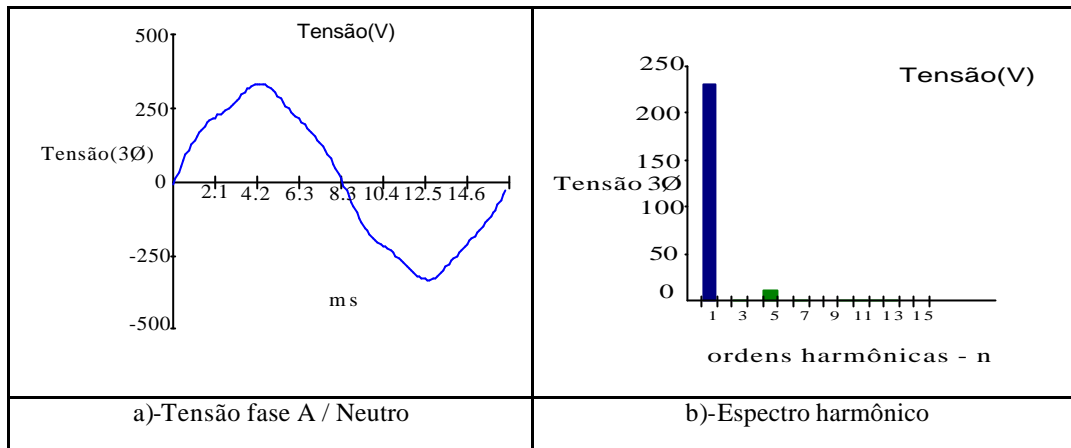


Fig.71 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 1

A distorção harmônica total da tensão no neutro, com carga reduzida foi de aproximadamente $DTHT = 5,65 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

b)ALIMENTADOR 2 :

Os gráficos das Figuras 72(a) e 72(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 73(a) e 73(b) mostram as formas de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador 2, na condição de plena carga.

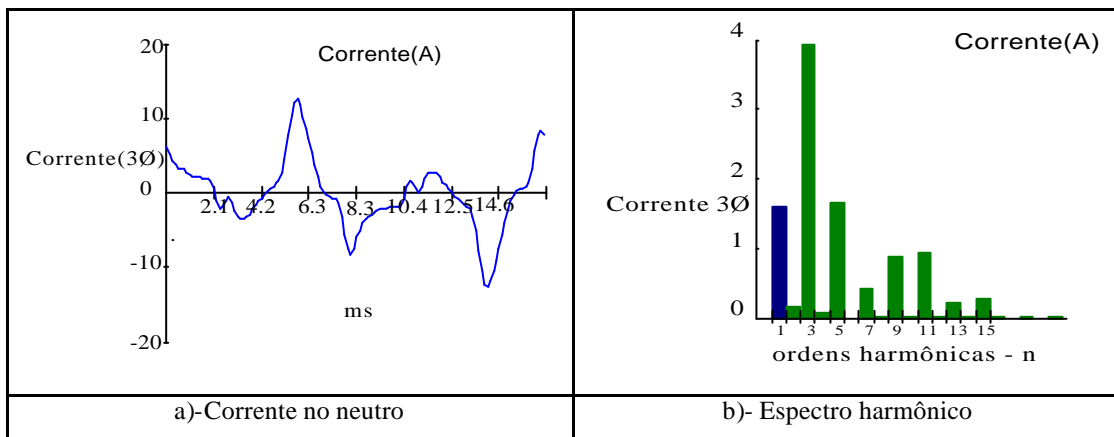


Fig.72 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 2

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga, foi de aproximadamente $DIHT = 94,28 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

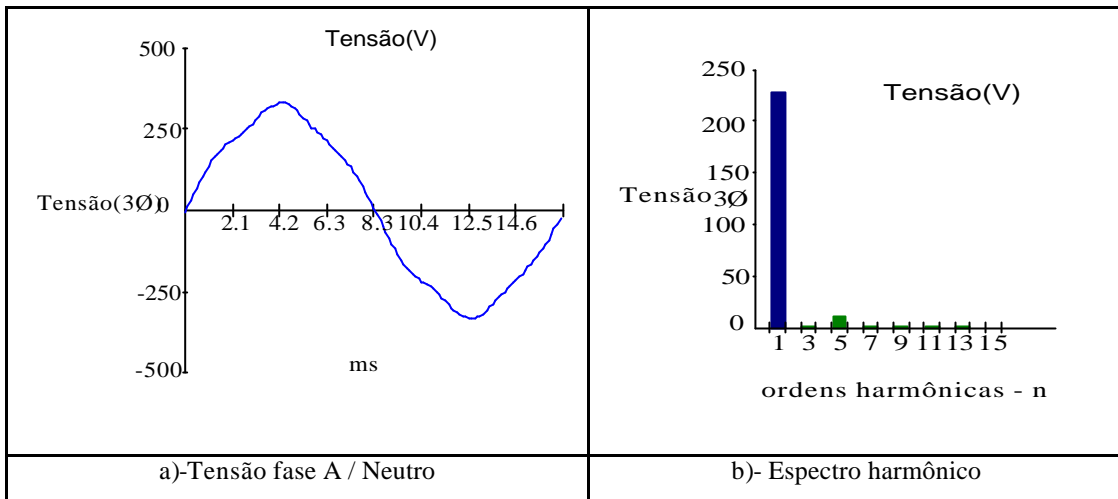


Fig.73 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 2

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, à plena carga, foi de aproximadamente $DTHT = 5,07\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 74(a), 74(b), 75(a) e 75(b) mostram os resultados obtidos.

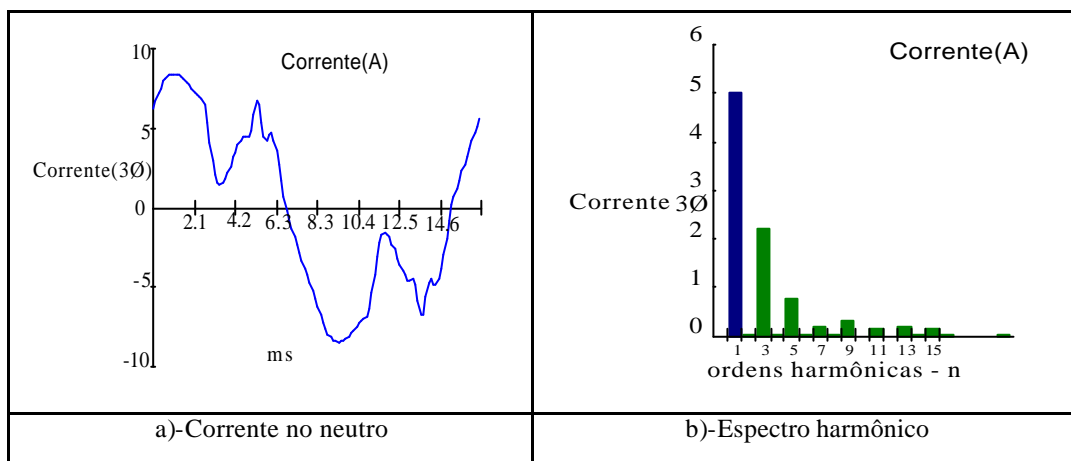


Fig.74- Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 2

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 47,41\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

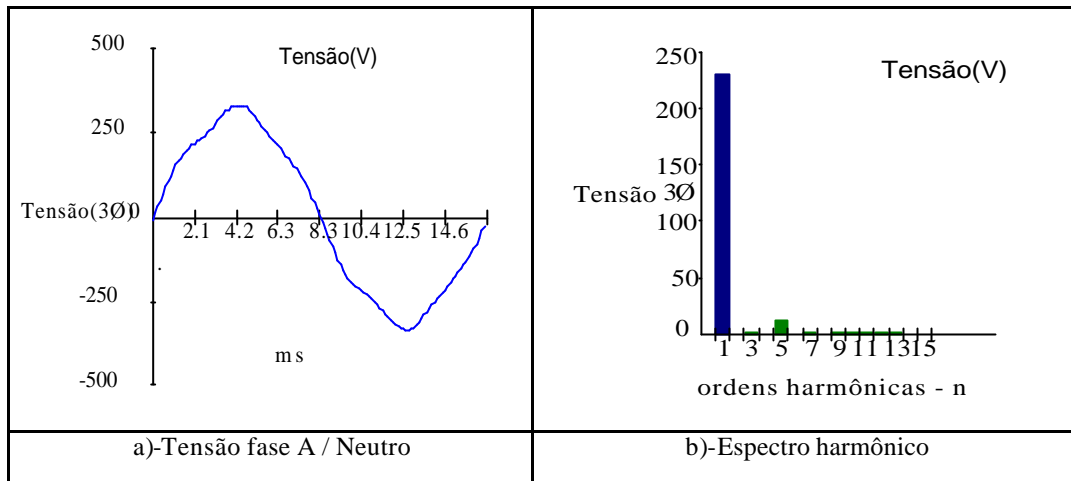


Fig.75 - Forma de onda da tensão e espectro harmônico do neutro do alimentador 2

A distorção harmônica total da tensão no neutro, com carga reduzida foi de aproximadamente $DTHT = 5,61 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

b)ALIMENTADOR 3:

Os gráficos das Figuras 76(a) e 76(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 77(a) e 77(b) mostram a forma de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador 3, na condição de plena carga.

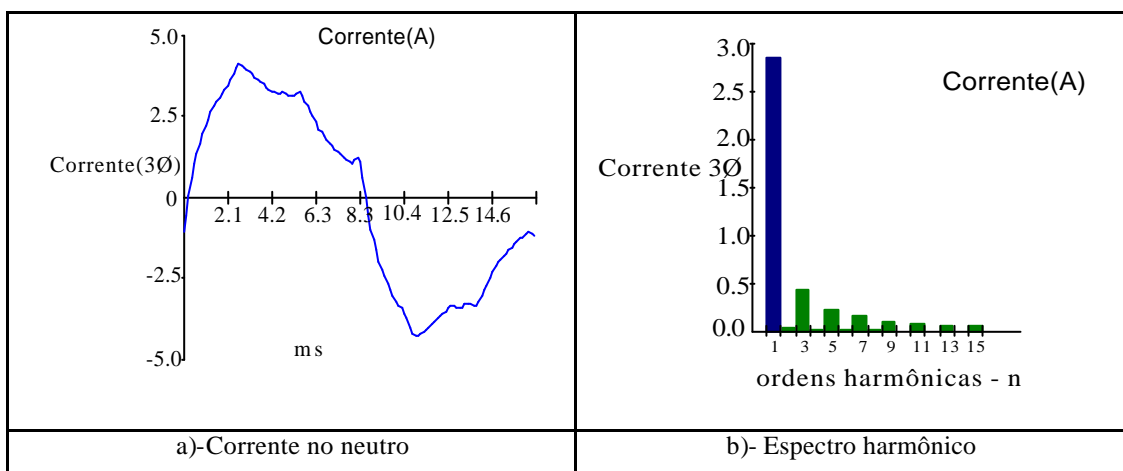


Fig.76 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 3

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga, foi de aproximadamente $DIHT = 18,37 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

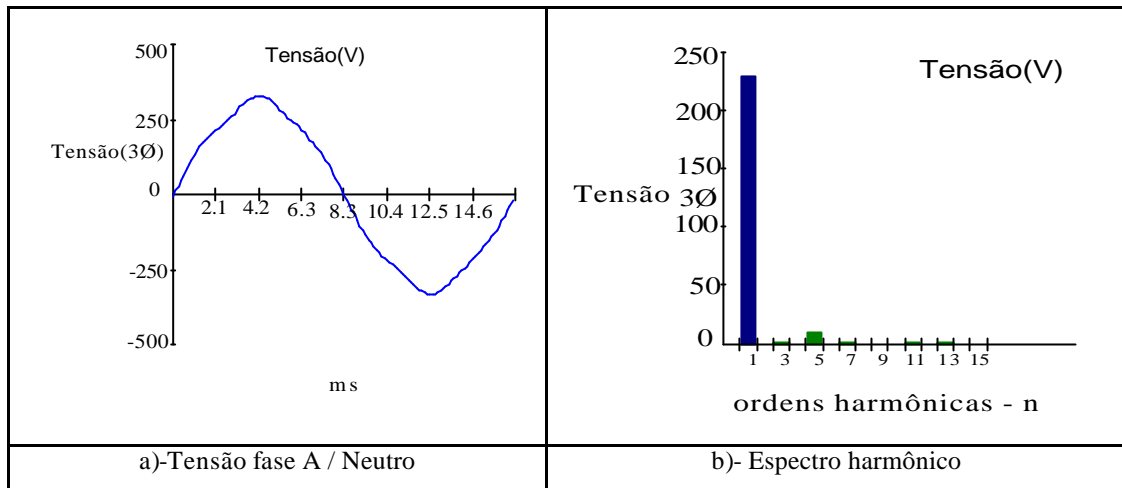


Fig.77 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 3

A distorção harmônica total da tensão fase A /Neutro, à plena carga foi de aproximadamente $DTHT = 4,04 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 78(a), 78(b), 79(a) e 79(b) mostram os resultados obtidos.

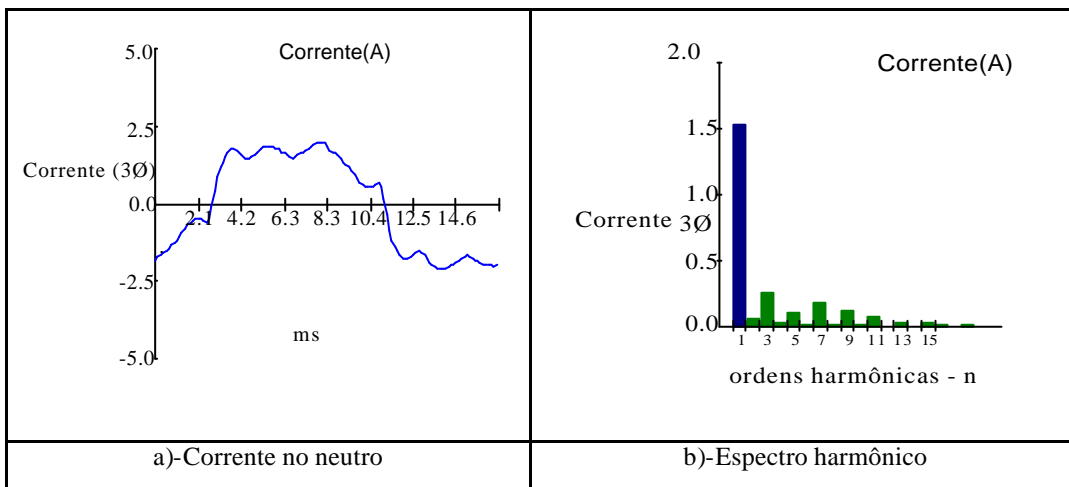


Fig.78- Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 3

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 23,36\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

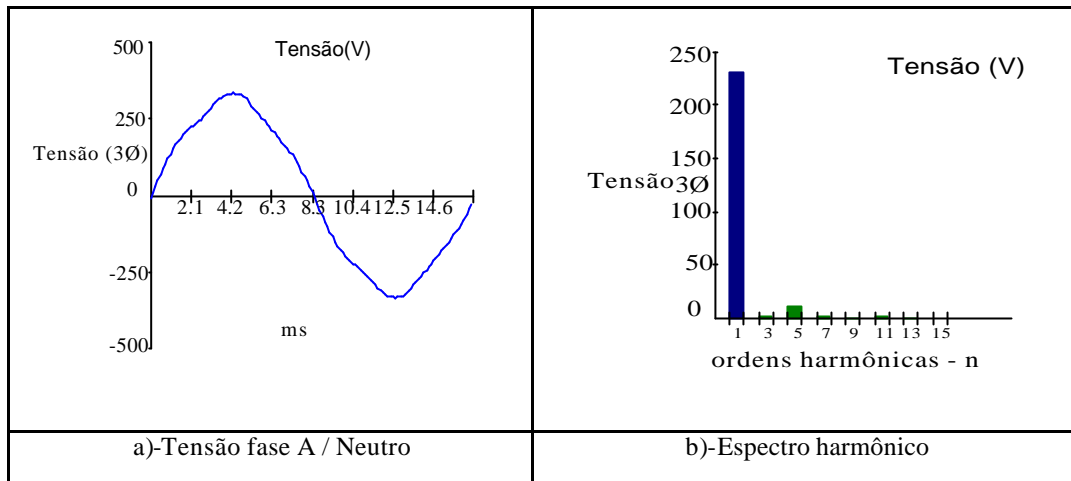


Fig.79 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 3

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, com carga reduzida foi de DTHT = 5,02 %. Esta situação se repete para as fases B e C.

b)ALIMENTADOR 4 :

Os gráficos das Figuras 80(a) e 80(b) mostram as formas de onda da corrente e as Figuras 81(a) e 81(b) mostram a forma de onda da tensão e os respectivos espectros harmônicos para o neutro do alimentador 4, na condição de plena carga.

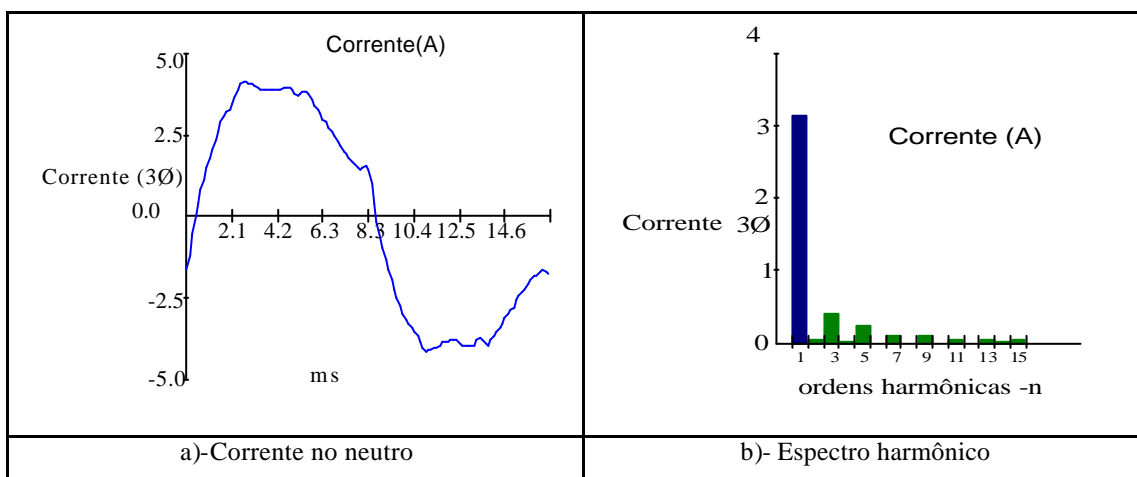


Fig.80 - Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 4

A distorção harmônica total da corrente no neutro, à plena carga foi de aproximadamente DIHT = 15,93% . Esta situação se repete para as fases B e C.

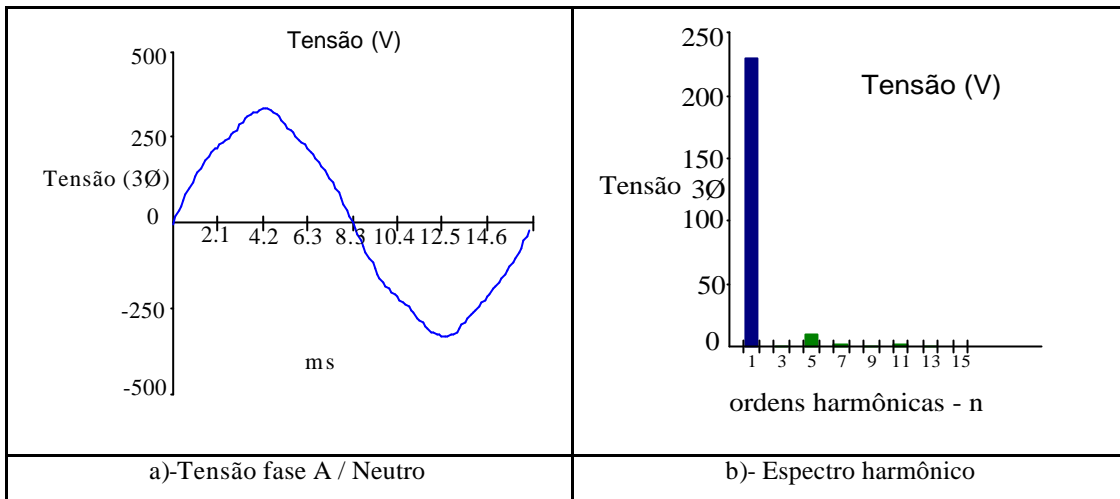


Fig.81 - Forma de onda da tensão Fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 4

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, com plena carga, foi de aproximadamente $DTHT = 4,0 \%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

Foram realizadas medições das tensões de fase e corrente de neutro quando a indústria tem sua produção reduzida.

As Figuras 82(a), 82(b), 83(a) e 83(b) mostram os resultados obtidos.

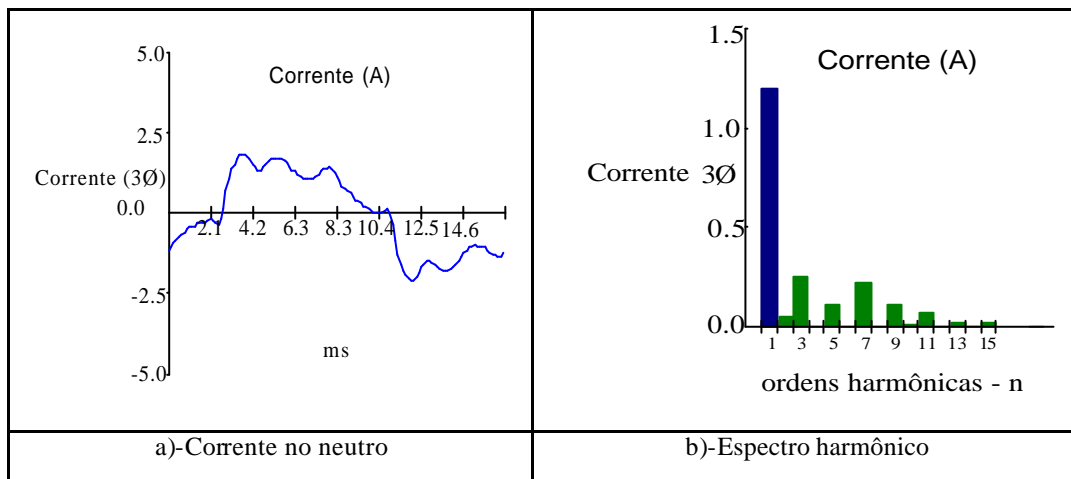


Fig.82- Forma de onda da corrente e espectro harmônico do neutro do alimentador 4

A distorção harmônica total da corrente no neutro, em carga reduzida foi de aproximadamente $DIHT = 31,93\%$. Esta situação se repete para as fases B e C.

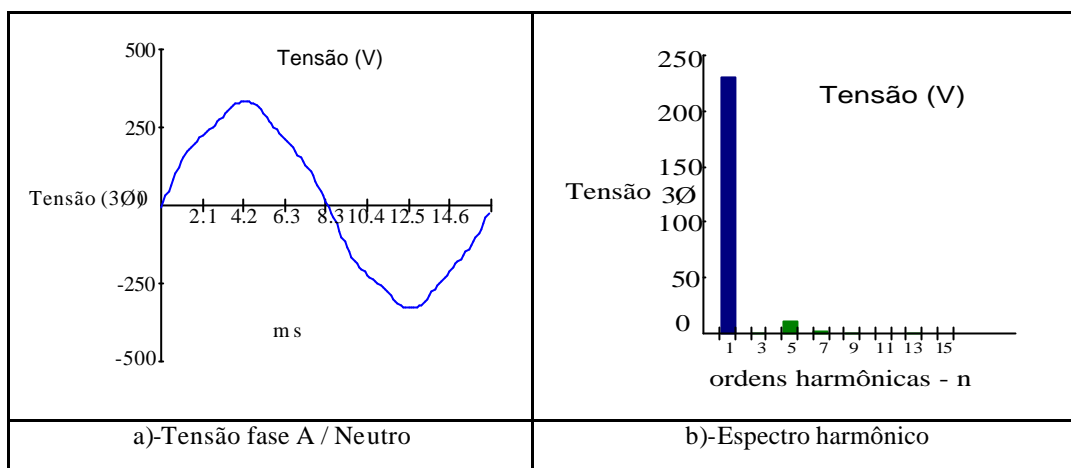


Fig.83 - Forma de onda da tensão fase A / Neutro e espectro harmônico do alimentador 4

A distorção harmônica total da tensão fase A / Neutro, com carga reduzida foi de DTHT = 4,93 %. Esta situação se repete para as fases B e C.

5.4 – Resultados Gerais das Medições na Planta Industrial

5.4.1 – Distorções Harmônicas Totais de Correntes e Tensões das Fases

Os resultados gerais para os valores medidos das distorções harmônicas das correntes e tensões para os fatores de potência, nos locais de medição, são mostrados na Figura 84 do diagrama geral da planta industrial.

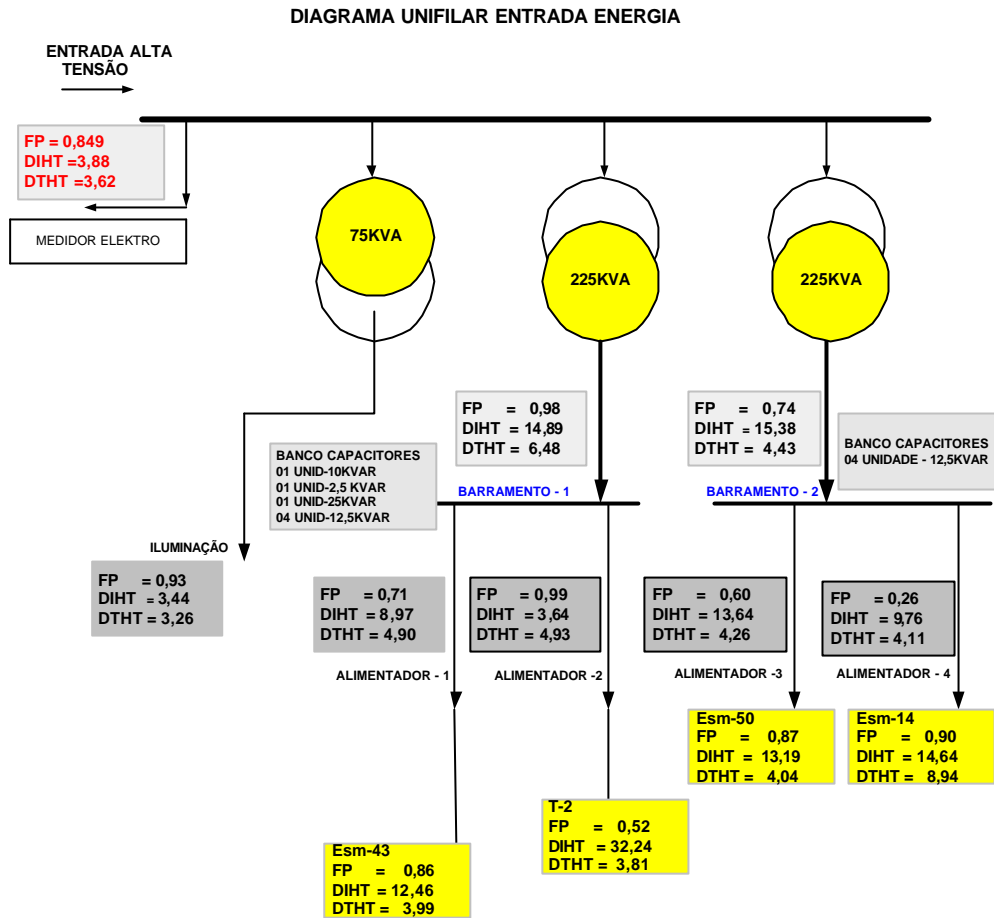


Fig. 84 – Diagrama unifilar entrada energia com os valores medidos na planta industrial

O fator de potência dos alimentadores e dos quadros gerais violam os limites estabelecidos pela norma.

A distorção harmônica da corrente na maioria dos alimentadores violam os limites estabelecidos pela norma quando não estão em plena carga. Quando analisado no lado da alta tensão esta distorção diminui (conexão delta / Y aterrado e configuração de carga).

A distorção harmônica da tensão na maioria dos alimentadores não violam os limites estabelecidos pela norma quando não estão em plena carga. Quando analisado no lado da alta tensão esta distorção diminui (conexão delta / Y aterrado e configuração de carga).

As correntes e tensões de fase se apresentam pouco desbalanceadas.

Apesar das variações das tensões de linha, estas estão em conformidade com a norma.

5.4.1 – Distorções Harmônicas Totais de Correntes e Tensões Fases A / Neutros dos Alimentadores

5.4.1.1 – Plena Carga

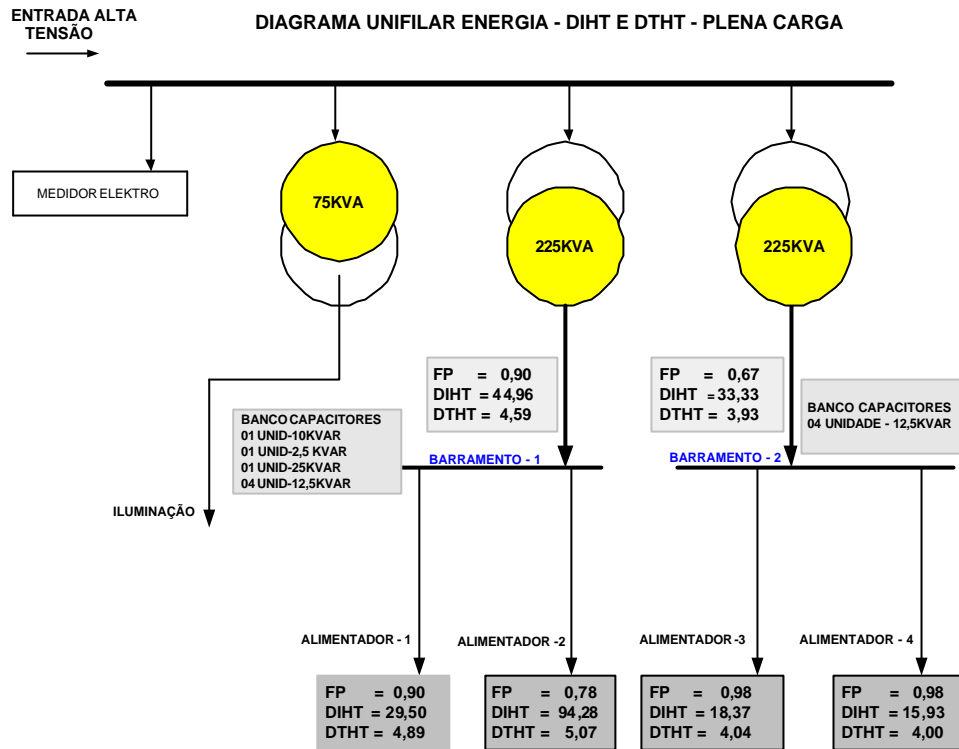


Fig. 85 – Diagrama unifilar entrada energia com os valores medidos nas fases A / Neutros na planta industrial – plena carga

O fator de potência dos alimentadores e dos quadros gerais não violam os limites estabelecidos pela norma, com exceção do alimentador 2 e barramento 2.

A distorção harmônica da corrente na maioria dos alimentadores violam os limites estabelecidos pela norma quando estão em plena carga.

A distorção harmônica da tensão dos alimentadores não violam os limites estabelecidos pela norma quando estão em plena carga.

5.4.1.2 – Carga Reduzida

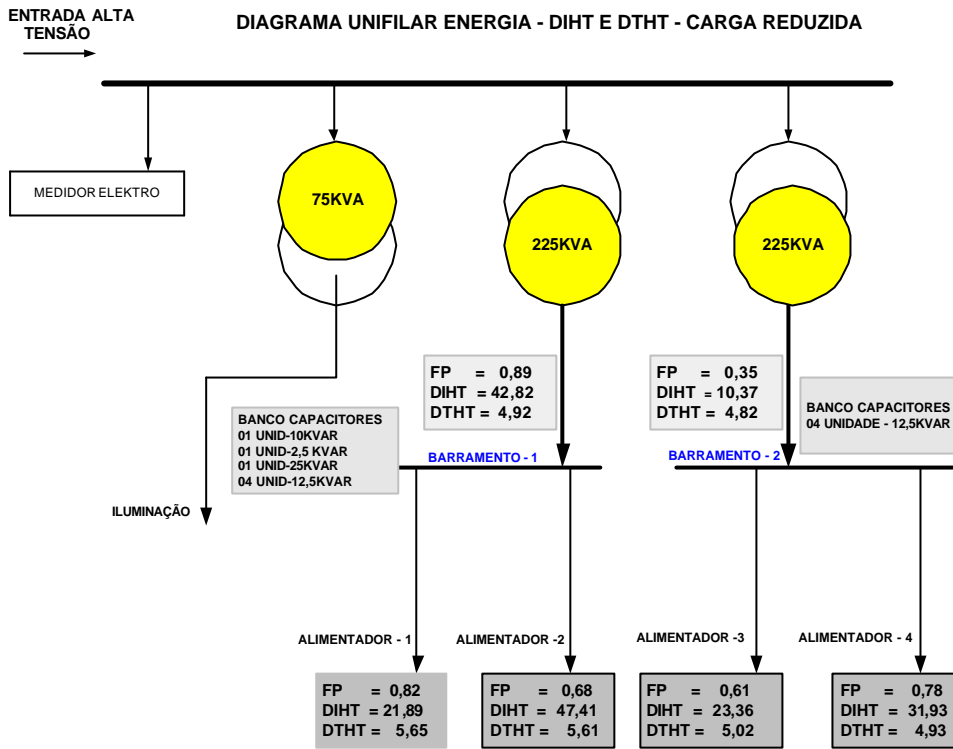


Fig. 86 – Diagrama unifilar entrada energia com os valores medidos nas fases A / Neutros na planta industrial – carga reduzida

O fator de potência dos alimentadores e dos quadros gerais violam os limites estabelecidos pela norma.

A distorção harmônica da corrente na maioria dos alimentadores violam os limites estabelecidos pela norma quando estão em carga reduzida.

A distorção harmônica da tensão dos alimentadores não violam os limites estabelecidos pela norma quando estão em carga reduzida.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES E PROCEDIMENTOS

6.1 – Introdução

Neste capítulo são feitas sugestões para o uso racional e o controle do desperdício da energia elétrica na planta da indústria metalúrgica estudada.

Nas avaliações das faturas de energia elétrica e nas medições realizadas na planta industrial, foram observados vários fatores que contribuem para o aumento do consumo e da demanda, e o baixo fator de potência. Isto leva a uma conseqüente elevação da energia elétrica faturada.

6.2 – Análise Setorial e Sugestões

6.2.1 – Demanda Contratada

A demanda contratada poderia ser diminuída de aproximadamente 20% passando de 249 kW para 200 kW, se alguns procedimentos fossem adotados.

Um das mudanças possíveis de serem efetuadas é a otimização do funcionamento das máquinas de elevado consumo, ou seja, a não utilização simultânea das mesmas.

Analisando a curva de carga da indústria, a mesma apresenta picos no horário de produção que poderiam ser distribuídos ao longo do dia, sem afetar a linha produtiva. Isto faria com que a curva de carga praticamente se mantivesse constante e bem abaixo dos picos observados.

6.2.2 – Energia Reativa Excedente

Pode ser observado durante as medições que ocorre oscilações do fator de potência global. Isto é atribuído às entradas e às saídas aleatórias das cargas as quais possuem regimes de trabalho intermitentes e aperiódicos. A não sazonalidade na utilização destas cargas também é um fator relevante.

Para minimizar os gastos com a energia reativa excedente é aconselhável, como primeira medida, a implantação de um banco automático de capacitores para a correção do fator de potência para as pequenas cargas e bancos fixos para as de maiores potências. Estes bancos deverão ser controlados para a sua inserção na rede visto que, no período das 24:00 as 6:00 horas da manhã é faturada a energia reativa capacitiva excedente.

Em alguns equipamentos, é aconselhada a instalação de filtros para minimizar os efeitos do conteúdo harmônico.

6.2.3 – Transformadores do Setor Fabril

Os dois transformadores de 225 kVA do setor fabril estão operando, na média diária, com um fator de carga de aproximadamente a 0,40.

As perdas Joules de cada um destes transformadores são:

$$\text{Vazio} = 900 \text{ W} - \text{Cobre} = 2.800 \text{ W}.$$

Este fator de carga indica a possibilidade da troca dos dois transformadores por outros com potência nominal de 150,0 kVA. Caso ocorra a necessidade momentânea de elevação de carga, os mesmos possibilitam um fator de carregamento de até 140 % da potência nominal. As perdas Joules de cada um destes transformadores são: Vazio= 640 W – Cobre= 2.050 W.

Desta forma, pode ser observado que ao final do período fiscal de 12 meses podem ser economizados em até 720 kWh.

6.2.4 – Sistema de Iluminação

Os sistemas de iluminação, dos diversos ambientes, estão em desacordo com as recomendações da ABNT [19].

Tanto no nível de iluminação quanto nos tipos de lâmpadas e luminárias empregados, pode ser feito um retrofit de forma a se obter um retorno financeiro rápido através de melhorias nas áreas de trabalho visuais mais exigentes, fazendo com que melhore a qualidade da produção.

As Tabelas (27) e (28) apresentam a situação atual e as sugestões para se obter os níveis estabelecidos por norma.

Tabela 27 – Levantamento da situação atual

Setor	Qtde Lâmpadas Existentes	Potência kW	Consumo (kWh/ano)
Eva – 3 Eixo	34 (250W Mista)	8,50	15.512,50
Reforma	30 (250W Mista)	7,50	13.687,50
Usinagem	55 (250W Mista)	13,75	25.093,75
Chaparia / Dobra	10 (250W Mista)	2,50	4.562,50
	100(1x40W-Fluores)	4,00	7.300,00
Almoxarifado	44(1x40W-Fluores)	1,76	3.212,00
Transporte	15 (250W Mista)	3,75	6.843,75
Canavieiro	45 (250W Mista)	11,25	20.531,25
	53(1x40W-Fluores)	2,12	3.869,00
Pintura	14 (250W Mista)	3,50	6.387,50
	16(500W-Mista)	8,00	14.600,00
Expedição	22 (250W Mista)	5,50	10.037,50
	42(1x40W-Fluores)	1,68	3.066,00
	8(250W-V.Metal)	2,00	3.650,00
Total Consumo		75,81	138.353,25

Tabela 28 – Situação Proposta

Setor	Qtde Luminárias	Qtde Lâmpadas- V.Metálica 400W	Potência kW	Consumo (kWh/ano)
Eva – 3 Eixo	20	20	8,00	14.600,00
Reforma	15	15	6,00	10.950,00
Usinagem	33	33	13,20	24.090,00
Chaparia / Dobra	58	58	23,20	42.340,00
Almoxarifado	11	11	4,40	8.030,00
Transporte	21	21	8,40	15.330,00
Canavieiro	23	23	9,20	16.790,00
Pintura	7	7	2,80	5.110,00
Expedição	13	13	5,20	9.490,00
Total Consumo			80,40	146.730,00

O acréscimo de potência entre a situação proposta e a atual é de 4,59kW, acarretando um aumento no consumo. Isto pode ser compensado racionalizando o seu uso durante o período noturno e de produção. Lembrando que o valor de horas é no período noturno, sendo que no período diurno utiliza-se a iluminação natural (telhas transparentes). O valor do aumento do consumo será:

$$4,59 \text{ kW} \times 5\text{h} \times 365 \text{ dias} = 8.376,75 \text{ kWh/ano}$$

A tarifa aplicada na indústria é a 0,18 R\$/kWh (agosto/2004), portanto

$$8.376,75 \times 0,18 = 1.507,82 \text{ R$/ano (U\$\$ 476.10)}$$

6.2.5 - Recuperação do ICMS

Nesta planta industrial em estudo, pode ser aplicada a recuperação do ICMS, conforme a Lei complementar nº 87/1996, com as recentes alterações na legislação da Lei Complementar nº 102/2000.

O valor calculado é de aproximadamente U\$\$ 6,154.02 (anual), conforme a tabela (10).

6.2.6 - Equipamentos

6.2.6.1 - Motores

Vários motores estão superdimensionados, o que acarreta em grandes desperdícios de energia na planta analisada. O exemplo abaixo mostra o quanto poderia ser economizado, para um dos motores, se o mesmo fosse especificado de maneira correta.

Ex.: a)-Motor trifásico de 25 cv fornecendo 100 % da potência nominal – rendimento 89%

a)-Motor trifásico de 100 cv fornecendo 25% da potência nominal – rendimento 78%

a) a 25 % da potência nominal (motor de 100 cv)

$$n = P_{\text{útil}}/P_{\text{ativa}}$$

$$P_{\text{ativa}} = P(\text{cv}) \cdot 0,736 / n = 100 \cdot 0,25 \cdot 0,736 / 0,78 = 23,6 \text{ kW}$$

b) a 100 % da potência nominal (motor de 25 cv)

$$P_{\text{ativa}} = P(\text{cv}) \cdot 0,736 / n = 25 \cdot 0,736 / 0,89 = 20,7 \text{ kW}$$

Assim, a energia desperdiçada em um ano durante 8 horas por dia será:

$$E = (23,6 - 20,7) \times 8 \times 30 \times 12 = 8.353 \text{ kWh/ano}$$

Como há uma grande quantidade de motores instalados, poderia ser feito uma racionalização do consumo em se especificando melhor os motores.

Um outro fator importante a ser destacado é que os motores instalados são do tipo “standard”. Se forem substituídos pelos do tipo “plus” de alto rendimento (média de 94%), o ganho com o consumo seria muito maior.

Ex.:a)- Motor trifásico de 15 cv fornecendo 100 % da potência nominal – rendimento 78%

b)- Motor trifásico de 15 cv fornecendo 100% da potência nominal – rendimento 94%

a) a 100 % da potência nominal (rendimento = 78%)

$$n = P_{\text{útil}}/P_{\text{ativa}}$$

$$P_{\text{ativa}} = P(\text{cv}) \cdot 0,736 / n = 15 \cdot 0,736 / 0,78 = 14,15 \text{ kW}$$

b) a 100 % da potência nominal (rendimento = 94%)

$$P_{\text{ativa}} = P(\text{cv}) \cdot 0,736 / n = 15 \cdot 0,736 / 0,94 = 11,75 \text{ kW}$$

Assim, a energia desperdiçada em um ano durante 8 horas por dia será:

$$E = (14,15 - 11,75) \times 8 \times 30 \times 12 = 6.912 \text{ kWh/ano}$$

6.2.6.2 - Máquinas de Solda

As máquinas de solda deverão receber uma manutenção periódica para evitar problemas de rendimento e elevação do tempo de solda.

Como a maioria das máquinas de solda da indústria tem como características construtivas retificadores de 6 pulsos, quando do funcionamento irregular de alguns destes pulsos podem ocorrer defeitos o quais geram frequências harmônicas mais elevadas comprometendo o sistema elétrico. Isto foi observado quando da medição em algumas destas máquinas.

6.3 – Conclusão Parcial

Neste estudo de caso, foi observado que com alguns procedimentos, como citados anteriormente, existe a possibilidade de se fazer uma grande economia em se controlando os desperdícios e usando racionalmente a energia elétrica.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS

Neste estudo de caso foi abordado o controle do desperdício e o uso racional da energia elétrica em uma planta industrial cujo perfil é a fabricação de produtos metalúrgicos. Dentro deste escopo, foi analisado primeiramente o perfil de consumo através do estudo das faturas de energia elétrica. Em seguida, foram realizadas medições, em diversos pontos da planta industrial, observando-se as distorções das correntes geradas pelas cargas com características não lineares (90% da carga instalada).

Em função dos resultados obtidos, podemos fazer os seguintes comentários finais:

- a) Nos dias atuais é de fundamental importância uma análise detalhada da planta industrial devido às diferentes características das cargas instaladas, do dimensionamento dos cabos alimentadores e respectivas proteções, da legislação atual que rege todo o sistema de tarifação.
- b) Ganhos econômicos relevantes são obtidos, quando se aplicam as mínimas recomendações técnicas no dimensionamento e especificações de equipamentos de iluminação e acionamentos, como pode ser observado no desenvolvimento deste trabalho.
- c) Pelas medições realizadas nos diversos pontos da planta industrial, tanto na baixa quanto na alta tensão, ficou bem claro que os níveis de distorções, das correntes que circulam pelos alimentadores, não são pequenos. Isto é preocupante pois, em alguns pontos foram verificados altos níveis de correntes harmônicas de seqüência zero, circulando pelo condutor neutro. Os equipamentos que são alimentados em fase-neutro passam a sofrer comprometimentos em seu funcionamento e diminuição da vida útil.
- d) Pelas medições realizadas nos diversos pontos da planta industrial, na baixa tensão, ficou bem claro que os níveis de distorções, das correntes que circulam pelos neutros dos alimentadores em plena carga e carga reduzida, não são pequenos. Já os níveis de distorções, das tensões que circulam pelos neutros dos alimentadores em plena carga e carga reduzida estão dentro da normalidade.

e) A prerrogativa de uma lei Federal possibilita às empresas recuperarem parte do imposto ICMS pago, relativo aos últimos cinco anos anteriores à solicitação. Esta recuperação só pode ser feita no consumo da parte produtiva da indústria, ficando de fora o consumo da parte administrativa. Logo, o montante a ser economizado, durante um ano fiscal é significativo.

f) Durante o desenvolvimento deste trabalho, alguns pontos deixaram de ser abordados por falta de suporte técnico. Um dos que podemos citar é a falta de equipamentos mais adequados para a realização de medidas simultâneas, em pontos diferentes da planta industrial, o que possibilitaria avaliar os efeitos das distorções ao longo de todos os alimentadores, até o ponto de acoplamento comum com a concessionária de energia.

Sugestões para continuação deste trabalho e melhorias nas técnicas empregadas:

a) Sugerir, baseado em medições de campo e através das taxas de distorção harmônica total das correntes e tensões , técnicas para o dimensionamento de alimentadores e respectivas proteções para a aplicação em plantas industriais.

REFERÊNCIAS

- [01] IEEE-519. **Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems of electrical and electronics engineers**. 1992.
- [02] ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, criada em 27/05/1998, através de lei n.º 9.648
- [03] EMPRESA ENERGÉTICA DE MATO GROSSO DO SUL S/A. **O impacto dos programas de eficiência energética na qualidade da energia elétrica**. Campo Grande, 2000.165p.
- [04] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, N. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. McGraw-Hill, 1996.
- [05] EMANUEL, A. E.; WANG, X.. **Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads**. IEEE Transaction on power apparatus and systems, v. PAS-104, n. 3, mar. 1985.
- [06] MIT - Departamento of Electrical Engineering. **Magnetic circuits and transformers**. Mit, July 1962. p. 135.
- [07] MELO, G. A., **A Eficiência Energética Sob a Ótica da Qualidade de Energia Elétrica**. Ilha Solteira, SP: UNESP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual São Paulo, 2001.
- [08] Agência Nacional de Energia Elétrica, criada em 26/12/1996, através de lei n.º 9.427
- [09] (Departamento Nacional de Energia Elétrica), através do decreto n. 26643/34 de 1985.
- [10] COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. **Manual de fator de carga**. São Paulo, 1979. 13p.
- [11] IEEE. Recommended practice for monitoring electric power quality IEEE std 519,1999.

-
- [12] A. CAVALLINI, G. MAZZANTINI, G. C. MONTANARI. **The effect of nonsinusoidal supply on life performance of electrical insulating systems.** International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE-ICHQP96, Las Vegas USA, 1996.
- [13] NAKATA, T.; ISHIHARA, Y.; NAKANO, M. Iron losses of silicon steel core produced by distorted flux. **Electrical Engineering in Japan**, v. 90, n. 1, 1970.
- [14] NEWBURY, R. A., Prediction of loss in silicon steel from distorted waveforms. **IEEE Transactions on Magnetics**. v. MAG-14, n. 4, jul. 1978.
- [15] HSU, J. S., WOODSON, H. H., LIU, S., Experimental study of harmonics flux effects in ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**. v. MAG25, n. 3, may, 1989.
- [16] HWANG, M. S.; GRADY, W. M.; SANDERS, H. W. Distribution transformer winding losses due to nonsinusoidal currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. PWRD-2, n.1, jan. 1987.
- [17] IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION STANDARD 61000-3-2
- [18] IEEE. **Guide for harmonic control and reactive compensation of static power converters**, 1993.
- [19] NBR 5410/1997 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Procedimentos – ABNT

APÊNDICE A

A.1 - O Programa “ACTEE”

O programa de Análise de Fatura da Tarifação de Energia Elétrica, foi melhorado na linguagem de programação Visual Basic, versão 6.0.

O programa tem como objetivo analisar de um modo geral como está o consumo de energia de um determinado consumidor, seja ele Residencial, Comercial, Industrial. Este software, permite analisar num período de tempo, através de gráficos os seguintes dados:

- ✍ montar um banco de dados do consumo de energia;
- ✍ verificar se há uma redução do custo de energia com as implantações efetuadas;
- ✍ verificar mensalmente, através dos gráficos os parâmetros físicos e econômicos que influenciam no consumo de energia;
- ✍ verificar se há possibilidades para baixar o consumo de energia (contratada);
- ✍ controlar o fator de potência.

A.2 – Seqüência de Funcionamento do Programa “ACTEE”

A Figura A1 mostra a tela de abertura principal do programa.

The screenshot shows the main interface of the ACTEE program. It features a menu bar with 'Contas', 'Gráficos', 'Base Cálculo', and 'Sair'. Below the menu, there are input fields for 'Buscar Medidor' (3A000582), 'Número do Medidor' (3A000582), 'Faturamento Mês' (Janeiro), and 'Tarifação' (Horo Sazonal Azul). A table displays various energy consumption and cost metrics.

Consumo /KWh	32400	Demanda Contratada (KW)	249
Consumo Reativo/KWh	0	Demanda Medida (KW)	216
Consumo Fora de Ponta /KWh	0	Demanda Reativa (KWer)	0
Consumo de Ponta /KWh	0	Enc.Capacidade Emergencial / KWh	42105
Consumo Reativo Fora de Ponta /KWh	0	Fator de Potência	96.557
Consumo Reativo de Ponta /KWer	0		
Tarifa Consumo R\$		Tarifa Demanda R\$	6.83
Tarifa Consumo Reativo R\$		Tarifa Demanda Reativa R\$	0
Tarifa Consumo Fora de Ponta R\$	0	Tarifa Enc.Capacidade Emergencial R\$	0
Tarifa Consumo de Ponta R\$	0	Base de Calculo R\$	5973.75
Tarifa Consumo Reativo Fora de Ponta R\$	0	ICMS %	18
Tarifa Consumo Reativo de Ponta R\$	0	Valor Total da Fatura R\$	5973.75

Fig. A1 - Tela principal do programa ACTEE.

Após a entrada no programa, aparecerá uma tela com várias opções de acesso e é denominada de menu. Nesta tela, podemos acessar as outras funções como segue:

“Cadastro de contas”

- tarifa Convencional;
- tarifa Horo-Sazonal Verde – THV (Seco ou Úmido);
- tarifa Horo-Sazonal Azul - THA (Seco ou Úmido);

O botão “**cadastrar contas**”, possibilitará qual tipo de conta será utilizada (Convencional; THV; THA).

No passo seguinte o usuário entrará com os dados constantes nas faturas de energia elétrica. Os seguintes dados de entrada são necessários: número do medidor; mês e ano da fatura; demanda contratada; demanda medida; consumo ativo; fator de potência; tarifa de consumo; tarifa de demanda; tarifa de encargo de capacidade emergencial.

“Ver Contas”

Permite ao usuário acessar a tela dos dados cadastrados, podendo fazer alterações, isto é, incluir ou excluir dados.

“Gráfico Demanda”

Acessando este comando, o programa pede o **número do medidor** a ser analisado. Após digitá-lo, aparecem dois gráficos.

a) O primeiro, mostra a demanda medida em barras no período de cada mês, cadastrada no banco de dados. A faixa vermelha indica a demanda contratada, a faixa amarela indicará se no período analisado for constatado um pico de demanda, o qual será faturado pelos 85% de seu valor, que se prolongará nos seus onze meses subsequentes. Na legenda, aparece o valor da demanda medida no período. Se esta for maior que a contratada, aparecerá em tonalidade “amarela” o excedente.

b) O segundo gráfico mostra o faturamento da conta no período, segundo a maior ocorrência (demanda medida, contratada, ou 85% do maior pico medido no ciclo do faturamento). Na legenda, aparecerá o período em que a conta esta sendo analisada, e logo abaixo, o valor total da conta (R\$).

Abaixo do número do medidor há um campo “**opção de análise**”. Neste há duas opções: “faturamento no período”; “comparação com o período anterior”. Aparece um gráfico, com as alterações percentuais na demanda.

“Gráfico de Consumo”

Com este comando poderá ser visualizado o consumo da energia ativa em cada mês, o faturamento do consumo e o percentual que o mesmo representa no faturamento final.

No canto superior da tela há opção para comparar com os meses anteriores, aparecendo no segundo gráfico. Assim é possível analisar o consumo de crescimento ao longo do ano.

“Gráfico Fator de Potência”

Com este comando aparecem dois gráficos. O primeiro mostra o gráfico do fator de potência de cada mês. Nesse gráfico aparecerá uma faixa na cor verde, onde se indicará o limite do fator de potência (FP=0,92). No segundo gráfico, será demonstrado, na cor amarela, o consumo de energia reativa excedente. Na cor azul, a demanda de energia reativa excedente.

Abaixo do número do medidor há um campo **“opção de análise”**, o qual permite analisar: “faturamento no período”; “comparação com o período anterior”.

A.3 – Valores Faturados da Energia Elétrica no Período 2001/2002

Grupo tarifário: Convencional – Subgrupo A4.

Demanda Contratada: 249 kW.

A Tabela A1 mostra os valores faturados da energia elétrica dos meses do período analisado.

Tabela A1 – Valores das faturas nos últimos 24 meses

Período	Ano – 2001	Dólar mês	
	Valor da Fatura – R\$		Valor da Fatura - \$\$
Janeiro	5.973,75	1.951	3.061,89
Fevereiro	6.850,96	1.991	3.340,96
Março	7.191,50	2.041	3.523,52
Abril	7.178,54	2.153	3.334,20
Mai	7.624,31	2.205	3.457,74
Junho	7.283,77	2.382	3.057,84
Julho	6.976,60	2.312	3.017,56
Agosto	6.418,55	2.495	2.572,57
Setembro	8.505,77	2.565	3.316,10
Outubro	7.673,46	2.679	2.864,30
Novembro	6.459,45	2.675	2.414,75
Dezembro	6.095,42	2.453	2.484,88
Período	Ano – 2002	Dólar mês	
	Valor da Fatura – R\$		Valor da Fatura - \$\$
Janeiro	7.203,92	2.418	2.979,29
Fevereiro	9.779,14	2.347	4.166,66
Março	9.157,47	2.323	3.942,09
Abril	10.462,08	2.362	4.429,33
Mai	12.267,09	2.512	4.883,40
Junho	10.894,67	2.844	3.830,76
Julho	8.928,04	3.428	2.604,45
Agosto	8.540,72	3.022	2.826,18
Setembro	10.240,78	3.894	2.629,89
Outubro	10.407,18	3.644	2.855,98
Novembro	12.368,43	3.636	3.401,66
Dezembro			

APÊNDICE B

B.1 - Resultados das Medições

As tabelas a seguir mostram os valores das ordens harmônicas medidas para tensões e correntes dos alimentadores e equipamentos da planta industrial analisada.

Tabela B1 – Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Barramento do quadro de distribuição n ¹								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.13	0.06	0	2.13	1.80	0	*
Fundamental	59.98	224.78	99.81	-1	116.50	98.80	0	*
3	179.93	0.97	0.43	54	0.69	0.58	21	*
5	299.88	14.41	6.40	-32	16.44	13.94	-129	*
7	419.83	1.69	0.75	-148	2.94	2.49	-172	*
9	539.78	0.16	0.07	-138	1.56	1.33	-135	*
11	659.74	0.63	0.28	-49	3.44	2.92	36	*
13	779.69	0.25	0.11	148	2.56	2.17	-126	*
15	899.64	0.02	0.01	104	0.13	0.11	-127	*

Tabela B2– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Barramento do quadro de distribuição n ²								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.61	0.27	0	2.38	1.56	0	*
Fundamental	60.11	222.75	99.81	41	150.06	98.71	0	*
3	180.32	1.28	0.57	24	3.81	2.51	-44	*
5	300.53	9.48	4.25	159	16.44	10.81	-6	*
7	420.74	1.23	0.55	-111	9.81	6.45	-165	*
9	540.96	0.06	0.03	163	1.69	1.11	-29	*
11	661.17	2.02	0.90	9	12.00	7.89	101	*
13	781.38	0.39	0.18	172	1.50	0.99	-147	*
15	901.59	0.06	0.03	-33	0.13	0.08	42	*

Tabela B3– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador – 1								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.05	0.02	0	2.44	1.24	0	*
Fundamental	60.04	226.59	99.88	0	195.88	99.44	-44	*
3	180.12	0.56	0.25	131	2.06	1.05	96	*
5	300.20	10.97	4.83	-24	17.31	8.79	63	*
7	420.29	1.28	0.56	-171	2.00	1.02	-86	*
9	540.37	0.56	0.25	29	0.19	0.10	-126	*
11	660.45	0.63	0.28	-63	0.38	0.19	-110	*
13	780.53	0.36	0.16	165	0.06	0.03	-80	*
15	900.61	0.08	0.03	-150	0.19	0.10	-90	*

Tabela B4– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A da Máquina Solda 43 (ESM-43)								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.09	0.05	0	1.04	7.67	0	*
Fundamental	60.04	204.92	99.91	0	13.03	96.39	-27	*
3	180.12	0.36	0.18	122	0.49	3.61	67	*
5	300.20	8.00	3.90	-13	1.24	9.20	-102	*
7	420.29	1.38	0.67	-84	0.82	6.10	-136	*
9	540.37	0.47	0.23	56	0.16	1.16	-116	*
11	660.45	0.55	0.27	-28	0.14	1.02	120	*
13	780.53	0.27	0.13	-146	0.13	0.92	57	*
15	900.61	0.06	0.03	-74	0.04	0.32	85	*

Tabela B5– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A da Máquina Solda 50 (ESM-50)								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.00	0.00	0	0.01	0.05	0	*
Fundamental	60.04	209.28	99.91	0	12.79	95.14	-24	*
3	180.12	0.33	0.16	168	0.53	3.95	108	*
5	300.20	8.20	3.92	-18	1.24	9.25	-99	*
7	420.29	1.64	0.78	-94	0.79	5.90	-124	*
9	540.37	0.42	0.20	64	0.16	1.21	-101	*
11	660.45	0.94	0.45	-77	0.17	1.25	124	*
13	780.53	0.50	0.24	-160	0.11	0.84	85	*
15	900.61	0.05	0.02	-77	0.06	0.46	80	*

Tabela B6– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador – 2								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.05	0.02	0	0.51	0.56	0	*
Fundamental	59.98	227.45	99.90	0	90.67	99.85	-7	*
3	179.93	0.56	0.25	134	1.80	1.98	-127	*
5	299.88	11.13	4.89	-21	2.11	2.32	179	*
7	419.83	1.08	0.47	-160	1.50	1.65	-154	*
9	539.78	0.47	0.21	34	0.54	0.60	89	*
11	659.74	0.59	0.26	-29	0.19	0.21	61	*
13	779.69	0.30	0.13	-176	0.29	0.32	61	*
15	899.64	0.03	0.01	-158	0.19	0.21	-109	*

Tabela B7– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador Torno – 2								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.19	0.09	0	0.14	0.73	0	*
Fundamental	59.98	217.50	99.94	56	18.82	95.17	0	*
3	179.93	1.31	0.60	91	4.59	23.23	3	*
5	299.88	8.06	3.70	-112	3.78	19.12	49	*
7	419.83	1.06	0.49	-96	0.98	4.93	119	*
9	539.78	0.09	0.04	-12	0.16	0.79	-162	*
11	659.74	0.52	0.24	-70	0.34	1.74	75	*
13	779.69	0.58	0.27	-179	0.31	1.55	134	*
15	899.64	0.06	0.03	-103	0.09	0.47	-168	*

Tabela B8– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador – 3								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.16	0.07	0	0.02	0.03	0	*
Fundamental	59.98	226.33	99.91	53	71.19	99.08	0	*
3	179.93	0.44	0.19	-98	5.04	7.02	178	*
5	299.88	9.48	4.19	-118	8.24	11.47	-20	*
7	419.83	1.48	0.66	-144	0.71	0.98	152	*
9	539.78	0.27	0.12	179	0.14	0.19	-4	*
11	659.74	0.41	0.18	-74	0.10	0.14	-27	*
13	779.69	0.47	0.21	-168	0.23	0.31	-173	*
15	899.64	0.09	0.04	-176	0.11	0.15	-97	*

Tabela B9– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A da Máquina Solda 50 (ESM-50)								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.00	0.00	0	0.16	0.89	0	*
Fundamental	6.00	0.14	0.06	-146	0.74	4.22	0	*
3	18.01	0.08	0.04	-14	0.91	5.14	38	*
5	30.02	0.17	0.08	96	0.66	3.72	34	*
7	42.03	0.41	0.19	-142	0.16	0.89	91	*
9	54.04	1.44	0.66	-31	0.64	3.65	106	*
11	66.05	1.50	0.69	-100	0.64	3.65	146	*
13	78.06	0.55	0.25	19	0.21	1.17	34	*
15	90.07	0.41	0.19	131	0.33	1.88	-113	*

Tabela B10– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador – 4								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.02	0.01	0	2.13	0.99	0	*
Fundamental	59.98	225.78	99.91	75	214.44	99.51	0	*
3	179.93	0.55	0.24	-28	1.13	0.52	-41	*
5	299.88	8.73	3.87	-15	20.56	9.54	71	*
7	419.83	0.27	0.12	70	2.56	1.19	4	*
9	539.78	0.09	0.04	42	0.56	0.26	10	*
11	659.74	2.75	1.22	51	2.13	0.99	-39	*
13	779.69	1.23	0.55	-176	0.63	0.29	94	*
15	899.64	0.08	0.03	-26	0.44	0.20	-45	*

Tabela B11– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A da Máquina Solda 14 (ESM14)								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V Ø°	I Mag	%I RMS	3 Phase I Ø°	Power (KW)
DC	0.00	0.02	0.01	0	0.34	1.96	0	*
Fundamental	59.98	210.31	99.61	0	16.84	95.83	160	*
3	179.93	1.16	0.55	61	0.34	1.96	-156	*
5	299.88	18.30	8.67	-22	2.08	11.84	82	*
7	419.83	3.73	1.77	-81	1.11	6.33	44	*
9	539.78	0.27	0.13	-86	0.13	0.75	44	*
11	659.74	1.44	0.68	-65	0.21	1.21	-91	*
13	779.69	0.73	0.35	-110	0.20	1.14	-159	*
15	899.64	0.08	0.04	-72	0.07	0.39	-157	*

Tabela B12– Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente - baixa tensão

Referência: Fase A do Alimentador Iluminação								
Harmonicas	Freq.	V Mag	%V RMS	3 Phase V \varnothing°	I Mag	%I RMS	3 Phase I \varnothing°	Power (KW)
DC	0.00	0.03	0.01	0	0.19	0.21	0	*
Fundamental	59.98	212.41	99.96	21	90.84	99.96	0	*
3	179.93	1.34	0.63	-103	1.04	1.14	172	*
5	299.88	6.64	3.12	54	2.83	3.11	11	*
7	419.83	1.27	0.60	-24	0.68	0.75	-112	*
9	539.78	0.22	0.10	54	0.22	0.24	7	*
11	659.74	0.39	0.18	-125	0.30	0.33	-56	*
13	779.69	0.16	0.07	105	0.11	0.12	19	*
15	899.64	0.11	0.05	146	0.12	0.13	-81	*