



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia



Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria

José Carlos da Costa Campos

Engenheiro Eletricista

Prof. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires

Orientador

*Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
da Universidade Estadual de Campinas, como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires
Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho - UNICAMP/FEEC
Prof. Dr. José Pissolato Filho - UNICAMP/FEEC
Prof. Dr. José Carlos Rossi - UNESP/Ilha Solteira

30 de julho de 2001

A Deus pelo poder em nossas vidas.

*À minha esposa Maria Lúcia, e ao meu filho Tomás
pela dedicação e compreensão durante a realização deste trabalho.*

Resumo

O termo Qualidade de Energia se refere à Qualidade da tensão e corrente nas instalações elétricas, e representa hoje a mais importante prioridade da indústria. É imprescindível que nos processos, em particular nas plantas industriais, a operação aconteça sem nenhuma interrupção visto que o alto nível de produtividade é um fator importante a ser alcançado.

Entre os problemas de qualidade de energia, comumente encontrados nas operações industriais, estão incluídos transitórios (impulsivos, oscilatórios), variações de curta duração (interrupção, afundamento/sag, elevação/swell), variações de longa duração (interrupção permanente, subtensão, sobretensão), desequilíbrio de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação, eventuais níveis cc, interharmônicas), flutuação de tensão e variações de frequência da rede.

Este trabalho apresenta uma análise de caso em ambiente industrial, onde se procurou traçar o perfil do comportamento das diversas cargas e conhecer a natureza de cada equipamento que integra o sistema elétrico industrial para, em seguida, observar-se a rede de alta tensão.

Neste sentido, buscou-se implementar neste trabalho a classificação dos fenômenos de distorção, que podem ter origem na concessionária de energia elétrica ou nos equipamentos da indústria, podendo haver também casos oriundos da interação de ambas.

Através desta avaliação do sistema industrial pode ser elaborada uma estratégia de conservação e melhora da qualidade de energia.

Abstract

The term Power Quality refers to the voltage and current quality in the electric facilities, and nowadays it represents the one of the main priority of industry. It is indispensable that in the processes, particularly in the industrial plants, the operation takes place without any interruption since the high level of productivity is the most important subject to be reached.

In the Power Quality problems, commonly faced in the industrial operations, it can be included transients (impulsive, oscillatory), short duration variations (interruption, sag, swell), long duration variations (sustained interruptions, undervoltage, overvoltage), voltage unbalances, waveform distortions (harmonics, noise, notching, DC offset, interharmonics), voltage fluctuations and power frequency variations.

This work presents a case study about an industrial environment analysis, in which it is tried to describe the electrical profile of several loads and to identify the nature of each equipment of the industrial electrical system and later on, to observe the behavior at high tension system.

It is tried to implement in this work a classification of the distortion phenomena that can started on the power utility or on the industry equipment or on both.

Through this industrial system evaluation one can develop a strategy for conservation and Power Quality improvement.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Campinas

À Professora Francisca Aparecida de Camargo Pires, pela amizade, pelo incentivo ao se iniciar uma nova etapa da minha vida, pela colaboração e compreensão durante o desenvolver deste trabalho, permanece para sempre toda a minha gratidão.

Ao professor Sigmar Maurer Deckmann, pela sua disponibilidade em contribuir de forma decisiva para realização deste trabalho, fica aqui o meu grande apreço.

Aos meus pais Carlos e Ivone que foram incansáveis em mostrar o verdadeiro objetivo da vida. Aos meus irmãos Carlos Alberto, Júlio César, Heloisa e Rosilene, minha gratidão pelo incentivo.

Aos amigos do Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica e do Departamento de Sistemas e Controle da Energia, em especial a Izabel pela ajuda constante, e também aos companheiros Luciana, Edson, Ricardo, Fernando, Massakiti, Fabricio e Roberto pelas suas participações envolvendo este trabalho.

Ao Diretor Pedro Gregório por disponibilizar as instalações da Magneti Marelli para a execução do trabalho, o meu agradecimento por esta confiança na idealização deste desafio.

À professora de inglês Margarida Schiefer pela sua dedicação na sua tarefa de ensinar.

Finalmente, à CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Sumário	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Qualidade de Energia Elétrica	1
1.1 Introdução	1
1.2 Estado da Arte	2
1.3 Qualidade e Conservação da Energia Elétrica	5
1.4 Estratégia	7
2 Condições Ideais de Operação	9
2.1 Introdução	9
2.2 Estudos dos Transitórios Elétricos Em Sistemas Industriais	10
2.2.1 Energização de Transformadores	10
2.2.2 Equação da Corrente de Excitação Transitória-Inrush	12
3 Perfil dos Distúrbios	17
3.1 Introdução	17
3.2 Detalhes dos Fenômenos	19
3.3 Transitórios	19

3.3.1	Transitório Impulsivo	20
3.3.2	Transitório Oscilatório	20
3.4	Variações de Curta-Duração	22
3.4.1	Interrupção	23
3.4.2	Afundamentos de tensão(Sags)	23
3.4.3	Elevações de tensão(Swells)	24
3.5	Variações de Longa Duração	25
3.5.1	Sobretensão	25
3.5.2	Subtensão	25
3.5.3	Interrupções Sustentadas	26
3.6	Desequilíbrio de Tensão	26
3.7	Distorção da Forma de Onda	27
3.7.1	Nível Contínuo(DC Offset)	27
3.7.2	Harmônicas	28
3.7.3	Interharmônicas	31
3.7.4	Recortes de comutações (Notching)	31
3.7.5	Ruído (Noise)	32
3.8	Flutuações de Tensão	32
3.9	Variações de frequência da rede	33
4	Estudo de Caso em Qualidade de Energia Elétrica	35
4.1	Introdução	35
4.2	Instrumentos de Medição	35
4.2.1	BMI Power Evaluation Software	35
4.2.2	Multiteste ET-2001	36
4.2.3	Nanovip	36
4.3	Sistema de distribuição de energia elétrica da fábrica	37
4.3.1	Cabine de Medição	39
4.3.2	Quadro de Distribuição de Força QDF001	39
4.3.3	Quadro de Distribuição de Força QDF002	40
4.3.4	Quadro de Distribuição de Força QDF003	41
4.3.5	Quadro de Distribuição de Força QDF004	41
4.3.6	Quadro de Distribuição de Força QDF005/Escritório-Restaurante	42
4.4	Monitoramento das Formas de Onda - Cabine de Medição	43
4.5	Monitoramento dos Afundamentos de Tensão - Cabine de Medição	47
4.6	Monitoramento das Distorções da Forma de Onda - Cabine de Medição	51

4.7	Monitoramento dos Gráficos de Tensão - Cabine de Medição	58
4.8	Monitoramento da Potência Aparente Demandada - Cabine de Medição	61
4.9	Monitoramento dos Transitórios - QDF001	63
4.10	Monitoramento das Formas de Ondas - QDF001	68
4.11	Monitoramento das Distorções da Forma de Onda - QDF001	72
4.12	Monitoramento dos Gráficos de Tensão e Corrente - QDF001	81
4.13	Monitoramento da Potência Aparente Demandada - QDF001	85
4.14	Máquina de Solda Soltronic MSM 132	88
4.15	Monitoramento das Distorções na Forma de Onda da Máquina de Solda Soltronic	90
4.16	Monitoramento das Distorções na Forma de Onda dos Equipamentos da Produção	100
5	Conclusões Gerais	107
	Referências Bibliográficas	109

SUMÁRIO

Lista de Figuras

2.1	Energização do transformador no instante em que o fluxo é máximo negativo, sem fluxo residual.	11
2.2	Curva de corrente do transformador para $\theta = 20^0$	13
2.3	Curva de corrente do transformador para $\theta = 20^0$	14
2.4	Curva de corrente de transformador para $\theta = 60^0$	14
2.5	Curva de magnetização do transformador para $\theta = 60^0$	15
2.6	Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi$	15
2.7	Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi - 90^0$	16
2.8	Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi - 90^0$	16
4.1	Diagrama Unifilar da Fábrica	38
4.2	Forma de Onda da Tensão Va-Cabine de Medição	44
4.3	Forma de Onda da Corrente Ia-Cabine de Medição	45
4.4	Forma de Onda da Tensão Vb-Cabine de Medição	45
4.5	Forma de Onda da Corrente Ib-Cabine de Medição	46
4.6	Forma de Onda da Tensão Vc-Cabine de Medição	46
4.7	Forma de Onda da Corrente Ic-Cabine de Medição	47
4.8	Afundamento da tensão eficaz Va-Cabine de Medição	48
4.9	Variação da corrente eficaz Ia-Cabine de Medição	48
4.10	Afundamento da tensão eficaz Vb-Cabine de Medição	49
4.11	Variação da corrente eficaz Ib-Cabine de Medição	49
4.12	Afundamento da tensão eficaz Vc-Cabine de Medição	50
4.13	Variação da corrente eficaz Ic-Cabine de Medição	50
4.14	Harmônicas da Tensão Va-Cabine de Medição	52
4.15	Harmônicas da Tensão Vb-Cabine de Medição	53
4.16	Harmônicas da Tensão Vc-Cabine de Medição	54
4.17	Harmônicas da Corrente Ia-Cabine de Medição	55

LISTA DE FIGURAS

4.18	Harmônicas da Corrente Ib-Cabine de Medição	56
4.19	Harmônicas da Corrente Ic-Cabine de Medição	57
4.20	Comportamento da tensão eficaz Va-Cabine de Medição	59
4.21	Comportamento da corrente eficaz Ia	59
4.22	Comportamento da tensão eficaz Vb-Cabine de Medição	60
4.23	Comportamento da tensão eficaz Vc-Cabine de Medição	60
4.24	Potência aparente demandada (kVA) - Cabine de Medição	61
4.25	Demanda em kW - Cabine de Medição	62
4.26	Impulso das Tensões Va e Vb - QDF001	64
4.27	Impulso da tensão Vc - QDF001	65
4.28	Impulso da corrente Ia - QDF001	65
4.29	Correntes Ib e Ic - QDF001	66
4.30	tensão Vn e corrente In - QDF001	67
4.31	Forma de Onda das Tensões Va e Vb - QDF001	68
4.32	Forma de Onda da Tensão Vc e da Corrente Ia - QDF001	69
4.33	Forma de Onda das Correntes Ib e Ic - QDF001	70
4.34	Forma de Onda da Tensão Vn e da Corrente In - QDF001	71
4.35	Distorção Harmônica da Tensão Va -QDF001	72
4.36	Distorção Harmônica da Tensão Vb - QDF001	73
4.37	Distorção Harmônica da Tensão Vc - QDF001	74
4.38	Distorção Harmônica da Corrente Ia - QDF001	75
4.39	Distorção Harmônica da Corrente Ib - QDF001	76
4.40	Distorção Harmônica da Corrente Ic - QDF001	77
4.41	Distorção Harmônica da Corrente Ic-corrigida	78
4.42	Distorção Harmônica da Tensão Vn	79
4.43	Distorção Harmônica da Corrente In	80
4.44	Variações das Tensões Va e Vb - QDF001	81
4.45	Variações das Tensões Vc e Vn - QDF001	82
4.46	Variações das Correntes Ia e Ib - QDF001	83
4.47	Variações das Correntes Ic e In - QDF001	84
4.48	Curvas da Potência Aparente Demandada Total (kVA)- QDF001	85
4.49	Curvas de Potência Aparente Demandada nas Fases A e B - QDF001	86
4.50	Curva de Potência Aparente Demandada na Fase C - QDF001	87
4.51	Forma de Ondas da tensão e corrente na Máquina de Solda Soltronic	90
4.52	Impulsos da Tensão e Corrente na Máquina de Solda Soltronic	91
4.53	Harmônica da Tensão Va na Máquina de Solda Soltronic	92

4.54 Harmônica da Tensão Vb na Máquina de Solda Soltronic	93
4.55 Harmônica da Tensão Vc na Máquina de Solda Soltronic	94
4.56 Harmônica da Corrente Ia na Máquina de Solda Soltronic	95
4.57 Harmônica da Corrente Ib na Máquina de Solda Soltronic	96
4.58 Harmônica da Corrente Ic na Máquina de Solda Soltronic	97
4.59 Comportamento da Tensão Va na Máquina de Solda Soltronic	98
4.60 Comportamento da Tensão Vb na Máquina de Solda Soltronic	98
4.61 Comportamento da Tensão Vc na Máquina de Solda Soltronic	99
4.62 Potência Aparente Demandada da Máquina de Solda Soltronic	99
4.63 Comportamento das Tensões Va, Vb, Vc e das correntes Ia, Ib, Ic da Prensa . . .	100
4.64 Forma de Onda das tensões da Curvadora de Tubos BLM	100
4.65 Forma de Onda das correntes da Curvadora de Tubos BLM	101
4.66 Forma de Onda das Correntes do Recravador Comas	101
4.67 Forma de Onda das Tensões do Recravador Comas	102
4.68 Forma de Onda da tensão Va do Compressor	103
4.69 Forma de Onda da tensão Vb do Compressor	103
4.70 Forma de Onda da tensão Vc do Compressor	104
4.71 Forma de Onda da corrente Ia do Compressor	104
4.72 Forma de Onda da corrente Ib do Compressor	105
4.73 Forma de Onda da corrente Ic do Compressor	105

LISTA DE FIGURAS

Lista de Tabelas

3.1	Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistema Elétrico	18
3.2	<i>Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão . . .</i>	29
3.3	<i>Limites das distorções harmônicas de corrente(I_h)em % de I_L</i>	30
4.1	Mudança de Polaridade	43

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Qualidade de Energia Elétrica

1.1 Introdução

Qualidade de Energia Elétrica designa uma área de estudos pertinente aos Sistemas de Energia Elétrica, que corresponde ao termo composto da língua inglesa "Power Quality", e tem sido usada para agregar em um único tema uma série de conceitos utilizados em engenharia elétrica. Este tema vem sendo, em anos recentes, objeto de preocupação e de esforços coordenados de diagnósticos e de análise para que se atinja o maior entendimento possível sobre o mesmo. Protagonistas desta atitude têm sido, tanto concessionárias de energia elétrica, quanto grandes consumidores, bem como universidades, centros de pesquisa e fabricantes de equipamentos. Em face disso a matéria tem merecido ampla divulgação através de um número infindável de artigos, informes técnicos e comentários em publicações nacionais e internacionais.

O estudo, a caracterização, a compreensão, em resumo, a abordagem de alguns dos fenômenos que afetam a Qualidade de Energia Elétrica, já vinham apresentando avanços significativos. Contudo, quase sempre foram tratados de forma independente e sem levar muito em conta as inevitáveis inter-relações entre os sistemas supridor e consumidor. Por outro lado, restaram ainda fenômenos que não foram analisados profundamente ou sob esta ótica unificadora.

Quando ocorre um fenômeno que afeta a qualidade de energia elétrica, surgem inevitavelmente, até em seus aspectos mais primários, dificuldades, tais como: conceituação apropriada, nomenclatura adequada, definição de assuntos pertinentes, simbologia padronizada, regulamentação alicerçada, assim como os limites a serem observados para aferir a relevância de um problema de qualidade de energia nos diferentes cenários que possam vir a interessar.

Em face do exposto, é natural e até imprescindível a priorização do tema, sobretudo em projetos de novas unidades industriais, bem como nos de modernização das já existentes. Não se deve, contudo, deixar de observar que, em geral, soluções em qualidade de energia só são

passíveis de serem alcançadas, quando fornecedor de energia, consumidor e fabricantes de equipamentos conscientizam-se da necessidade de entendimento mútuo para tal.

1.2 Estado da Arte

No âmbito internacional, a preocupação com um dos principais temas abrangidos por Qualidade de Energia Elétrica, que é o de harmônicas, e que por muitos anos dominou o cenário mundial, começou na segunda metade da década de 60 com os impactos dos sistemas de transmissão em corrente contínua nos tradicionais sistemas de potência em corrente alternada (HVDC). Este mesmo assunto dominou as publicações na primeira metade da década de 70, tais como: (A.G. Phadke 1968),(Ainsworth 1967), (A. Lacoste 1969), (N.G. Hingorani 1970), (Bowles 1970) e (J. Reeve 1974).

Na segunda metade da década de 70 foram elaborados, ainda neste mesmo assunto, alguns importantes trabalhos de doutorado desenvolvidos por pesquisadores brasileiros (de Oliveira 1978),(Ribeiro 1975). Nesta mesma época o tema Harmônicas em Sistemas de Energia Elétrica deixou de ser restrito aos problemas oriundos dos sistemas HVDC, mesmo como tema de tese de doutorado(Pacheco 1977). Neste sentido, harmônicas passou a ser o principal tema de discussão da comunidade que hoje pode ser identificada como envolvida em Qualidade de Energia Elétrica. Alguns significativos artigos desta época são:(D.E. Steeper 1976),(Linders 1979) e (Shipp 1979). Mesmo assim, já nesta época, problemas operacionais com computadores começaram a ser atribuídos à má qualidade da energia elétrica, onde o distúrbio mais comum é o afundamento de tensão (Key 1979).

Em 1984 foi realizado o 1st ICHPS (International Conference on Harmonics in Power Systems) sob patrocínio do IEEE. Esta Conferência, com realização bi-anual, tornou-se o mais importante evento internacional na área, hoje reconhecida como qualidade de energia elétrica.

À medida que o tempo passava, as distorções devidas às harmônicas tornavam-se apenas uma parcela do universo das distorções encontradas nos sistemas de energia elétrica em todo o mundo. Qualidade de Energia Elétrica passou então englobar todos os possíveis distúrbios dos sistemas de energia elétrica. Muitos artigos com este enfoque passam então a surgir, citando-se (François D. Martzloff 1988) como exemplo visto que neste trabalho é feita uma abordagem sobre os principais distúrbios que afetam cargas eletrônicas sensíveis e são relatadas as origens e tipos de distúrbios, resumindo praticamente nove publicações americanas e européias dos 20 anos anteriores,como (Price 1992) e outros.

E assim o original ICHPS teve sua denominação alterada em 1996, uma vez que a ênfase dos trabalhos apresentados na conferência já tinha deixado de ser apenas em harmônicas. Deste modo a edição da conferência em 1996 (Las Vegas) já apresentou a denominação de

International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Vale a pena ressaltar que apesar do termo, em inglês, Power Quality ser o mais utilizado coloquialmente, o mesmo não pôde ser utilizado na designação da conferência, uma vez que a Electrotek, empresa americana, havia registrado o termo Power Quality, e portanto o seu uso demandaria o pagamento de "royalties".

No Brasil, até duas décadas atrás, as reclamações da "qualidade" do fornecimento de energia elétrica eram basicamente associadas às interrupções na tensão de alimentação dos consumidores. Para regulamentar as condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica, o DNAEE lançou as portarias 046 e 047, de 17/4/78 e a portaria 031, de 11/4/80 considerando ser imprescindível a "conceituação de serviço adequado" de energia elétrica, o "estabelecimento de método uniforme para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos", e a "definição dos limites de variação das tensões" a serem observados pelas empresas de energia elétrica (EEE). Daí a grande utilização dos índices relativos à continuidade de serviço denominados "duração equivalente de interrupção - DEC" e "frequência equivalente de interrupção - FEC", os quais exprimem, respectivamente, o "espaço de tempo em que, em média, cada consumidor do conjunto considerado ficou privado de fornecimento de energia elétrica" e o "número de interrupções que, em média, cada consumidor do conjunto considerado sofreu", em um certo período de tempo considerado.

Vale a pena ressaltar que na apuração desses índices são computadas todas as interrupções ocorridas em qualquer parte do sistema independente de sua natureza: programadas, acidentais ou decorrentes de manobras, não sendo consideradas, porém as interrupções com duração inferior a 3 minutos, ou as quedas causadas por falha nas instalações do próprio consumidor, desde que não afete outros consumidores.

Já para os índices de continuidade referentes ao suprimento (DEKS e FEKS) são computadas todas as interrupções que afetem os supridos ou pontos de interligação alimentados pelo supridor considerado, independente de sua origem, incluindo-se as programadas mas com exceções às interrupções com duração inferior a 1 minuto e aquelas causadas por operação de dispositivos do próprio suprido ou falha em seus sistemas, desde que não afete outros supridos.

Com relação aos limites de variação de tensão de fornecimento no ponto de entrega de energia, o DNAEE estabelecia a faixa de +5% e -7,5% da tensão nominal do sistema, sem contudo considerar as variações momentâneas de tensão ocasionadas pelos defeitos, manobras, alterações bruscas de cargas ou perturbações similares.

Observava-se portanto que existia uma lacuna na legislação vigente com relação aos índices de continuidade e os limites de variação de tensão associados às interrupções e às variações momentâneas de tensão, ou seja aquelas interrupções/variações com duração inferiores a 3 minutos, para o DEC e FEC, e a 1 minuto para o DEKS e FEKS. No entanto, era necessário

que essas interrupções/variações momentâneas de tensão fossem levadas em conta, uma vez que tais distúrbios, mesmo sendo de curta duração, são causadores de paradas em processos industriais por várias horas, dependendo do tipo do processo e do instante em que o fenômeno ocorre.

A partir de 1978, a Eletrobrás passou a discutir os critérios e metodologias para o atendimento a consumidores com cargas não-lineares, também denominadas Cargas Especiais. Em 1984 houve uma revisão destes critérios e metodologias com o objetivo de acrescentar a experiência nacional das EEE que vinham desde a segunda metade da década de 70, enfrentando problemas envolvendo harmônicas. As propostas de critérios, procedimentos técnicos e limites recomendados nos relatórios emitidos, foram direcionados essencialmente para o controle dos distúrbios de natureza "quase-permanente" (distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão) causados pela operação das Cargas Especiais, de forma que não viessem a prejudicar a operação dos outros tipos de cargas eletricamente próximas. Em 1993, foi feita uma nova revisão dos documentos anteriores, levando em conta a experiência dos grupos de trabalho da CIGRÉ, UIE, IEC e IEEE bem como a experiência operacional com as Cargas Especiais das EEE brasileiras.

Entidades representativas dos grandes consumidores de energia elétrica, tais como o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) e a Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia (ABRACE), também participaram do debate sobre os limites recomendados pelo GCOI.

Em 1996, como reflexo dos anseios da comunidade técnico/científica brasileira, que trabalhava com problemas pertinentes à qualidade de energia elétrica, foi criado o Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE), que hoje é o evento mais importante no Brasil, no tema. Vários artigos sobre estudos de casos industriais foram apresentados nas edições de 96 e 97 do SBQEE, mostrando a necessidade de haver uma interação entre consumidores, fabricantes de equipamentos e concessionárias de energia para atenuar os efeitos dos distúrbios na qualidade de energia. A seguir descreve-se alguns trabalhos importantes nas discussões de casos industriais: (A.G.G. Lima 1996) apresenta os resultados do primeiro estudo de Qualidade de Energia em grandes consumidores industriais patrocinado pelo CODI, Eletrobrás e EPRI. O problema enfocado, nesse caso, é a elevada distorção harmônica de tensão provocada por fornos de indução de vários consumidores pertencentes ao mesmo sistema de distribuição, (R.P.D. Ross 1996) mostra os estudos realizados para investigação de problemas de Qualidade de Energia envolvendo a concessionária Light e o consumidor Cosigua. Neste caso existem vários problemas de Qualidade de Energia. Do ponto de vista do consumidor ocorrem desligamentos, em várias linhas de produção, que são atribuídos às oscilações de tensão no sistema da concessionária. Do ponto de vista da concessionária, os problemas são harmônicos e cin-

tilação de tensão causados pelo consumidor, (Ricardo A. Dutra 1996) mostra o envolvimento da concessionária e do consumidor industrial com fabricantes de equipamentos, visando uma melhor qualidade do produto energia elétrica fornecida, (Tatiana N. Ribeiro 1997) descreve brevemente o trabalho de diagnóstico da Qualidade de Energia suprida a um Consumidor Industrial de Distribuição. Apesar do consumidor possuir um processo sensível devido a presença de controladores e de acionamentos a velocidade variável, não eram estes equipamentos que paravam o processo, mas a proteção destes equipamentos. Neste artigo fica evidenciado que muitas vezes os problemas podem ser evitados na fase de planejamento do consumidor industrial com a assessoria da concessionária. Uma simples verificação, por parte do consumidor, quanto a especificação do equipamento no ato da compra, aliada a uma verificação, junto à concessionária, das probabilidades de ocorrência de afundamentos na faixa de sensibilidade do equipamento, poderá garantir a operação de equipamentos oriundos de outros países.

O propósito do artigo (J. Maria de C. Filho 1997) é abordar medidas preventivas e corretivas que possam ser implementadas tanto no âmbito da concessionária quanto no do consumidor, objetivando a minimização do impacto de Voltage Sags sobre os consumidores de energia elétrica, minimizando portanto, os prejuízos econômicos devidos a interrupções de processo e desligamentos indesejáveis, (Francis C. Pereira 1997) tem como objetivo apresentar uma estratégia através da qual, possam ser estabelecidos os procedimentos de campo e de análise para os estudos voltados à qualidade da energia elétrica em instalações industriais. Além das discussões de caráter teórico, a estratégia apresentada foi também aplicada a um caso real. No entanto, a qualidade de energia elétrica restringiu-se à questão dos harmônicos.

No artigo (Oliver Péricles O. Freitas 1997) vê-se que conservação e qualidade da energia elétrica estão diretamente correlacionadas. Medidas tomadas com o intuito de melhorar a qualidade da energia, produzem normalmente efeitos positivos sobre a conservação da energia, com redução de perdas, devido a sobreaquecimento em transformadores e máquinas rotativas.

1.3 Qualidade e Conservação da Energia Elétrica

Este trabalho busca uma harmonia entre conservação de energia elétrica e qualidade de energia elétrica, procurando-se entender claramente a definição de Qualidade de Energia Elétrica (Power Quality), suas causas, problemas e soluções necessárias sob o ponto de vista do consumidor e também sob o ponto de vista da concessionária de energia.

Aparentemente Conservação e Qualidade de Energia Elétrica são duas áreas de pesquisa distintas e independentes. No entanto podem ser estabelecidas correlações entre elas. Sabe-se que ações implementadas para a melhoria da qualidade trazem como consequência, normalmente, reflexos positivos na área da conservação. Contudo, algumas das ações no campo da

conservação da energia geram problemas de qualidade. (J. Policarpo G. Abreu 1997)

O estudo de um caso industrial pode ser o ponto de partida para a elaboração de um conjunto de ações que possam vir a ser adotadas em outras indústrias. O propósito final é conhecer a realidade do consumidor industrial, entender seus problemas, ter consciência sobre os problemas que afetam o rendimento, e o desempenho dos equipamentos e finalmente sistematizar soluções. Obviamente, certas soluções poderão requerer novos investimentos, mas certamente a relação custo/benefício destes investimentos poderá se revelar extremamente favorável com o passar do tempo.

Cada vez mais, e com mais ênfase, os consumidores industriais dependem de dispositivos eletrônicos que demandam uma alimentação isenta de distúrbios. Tais dispositivos, normalmente, fazem parte de unidades controladoras de máquinas e processos, que ocupam um espaço cada vez maior no sistema industrial. Na implantação dos novos modelos de controle houve ocorrências de muitas paradas de equipamentos, esta situação não seria verificada se certos parâmetros de qualidade de energia fossem plenamente observados por todas as concessionárias e todos os seus grandes e médios consumidores.

Qualidade de energia é um termo que pode ser usado para descrever os limites de variação das correntes e tensões de um sistema elétrico. A maior parte dos distúrbios pode ser originada em qualquer consumidor que tenha equipamentos classificados como não lineares. A ocorrência simultânea deste tipo de distúrbio em vários consumidores, ou mesmo internamente em um único consumidor, agrava a ultrapassagem dos limites impostos a certos valores de correntes e tensões dos sistemas de energia, aceitos como toleráveis dentro de um quadro de Qualidade de Energia.

Os efeitos produzidos pela má qualidade de energia nos equipamentos elétricos são variáveis, indo desde ligeiros aquecimentos até falha total. Cada tipo de equipamento sensível aos distúrbios, principalmente os eletrônicos, difere em seu comportamento em relação às quantidades e intensidades das variações das grandezas elétricas, antes que ocorra uma falha.

Fatores importantes na ocorrência de uma falha de um equipamento (F.J. Salem 2000) são:

1. O tipo, magnitude e duração do distúrbio;
2. A sensibilidade do equipamento em relação ao distúrbio;
3. A localização no sistema de distribuição do consumidor, e
4. A idade do equipamento.

Nestes anos recentes tem aumentado consideravelmente o número de equipamentos, aparelhos e controles sensíveis à qualidade de energia, como também tem-se verificado um aumento

no número de sistemas de cargas que produzem distúrbios (tais como harmônicas causadas pelo controle de velocidade variável de um motor). Cargas como computadores, controles de processo, e equipamentos de comunicação são mais sensíveis à qualidade da energia do que as tradicionais cargas dos sistemas de energia elétrica.

Tem sido contínuo o crescimento da utilização dos dispositivos eletrônicos de potência, no sentido de aperfeiçoar a eficiência de todos os sistemas de energia e de facilitar os seus controles. Infelizmente, estes dispositivos eletrônicos contribuem para degradar a qualidade de energia, e são exatamente estes usuários que necessitam de alta qualidade de energia para os seus equipamentos de controle, é que se tornam os maiores contribuintes para ocorrências dos fenômenos que degradam a Qualidade da Energia Elétrica. Estes consumidores precisam entender como os distúrbios afetam cargas sensíveis e assim desenvolver técnicas de controle adequadas ao seu próprio sistema elétrico, ou instalar equipamentos para atenuar os efeitos destes eventos. Por exemplo, harmônicas, podem causar aquecimento em equipamentos, interferência nas comunicações e falhas no controle; já um afundamento de tensão (voltage sags) de somente poucos ciclos pode resultar em desligamento de controladores de velocidades, ou perda de informações em computadores.

1.4 Estratégia

Para se conseguir que uma indústria venha a operar em níveis recomendáveis de qualidade de energia, é necessário primeiramente que se viabilize um plano que possa criar as condições básicas de operação do sistema elétrico. Este plano representa uma infra estrutura para que se possa atingir um avançado grau de confiabilidade e segurança do sistema. A criação deste plano, essencialmente buscará relacionar as normas e recomendações existentes com a realidade operacional da fábrica.

Elaborar um plano para identificar comportamentos operacionais das cargas, melhorar a configuração do sistema industrial e aplicar uma manutenção preventiva eficiente é vital para se iniciar um caminho permanente na busca da conservação e da alta qualidade na operação do sistema. Somente a partir deste plano é possível decidir sobre o investimento em dispositivos que permitam as correções necessárias do sistema elétrico industrial. O trabalho aqui apresentado tem por objetivo a elaboração de um plano estratégico para a melhoria da qualidade de energia em ambiente industrial tentando sempre aliar esta melhoria à conservação de energia.

Este trabalho foi desenvolvido em 5 capítulos: neste primeiro capítulo foi apresentado o estado da arte pertinente aos parâmetros de qualidade de energia elétrica, bem como um breve relato das condições observadas em diversos ambientes industriais no Brasil. No segundo capítulo são apresentadas as condições ideais de operação, dando-se uma ênfase especial ao

comportamento transitório dos transformadores por ocasião da energização. No terceiro são apresentados o perfil dos distúrbios. No quarto é apresentado um estudo de caso em ambiente industrial. No quinto são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Condições Ideais de Operação

2.1 Introdução

Antes de estudar os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica deve-se verificar quais as condições ideais de operação de um sistema elétrico. Assim na falta de critérios específicos para avaliar a qualidade de energia pode-se comparar as condições reais de operação com as características de um sistema ideal e, a partir daí, estabelecer uma escala quantitativa e classificatória para os desvios observados.

As condições ideais de operação de um sistema elétrico são:

1. Tensões e correntes alternadas com formas de ondas senoidais puras;
2. Amplitudes constantes nos valores nominais;
3. Frequência da rede constante no valor síncrono;
4. Tensões trifásicas equilibradas;
5. Fator de potência unitário nas cargas;
6. Perdas nulas na transmissão.(Deckmann 1999)

Em um sistema real é impossível satisfazer todas estas condições ideais, visto que a rede de alimentação e os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que deterioram de alguma forma as condições que seriam desejáveis para a operação. Portanto este é o grande desafio: propor metas coerentes que venham a contribuir na busca da qualidade de energia e da conservação de energia elétrica.

2.2 Estudos dos Transitórios Elétricos Em Sistemas Industriais

Ao considerar os efeitos causados por distorção de ondas, é natural concentrar os esforços nas fontes individuais não lineares de grande potência, por exemplo, os conversores estáticos. No entanto, os componentes de geração, transmissão e utilização da energia elétrica, frequentemente não garantem formas de onda perfeitamente senoidais podendo dar lugar a níveis de distorção que não podem ser ignorados.

Antes do desenvolvimento da eletrônica de potência, as principais fontes de distorção harmônica eram as máquinas rotativas, os transformadores de potência e as lâmpadas de arco. Em condições normais de funcionamento as máquinas rotativas e transformadores modernos podem causar níveis significativos de distorção. Estes níveis aumentam consideravelmente durante os transitórios e com sobretensões, condições que causam grande distorção nas correntes de magnetização.

2.2.1 Energização de Transformadores

As manobras de energização de transformadores apresentam particularidades que podem conduzir a valores de sobretensões indesejáveis nos sistemas, em função da característica não linear destes equipamentos. O núcleo do transformador, de material magnético, em presença de um campo magnético alternado, trabalha em um ciclo de histerese.

Várias aproximações simples e úteis podem ser obtidas, se o efeito de histerese do material for desprezado. A aproximação mais comumente usada é conhecida como curva característica de magnetização ou curva de saturação. Esta curva é o lugar geométrico dos vértices dos ciclos de histerese do transformador. A curva característica de magnetização pode ser analisada em duas regiões distintas: até o fluxo magnético atingir o joelho da curva e após este valor ser alcançado. A região de operação até o joelho corresponde à região linear, a partir daí o transformador será não linear.

Os materiais mais comumente empregados nos núcleos de transformadores apresentam, em regime, corrente de magnetização de 0,1 a 5% da corrente nominal. Quando um transformador opera na região superior ao joelho da curva de magnetização, a corrente de excitação, normalmente, aumenta muito. Além disso, pequenas variações de fluxo devidas a variações momentâneas de tensão associadas, por exemplo, com a entrada de uma carga de porte significativo em relação ao nível de curto circuito local do sistema, provocam notáveis variações transitórias da corrente de magnetização.

Assim, a operação na região considerada saturada só é usual durante transitórios do sistema, notadamente a energização com secundário em vazio. Nesta situação a corrente presente nos enrolamentos primários é a corrente de excitação transitória, também conhecida como corrente

de inrush.

Geralmente, nos primeiros ciclos após a energização, a corrente de inrush apresenta amplitude muito superior à corrente nominal do transformador. À medida que o tempo passa, a amplitude vai decrescendo até atingir o valor de regime permanente. Este transitório tem duração bastante longa, e dependendo da potência nominal do transformador pode perdurar por vários segundos.

O valor inicial da corrente de inrush depende principalmente do ponto de tensão no qual se deu a energização, mas também é influenciado pela magnitude e polaridade do magnetismo residual que ficou no núcleo após ao último desligamento, bem como pela saturação do núcleo e pela impedância total do sistema de alimentação.

Quando o transformador é desligado, sua corrente de excitação vai a zero. O fluxo então, seguindo o laço de histerese, cairá para um valor residual ϕ_R . Se o transformador for reenergizado no instante em que a onda de tensão passar por um valor tal que o fluxo magnético corresponda exatamente ao fluxo residual no núcleo, tem-se uma continuação suave da operação prévia sem um transitório magnético. Na prática, entretanto, o instante de fechamento não pode ser controlado e um transitório será inevitável (Ary D Ajuz 1987).

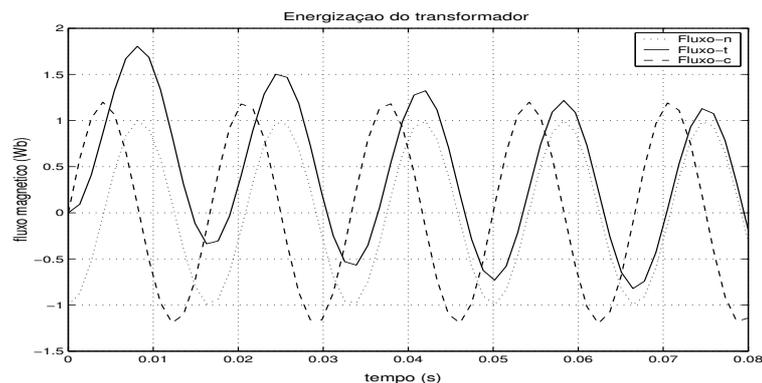


Figura 2.1: Energização do transformador no instante em que o fluxo é máximo negativo, sem fluxo residual.

Para que as razões do aparecimento destas correntes elevadas sejam melhor entendidas, considera-se que determinado transformador será energizado pela primeira vez, ou seja, sem a existência de nenhum fluxo residual ϕ_R , quando a tensão estiver passando por zero. Como o fluxo magnético está atrasado 90° elétricos da tensão, o fluxo estará passando por seu valor máximo negativo no instante da energização. Assim, neste instante, o fluxo resultante no transformador teria que variar instantaneamente de zero para o valor inicial $-\phi_{max}$. Como o

fluxo magnético não pode ser criado nem destruído instantaneamente, é necessário que apareça uma componente transitória com valor inicial dado por $\phi_c = -(\phi_n - \phi_R)$ de forma que a onda de fluxo, ao invés de começar com valor inicial ($-\phi_{max}$) e continuar pela linha pontilhada, começará com valor nulo ($\phi_R = 0$) seguindo a curva ϕ_t , como mostra a fig.2.1.

Todas as outras energizações subseqüentes a esta primeira encontrarão o transformador com algum valor de fluxo residual. A situação que apresenta o fluxo transitório máximo e, conseqüentemente, a maior corrente de inrush é aquela em que o transformador é energizado no instante em que a tensão passa por zero e o fluxo magnético pelo seu valor máximo negativo, estando o transformador com um fluxo residual igual a $+\phi_{max}$. Nestas condições, o fluxo poderia atingir até três vezes o valor do fluxo nominal máximo. Este seria o limite teórico, uma vez que os valores usuais para o fluxo residual são normalmente inferiores a 1,0 pu, mesmo com a tendência atual dos fabricantes fornecerem transformadores que apresentam ciclo de histerese mais estreito, de forma a reduzir as perdas, e com início de saturação para valores mais elevados de fluxo, o que acarreta a ocorrência de fluxos residuais mais elevados quando do desligamento destes transformadores.

Propriedades não lineares dos componentes do circuito podem ser fonte de anormalidades. A corrente de inrush do transformador é um exemplo. Abaixo da excitação normal o transformador mostra uma corrente de magnetização entre 0,5 e 2% da corrente nominal. Devido aos efeitos da não linearidade do núcleo, a corrente de inrush não é senoidal. O nível de distorção depende da densidade do fluxo magnético para o qual o núcleo está dimensionado.

Foi feita uma simulação com um transformador de 15 MVA, tensão de alimentação de 34,5kV, considerando-se uma reatância de dispersão $X=7\%$ e uma resistência dos enrolamentos $R=0,4\%$. (Greenwood 1971)

2.2.2 Equação da Corrente de Excitação Transitória-Inrush

Para se estudar seu comportamento transitório, ou seja analisar a corrente de magnetização, o transformador foi modelado através de um circuito série RL, visto que a reatância de magnetização e a resistência de perdas no núcleo possuem valores muito maiores que o apresentado pela impedância dos enrolamentos, o que permite usar como parâmetros para o circuito somente a reatância de dispersão e a resistência dos enrolamentos.

$$I(t) = \frac{Vm}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} [\sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi)e^{-\alpha t}] \quad (2.1)$$

onde:

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (2.2)$$

θ = ângulo arbitrário de fase da tensão no instante em que ocorre a energização do transformador, e

$$\alpha = \frac{L}{R} \quad (2.3)$$

A expressão 2.1 mostra a corrente total $I(t)$, sendo que o primeiro termo desta expressão representa o valor final da corrente em estado permanente (I_p), e o segundo indica a corrente transitória (I_{tr}). Quando ocorre o fechamento da chave para a energização do transformador no instante em que $\theta = \varphi$, o termo transitório reduzirá a zero e a forma de onda da corrente será simétrica. Numa outra situação, se a chave fechar quando $\theta - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, o termo transitório adquire uma amplitude máxima e como conseqüência o primeiro pico da corrente total será aproximadamente duas vezes a corrente final em estado permanente.

A expressão 2.3 é definida como constante de tempo do circuito e faz parte da equação da corrente transitória, e neste caso sabe-se que é a componente que pode estabelecer a amortecimento desta corrente aumentando-se o valor de R. Isto define como prática, no meio industrial, alimentar transformadores com cargas puramente resistivas ligadas no lado secundário, isto no instante da sua energização.

Iremos realizar uma simulação considerando-se um transformador de 15 MVA, tensão de alimentação de 34,5kV, sendo uma reatância de dispersão $X=7\%$ e uma resistência dos enrolamentos $R=0,4\%$ (Greenwood 1971), quando serão observados o comportamento da corrente durante a energização deste transformador.

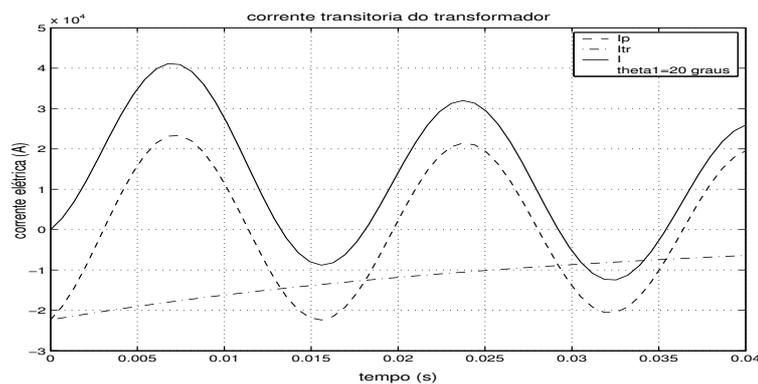


Figura 2.2: Curva de corrente do transformador para $\theta = 20^\circ$

Conforme pode ser identificado através da fig.2.2, a simulação foi realizada considerando o ângulo de fase da tensão $\theta = 20^\circ$ e durante um tempo de 40ms(ou seja \approx dois ciclos). Verifica-se que durante este período a corrente total \mathbf{I} do transformador é composta pela soma de duas expressões indicadas na equação 2.1 , sendo que o primeiro termo representa o valor final da corrente em estado permanente (I_p) e o segundo termo mostra o transitório da corrente (I_{tr}). Verifica-se que a amplitude máxima da corrente total ocorre em torno de 8ms e é aproximadamente 2 vezes a corrente nominal do transformador (Greenwood 1971).

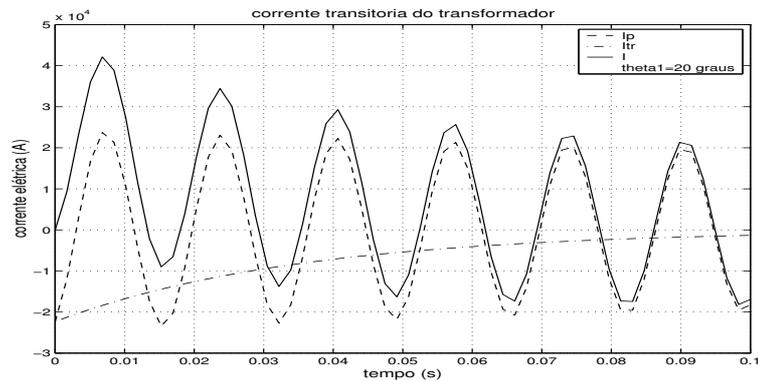


Figura 2.3: Curva de corrente do transformador para $\theta = 20^\circ$

O gráfico da figura 2.3 mostra a seqüência da fig.2.2, onde o fenômeno transitório permanece durante aproximadamente 100 ms (6 ciclos).

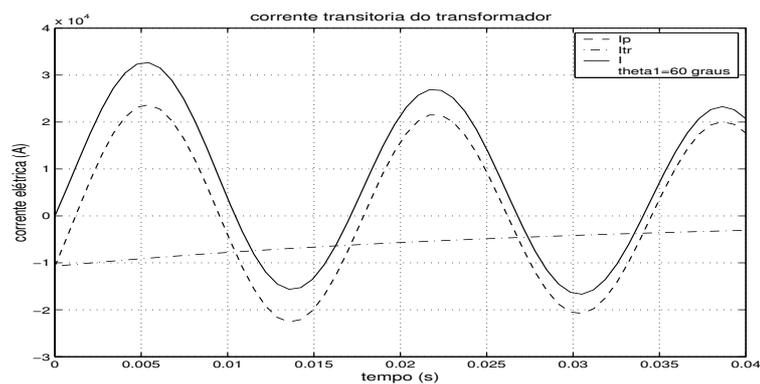


Figura 2.4: Curva de corrente de transformador para $\theta = 60^\circ$

Verifica-se através da fig.2.4 que no instante da energização do transformador, quando o ângulo de fase da tensão é igual a 60^0 , há uma diminuição da amplitude da corrente de magnetização em relação a situação anterior.

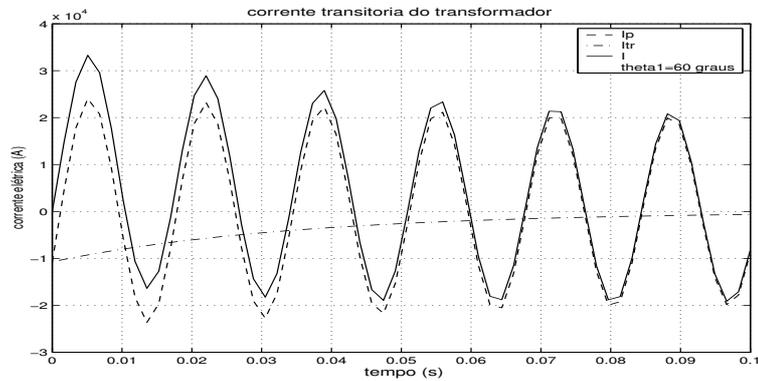


Figura 2.5: Curva de magnetização do transformador para $\theta = 60^0$

Este gráfico 2.5 representa a seqüência da figura 2.4, e mostra que o fenômeno transitório continua durante aproximadamente 100ms.

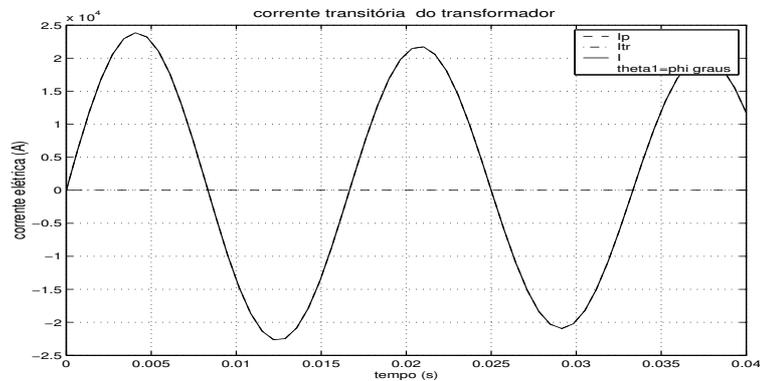


Figura 2.6: Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi$

No caso da figura 2.6 ocorre uma situação especial onde o fechamento da chave acontece no instante em que o ângulo da tensão (θ) é igual ao ângulo de defasagem entre tensão e corrente (φ), sendo que $\cos(\varphi)$ representa o fator de potência do circuito RL utilizado para modelar o transitório do transformador. Nesta situação o termo transitório é igual a zero,

portanto a forma de onda da corrente é simétrica.

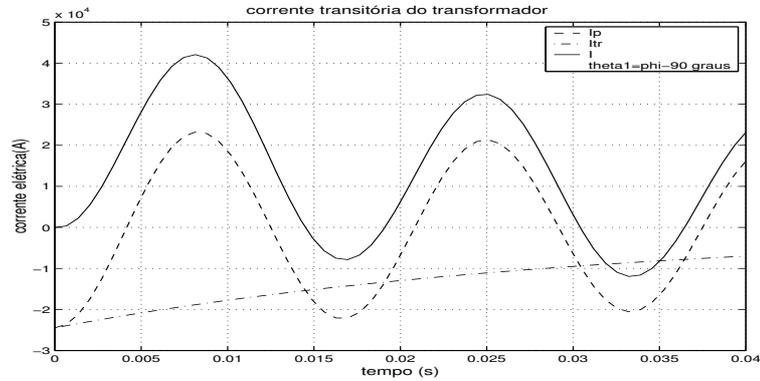


Figura 2.7: Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi - 90^\circ$

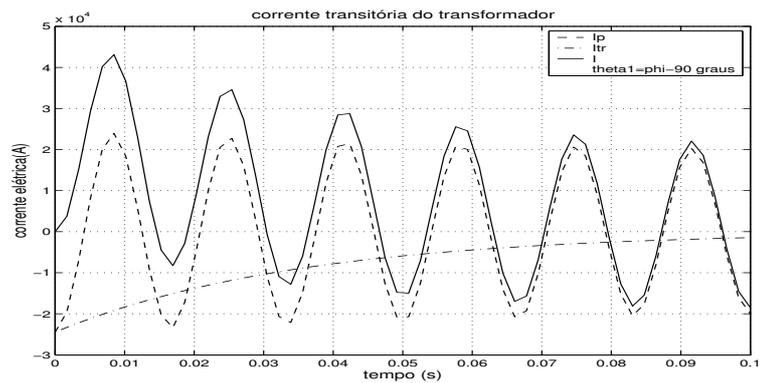


Figura 2.8: Curva de magnetização do transformador para $\theta = \varphi - 90^\circ$

Observa-se nestas figuras o fechamento da chave quando $\theta = \varphi - 90^\circ$. O termo transitório alcança uma amplitude máxima e o primeiro pico da corrente total (I) tem um valor aproximadamente duas vezes a corrente em estado permanente. Através destas simulações propostas conclui-se que se pode controlar as correntes de excitação do transformador (inrush) com utilização de dispositivos de controle eletrônicos.

Capítulo 3

Perfil dos Distúrbios

3.1 Introdução

Os distúrbios aos quais o sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequência envolvida (baixa, média, ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou da intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto). Para uma boa caracterização é necessário conhecer melhor as características de cada tipo de distúrbio conforme pode-se observar através da tabela 4.1(IEEE1159 1995).

Por outro lado, os níveis dos índices de desempenho quanto ao aspecto de conformidade das ondas da tensão e corrente também devem ser avaliados, sendo importante neste caso, a implantação de sistema de monitoramento. No entanto, apesar de se tentar atingir este objetivo, devido à presença de cargas produtoras de distorções nos sistemas de energia elétrica, torna-se impossível conseguí-lo. A constante tentativa de se conseguir este objetivo representa hoje uma das mais importantes prioridades do setor elétrico.

Atualmente, problemas envolvendo a qualidade de energia ocorrem com significativa frequência, em função da sensibilidade dos modernos equipamentos utilizados na automação industrial e necessidade permanente de otimização da produção. Desta forma, inúmeros são os relatos de casos que mostram falhas e operações inadequadas dos modernos acionamentos de máquinas dos mais variados processos industriais, decorrentes de variações na qualidade do fornecimento de energia elétrica, principalmente devido aos afundamentos de tensão.

Tabela 3.1: Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistema Elétrico

Categorias	Espectro	duração	Tensão
1.1 Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns pico	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s pico	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms pico	>1ms	
1.2 Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	<5 kHz	0,3-50 ms	0 - 4pu
1.2.2 Media Frequência	5-500 kHz	20 μ s	0 - 8pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5-5 MHz	5 μ s	0 - 4pu
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instântaneos			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos - 3s	<0,1pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30ciclos - 3s	0,1 - 0,9pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3s - 1min	<0,1pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s - 1min	0,1 - 0,9pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3s - 1min	1,1 - 1,2pu
3.0 Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		>1 min	0,0pu
3.2 Subtensão		>1min	0,8 - 0,9pu
3.3 Sobretensão		>1min	1,1 - 1,2pu
4.0 Desequilíbrio de Tensão		est. perman.	0,5 - 2%
5.0 Distorção da Forma de Onda			
5.1 Compensação CC(DC offset)		est. perman.	0 - 0,1%
5.2 Harmônicas	0-100thH	est. perman.	0 - 20%
5.3 Inter Harmônicas	0-6kHz	est. perman.	0 - 2%
5.4 Recortes de comutação(Notching)		est. perman.	
5.5 Ruído	banda larga	est. perman.	0 - 1%
6.0 Flutuação de Tensão	<25Hz	intermitente	0,1 - 7%
7.0 Variações de Frequência da Rede		<10s	

3.2 Detalhes dos Fenômenos

Aqui serão descritos com mais ênfase os fenômenos que estão relacionados na tabela 4.1, procurando assimilar os termos propostos de forma a utilizá-los nas análises de curvas obtidas durante as medições em ambiente industrial.

Uma das principais razões para o desenvolvimento de diferentes categorias dos fenômenos eletromagnéticos é o fato de que existem diferentes caminhos para resolver os problemas de qualidade de energia. Diferentes soluções disponíveis são discutidas em cada categoria. Existem também diferentes requisitos para poder caracterizar os fenômenos usando as medições.

Nos problemas de qualidade de energia, comumente enfrentados nas operações industriais, estão incluídos transitórios (impulsivos, oscilatórios), variações de curta duração (interrupção, afundamento/sag, elevação/swell), variações de longa duração (interrupção permanente, subtensão, sobretensão), desequilíbrio de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação, eventuais níveis cc), flutuação de tensão e variações de frequência da rede.

Uma das principais razões para o estabelecimento de diferentes categorias dos fenômenos eletromagnéticos se deve ao fato de que existem diferentes formas para resolver os problemas de qualidade de energia, que evidentemente depende da particular forma de ocorrência dos eventos na empresa. Existem também diferentes requisitos para caracterizar os fenômenos usando as medições.

3.3 Transitórios

O termo transitório tem sido usado para analisar variações no sistema de energia elétrica ao longo do tempo. Este nome imediatamente faz aparecer a idéia de um evento que pode ser indesejável mas que existe momentaneamente. A mais importante definição usa a expressão rápido e menciona as frequências até 3MHz quando define transitório dentro de um contexto de avaliação nos sistemas de cabos em subestações.

A idéia de um transitório de oscilação amortecida devido a uma rede RLC é também mencionado. Este é o tipo de fenômeno no qual a maioria dos engenheiros de potência pensam quando ouvem a expressão transitório. O tempo em que os sistemas passam nas condições transitórias é insignificante quando comparado com o tempo passado no regime permanente. Entretanto os períodos em que os sistemas passam em condições transitórias são extremamente importantes, pois é neste período que os componentes do sistema sofrem as maiores solicitações de corrente ou de tensão.

3.3.1 Transitório Impulsivo

Um transitório impulsivo é uma repentina mudança de frequência sem energia na condição de estado permanente da tensão, corrente, ou ambos, o qual é unidirecional na polaridade(basicamente positivo ou negativo).

Os transitórios impulsivos são normalmente caracterizados por suas várias elevações e quedas. Estes fenômenos podem também serem descritos pelo seu conteúdo espectral. A causa mais comum dos transitórios impulsivos são as descargas atmosféricas.

Em razão das altas frequências envolvidas, os transitórios impulsivos são amortecidos rapidamente pelos componentes resistivos do circuito e também não são conduzidos para longe da fonte que os produzem. Os transitórios impulsivos podem excitar uma ressonância nos circuitos do sistema de energia elétrica e produzir o tipo de distorção chamado transitório oscilatório.

3.3.2 Transitório Oscilatório

Um transitório oscilatório consiste numa tensão ou corrente cujo valor instantâneo modifica rapidamente a polaridade. Este fenômeno pode ser observado pelo conteúdo do espectro (com predominância da frequência), duração, e amplitude. Conforme se pode acompanhar na tabela 4.1, o conteúdo pode-se apresentar em três níveis, ou seja, em alta, média e baixa frequência. A frequência colocada para estas classificações são escolhidas para coincidir com os tipos comuns do fenômeno transitório oscilatório no sistema de energia elétrica.

Assim como os transitórios impulsivos, os transitórios oscilatórios podem ser medidos com ou sem a inclusão da componente fundamental. Quando se caracteriza o transitório, é importante indicar a amplitude considerando, ou não, a componente fundamental.

Transitórios oscilatórios com componente de frequência fundamental maior que 500kHz e uma duração medida em microsegundos são considerados transitórios oscilatórios de alta frequência. Estes transitórios são quase sempre provocados por algum tipo de chaveamento. Transitórios oscilatórios de alta frequência são frequentemente o resultado da resposta de um sistema local a um transitório impulsivo.

Equipamentos eletrônicos de potência produzem transitórios de tensão oscilatórios em consequência da comutação, e geralmente amortecidos pelos circuitos RLC. Os transitórios podem estar em uma faixa de alta frequência(kHz), ter uma duração de poucos ciclos de sua frequência fundamental, aparecer repetidas vezes por ciclo de 60Hz(dependendo do número de pulsos do equipamento) e com amplitudes de até 0,1pu.

O transitório com a componente de frequência fundamental entre 5 e 500kHz tendo uma duração de 20 microsegundos é considerado um transitório de média frequência.

A manobra de fechamento de um banco de capacitores com outros bancos em operação (energização back-to-back) geram correntes transitórias oscilatórias na faixa de 10kHz e cuja amplitude máxima poderá assumir valor de 1,05 a 1,5pu da tensão nominal do sistema. Verifica-se que estes valores poderão ser da mesma ordem de grandeza da corrente de curto-circuito em pontos próximos aos bancos (Ary D Ajuz 1987).

Esta categoria de fenômeno é frequentemente encontrada em sistemas de subtransmissão e de distribuição e é causado por muitos tipos de eventos, principalmente a energização de bancos de capacitores. A forma de onda da tensão resultante é muito familiar para os engenheiros de sistemas de energia elétrica e pode ser facilmente classificada utilizando os conceitos apresentados. A energização do banco de capacitores resulta tipicamente num transitório oscilatório de tensão com uma frequência fundamental entre 300 e 900kHz. O transitório tem um pico de amplitude que pode aproximar-se de 2,0pu, mas está tipicamente entre 1,3 e 1,5pu com duração de 0,5-3 ciclos, dependendo do amortecimento do sistema.

Transitórios oscilatórios com frequências fundamentais menores do que 300Hz podem ser também encontradas no sistema de distribuição. Estes são geralmente associados com a ferroressonância e energização de transformadores. Transitórios envolvendo capacitores em série poderiam também cair dentro desta categoria. Eles ocorrem quando a ressonância do sistema resulta em uma ampliação dos componentes de baixa frequência na corrente inrush do transformador(segunda, terceira harmônicas)ou quando condições raras resultam em um fenômeno de ferroressonância.

Condições de ressonância são estabelecidas quando um circuito contendo capacitâncias e indutâncias lineares é excitado por uma tensão a frequência próxima ou igual à sua frequência natural, enquanto que podem ser caracterizados por ferroressonância os efeitos peculiares introduzidos pela presença de saturação no circuito magnético da indutância. Como exemplo destas situações pode-se citar:

1. Ressonância que ocorre entre cabos de elevada capacitância e reatores limitadores de corrente.
2. Ressonância que ocorre entre a indutância linear e a capacitância de um sistema constituído por uma linha levemente carregada.
3. Ferro-ressonância entre a reatância de transformadores de potencial e a capacitância entre enrolamentos de um transformador de distribuição.
4. Ferro-ressonância em sistemas que contêm elementos saturáveis e filtros harmônicos

A fim de melhor caracterizar estas situações, seja considerado um circuito série RLC. O valor eficaz da corrente elétrica é dado por:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (3.1)$$

Para uma determinada frequência em que $X_L = X_C$ este circuito se torna ressonante sendo a corrente limitada apenas pela resistência. Como em geral o valor de R é baixo quando comparado com as reatâncias, essa corrente pode ser extremamente alta, causando o aparecimento de tensões elevadas através do reator e capacitor.

No caso de, ao invés de um valor constante X_L , haver um transformador com núcleo de ferro, o circuito passa a ser representado por uma reatância variável X_M devido à saturação, podem-se ter agora vários pontos de ressonância, ampliando assim a faixa de ocorrência do fenômeno. O aparecimento ou não da ferro-ressonância depende do valor da sobretensão (causada por algum distúrbio no sistema) e do valor do fluxo no instante de defeito, não ocorrendo necessariamente em todos os casos.

Em suma, a simulação dos elementos individuais de uma rede deve conseqüentemente corresponder à frequência do fenômeno transitório em particular. Isto pode ser melhor visto dividindo-se o espectro de frequência em 3 faixas: (Ary D Ajuz 1987)

- A - frequência 0Hz a 100Hz → mudanças de carga e fenômeno devido à saturação (baixa frequência)
- B - frequência 100Hz a 10kHz → transitórios devido a chaveamentos (média frequência)
- C - frequência 10kHz a 1MHz → transitórios devido às descargas atmosféricas (alta frequência)

3.4 Variações de Curta-Duração

As variações de curta duração da tensão são quase sempre causadas por condições de falta, de energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida ou a perda intermitente das conexões com o sistema elétrico. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar ou aumentos temporários da tensão, afundamentos de tensão, ou uma completa perda de tensão (interrupção).

A condição de falta pode estar perto ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto sobre a tensão durante a condição de falta efetiva é uma variação de curta duração. As mudanças na corrente que caem dentro das categorias de duração e amplitude também estão incluídas na variação de curta duração.

A situação mais crítica associada com as interrupções, afundamentos e elevações é a paralisação de equipamento. Em muitos ambientes industriais com um processo contínuo de

fabricação, como exemplo pode-se citar as fábricas de papel, ainda que ocorra uma duração instantânea dos fenômenos pode causar uma paralização dos equipamentos cujo religamento pode acontecer por um período de horas, devido a complexidade deste processo industrial. Portanto, desta forma pode-se considerar que o efeito provocado em determinados processos de fabricação é o mesmo, tanto para fenômenos de curta-duração como longa-duração.

3.4.1 Interrupção

Uma interrupção ocorre quando a alimentação da tensão ou a corrente de carga decresce para menos que 0,1pu em um período não superior a um minuto.

Interrupções podem ser o resultado de faltas no sistema de energia elétrica, falhas em equipamentos e controle com funcionamento defeituoso. As interrupções podem ser medidas através de sua duração desde que a amplitude da tensão seja sempre menor que 10% da nominal. A duração de uma interrupção devido a uma falta no sistema utilitário é determinada pelo instrumento de proteção e pelo evento particular que está causando a falta. A duração de uma interrupção devido ao funcionamento defeituoso do equipamento ou perda da conexão pode ser irregular.

Algumas interrupções podem ser precedidas de um afundamento de tensão quando são ocasionadas por faltas no sistema de alimentação. O afundamento de tensão ocorre entre o tempo em que se inicia a falta e a operação do dispositivo de proteção. Com uma falha no alimentador, as cargas experimentarão um afundamento de tensão e logo após uma interrupção. A duração de uma interrupção dependerá da capacidade do instrumento de proteção refazer o fechamento. Refazer o fechamento instantâneo geralmente limitará a interrupção causada por uma falta não permanente por menos de 30 ciclos.

3.4.2 Afundamentos de tensão(Sags)

Os afundamentos de tensão são usualmente associados com faltas no sistema mas também podem ser causados pelo chaveamento de cargas pesadas ou partida de grandes motores. O afundamento de tensão pode ser associado com uma falha monofásica da linha para terra (SLG-single line-to-ground). Da mesma forma, uma falta em um circuito alimentador paralelo resultará em uma queda de tensão no barramento da subestação que afetará todos os outros alimentadores até que a falta seja eliminada. Uma falta típica, será eliminada em um tempo que varia de 3 a 30 ciclos, dependendo da amplitude da corrente de falta, da operação da proteção de sobrecorrente e das conseqüências da interrupção.

Afundamentos de tensão podem também ser causados pela entrada de uma carga, de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local ou a partida de motor. Um motor de

indução provocará uma corrente de 6 a 10 vezes a corrente de plena carga durante a partida. Durante este período a corrente ocasiona uma queda da tensão através da impedância do sistema. Se a amplitude da corrente for alta em relação à corrente de falta admissível pelo sistema, o afundamento de tensão resultante pode ser significativo.

Anteriormente, a duração dos eventos de afundamento não foram claramente definidos. A duração de afundamento típico definida em algumas publicações variam de 2ms (1/8 do ciclo) para um par de minutos. Subtensões que duram menos que 1/2 ciclo não podem ser caracterizadas efetivamente como uma mudança no valor eficaz na frequência fundamental, contudo, estes eventos são considerados transitórios. Subtensões que duram mais que 1 minuto podem tipicamente ser controladas por um regulador de tensão e podem ser associados a uma imensa variedade de outras tantas causas de falhas no sistema.

As durações dos afundamentos foram subdivididos em 3 categorias: instantâneos, momentâneos e temporários, as quais coincidem com as três categorias das interrupções e elevações. Estas durações foram definidas para estabelecer relações com os tempos de operação dos instrumentos de proteção.

3.4.3 Elevações de tensão(Swells)

A elevação é definida como um acréscimo no valor eficaz da tensão ou corrente com duração de 0,5 ciclo até 1 minuto. Caracteristicamente suas amplitudes estão entre 1,1 e 1,8 pu.

Do mesmo modo que os afundamentos, as elevações são usualmente associadas com as condições de faltas do sistema, mas elas são muito menos comuns que os afundamentos de tensão. A elevação pode ocorrer em razão de uma falta monofásica entre linha e terra(fase), resultando em um aumento temporário da tensão nas fases sem defeito. Elevações podem também ser causadas pelo desligamento de uma grande carga ou a conexão de um grande banco de capacitor.

As elevações são caracterizadas pela sua amplitude e duração. A severidade da elevação de tensão durante uma condição de falta depende da localização da falta, impedância do sistema e do aterramento (IEEE1159 1995).

O tipo de falta mais comum que aparece em um sistema é o curto-circuito monofásico, sendo que o bifásico e o trifásico, envolvendo ou não a presença da terra, muito menos freqüentes. A ocorrência da falta fase-terra em um determinado ponto acarreta uma elevação da tensão nas outras duas fases, cujo o valor depende principalmente do grau de aterramento do sistema no ponto em questão. Esta condição de aterramento é expressa através do fator de falta para terra. Seu valor é independente do valor real da tensão de operação no local considerado, sendo calculado a partir das impedâncias de seqüência de fase. Ele traduz a relação entre o valor máximo eficaz de tensão fase-terra à frequência industrial de uma fase não afetada

durante a falta e o valor da tensão fase-terra à frequência industrial no mesmo ponto, com a falta removida (Ary D Ajuz 1987).

Para sistemas de neutro isolado, como por exemplo uma carga não aterrada suprida pelo delta de um transformador, as sobretensões nas fases sãs podem exceder a tensão fase-fase, ou seja, alcançar valores superiores a 1,73 pu. Isto se deve ao fato de que na realidade este tipo de sistema é acoplado à terra através de suas capacitâncias distribuídas.

No caso de um sistema eficazmente aterrado, onde a relação entre a reatância de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 3 ($X_0/X_1 \leq 3$) e a relação entre a resistência de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 1 ($R_0/X_1 \leq 1$), as sobretensões nas fases sãs não alcançam 1,4 pu, o que significa que podem atingir no máximo 80% da tensão fase-fase.

3.5 Variações de Longa Duração

As variações de longa duração abrangem desvios dos valores eficazes em tempos maiores do que 1 minuto. Consultando a tabela 4.1 pode-se verificar as amplitudes para cada caso (interrupção permanente, subtensão, sobretensão). As variações de longa duração são consideradas existentes quando os limites são excedidos por mais que 1 minuto (ANSIC84.1 1989). Variações de longa duração podem ser sobretensões ou subtensões, dependendo da causa da variação. Sobretensões e subtensões, geralmente não são resultado de faltas no sistema. Elas são causadas por variações de carga e operações de chaveamentos no sistema.

3.5.1 Sobretensão

Sobretensões podem ser o resultado do chaveamento de carga como o desligamento de uma grande carga, ou variações na compensação de reativos no sistema como o chaveamento de um banco de capacitores. As operações de regulação da tensão ou os controles em um sistema fraco resultam em sobretensões. A fixação incorreta dos taps dos transformadores pode resultar também em sobretensões no sistema.

3.5.2 Subtensão

As subtensões são o resultado dos eventos que são opostos aos que causam as sobretensões. O fechamento de carga ou desligamento de um banco de capacitores pode causar uma subtensão até que o equipamento regulador de tensão no sistema possa trazer de volta a tensão dentro das tolerâncias desejáveis. Circuitos sobrecarregados podem também resultar em subtensões.

3.5.3 Interrupções Sustentadas

O decréscimo para zero da tensão de alimentação por um período de tempo superior a 1 minuto é considerado uma interrupção sustentada. As interrupções de tensão maiores do que 1 minuto são frequentemente permanentes na natureza do sistema e requerem intervenção manual para a sua restauração. As interrupções sustentadas são fenômenos específicos do sistema de potência e não tem relação com o uso do termo corte de energia (outage). O corte de energia (outage) conforme definido na recomendação (IEEE1100 1992), não se refere a um fenômeno específico, mas ao estado de um componente num sistema que não funcionou como o esperado. Convém esclarecer que o uso do termo interrupção no contexto de monitoramento da qualidade de energia não tem relação com a confiabilidade ou outros levantamentos estatísticos.

3.6 Desequilíbrio de Tensão

Desequilíbrio são variações desiguais em amplitudes e fases das tensões trifásicas, são causadas pela conexão desigual de cargas mono ou bifásicas em sistemas trifásicos, por cargas trifásicas não lineares importantes que podem produzir desequilíbrio como os fornos de arco elétrico.

O grau de desequilíbrio de tensão é definido como a razão da componente de seqüência negativa ou seqüência zero em relação a componente de seqüência positiva. As tensões de seqüência negativa ou zero em um sistema de energia elétrica geralmente são consequência de um desequilíbrio de cargas que causam um fluxo de correntes de seqüência negativa ou zero.

O desequilíbrio pode ser estimado como o desvio máximo da média das tensões ou correntes nas três fases, dividido pela média das tensões ou correntes nas três fases, expresso em porcentagem, onde:

td =tensão de desequilíbrio (IEEE141 1993)

mdt =máximo desvio de tensão média

tm =tensão média

$$td = \frac{100 \times mdt}{tm} \% \quad (3.2)$$

Por exemplo, tendo-se leituras das tensões entre fases com valores 230V, 232V e 225V, a média é igual a 229V. O máximo desvio da média entre as três leituras é 4. Assim,

$$td = \frac{100 \times 4}{229} = 1,7\% \quad (3.3)$$

Um desequilíbrio de tensão na alimentação primária menor que 2% é um desequilíbrio de cargas monofásicas no circuito trifásico. Desequilíbrio de tensão pode ser também o resultado

de anormalidades no banco de capacitor, tal como a queima de um fusível em uma das fases do banco trifásico. Um desequilíbrio severo de tensão, ou seja maior que 5%, pode ser resultado de uma presença marcante da componente de seqüência negativa provocando uma assimetria das tensões (Ernesto João Robba 1996).

3.7 Distorção da Forma de Onda

A distorção da forma de onda é um desvio no estado permanente de uma onda senoidal ideal na freqüência da rede caracterizada principalmente pelo conteúdo espectral do desvio.

Há cinco tipos principais de distorção da forma de onda:

- a) Nível Contínuo(DC Offset)
- b) Harmônicas
- c) Interharmônicas
- d) Recortes(notching)
- e) Ruído(Noise)

3.7.1 Nível Contínuo(DC Offset)

A presença de uma tensão ou corrente *contínua* em um sistema de energia elétrica na freqüência industrial é chamado nível contínuo(DC Offset). Este fenômeno pode ocorrer como resultado de um distúrbio geomagnético ou devido ao efeito da retificação da corrente alternada.

As variações do campo magnético terrestre são conhecidas como distúrbios ou tempestades geomagnéticas e estão ligadas às atividades solares. Estas variações produzem na superfície da terra gradientes de potenciais induzidos da ordem de 3 à 6 volts/km. A diferença de potencial resultante entre os pontos aterrados dos sistemas elétricos de potência, faz com que correntes de baixa freqüência circulem pelos seus condutores. Estas correntes, também conhecidas como SIC (solar induced current) ou ainda GIC (geomagnetic induced current), em geral, possuem amplitudes entre 5A a 100A e tem um período da ordem de minutos (0,001 Hz à 0,100 Hz), razão pela qual são consideradas como contínuas quando comparadas com as freqüências de transmissão em 60Hz. Como o GIC flui pelo lado da estrela aterrada do transformador, pode saturar magnéticamente o núcleo. Neste caso, as correntes de excitação ficam totalmente distorcidas, apresentando altos valores de pico. As publicações que tratam

deste assunto relatam que as ocorrências de tempestades geomagnéticas são freqüentes apenas no hemisfério norte, sendo praticamente impossíveis em território brasileiro.

As instalações de conversores e compensadores que utilizam dispositivos a estado sólido em suas configurações podem, trabalhando em condições não idealizadas e desbalanceadas, serem passíveis de se constituírem em fontes de correntes contínuas nos sistemas de corrente alternada.

Da teoria clássica, sabe-se que, um transformador sem carga, quando excitado por uma fonte de tensão senoidal, absorve do sistema alimentador um corrente elétrica não senoidal e simétrica, que possui apenas ordens harmônicas ímpares. Esta característica se deve fundamentalmente à não linearidade entre o fluxo magnético, que se estabelece no núcleo do transformador, e a corrente de excitação necessária para produzi-lo. Quando ocorre um desbalanceamento magnético motivado pela existência de um nível médio de fluxo superposto ao fluxo c.a no núcleo, a característica de magnetização passa a ser tratada de forma assimétrica e a corrente apresenta-se sensivelmente alterada. A citada assimetria magnética ocorre, por exemplo, quando os transformadores alimentam cargas cujas correntes de alimentação possuem níveis médios diferentes de zero. Nestas condições operativas destaca-se que, devido a impossibilidade física de se transferir sinais contínuos de corrente do secundário para o primário, acontecem saturações assimétricas, resultantes da composição do fluxo convencional c.a com o fluxo residual c.c (Rossi 1996).

3.7.2 Harmônicas

Os harmônicos são tensões ou correntes senoidais com freqüências que são múltiplos inteiros da freqüência na qual o sistema de alimentação está projetado para operar (chamada de freqüência fundamental; geralmente 50Hz ou 60Hz). Os harmônicos combinam-se com a tensão ou corrente fundamental, e produzem distorção na forma de onda (IEEE1159 1995). A distorção harmônica existe devido às características não lineares dos dispositivos e cargas no sistema de energia elétrica.

Estes dispositivos podem ser modelados como fontes de corrente que injetam correntes harmônicas no sistema de energia elétrica. A distorção da tensão ocorre quando estas correntes causam quedas não lineares nas impedâncias do circuito. A distorção harmônica é uma preocupação crescente para muitos consumidores e para todo o sistema de energia elétrica devido ao aumento da aplicação de equipamentos eletrônicos de potência.

Um problema de grande destaque é o da ampliação das ondas distorcidas devido ao fenômeno da ressonância. De fato, existem duas formas de ressonância e ambas devem ser consideradas: a ressonância série e a ressonância paralela.

Para o circuito série (RLC) a impedância total na freqüência de ressonância se reduz somente

à componente resistiva. No caso desta componente ser pequena, altas correntes podem fluir pelo circuito nesta frequência.

A ressonância paralela(L em paralelo com C) é similar à ressonância série no aspecto que a reatância indutiva se iguala à reatância capacitiva; entretanto, a impedância paralela é significativamente diferente. Na frequência de ressonância a impedância é muito alta, e se uma fonte desta frequência estiver conectada ao circuito, uma alta corrente de circulação passará a existir entre o capacitor e o indutor apesar da corrente na fonte ser bem pequena.

Nos sistemas de energia elétrica, a utilização de capacitores para correção do fator de potência pode apresentar a ocorrência dos dois tipos de ressonância ou uma combinação de ambos, se o(s) ponto(s) de ressonância for(em) muito próximo(s) das frequências geradas pelas fontes harmônicas. As possíveis consequências, em tais casos, podem ser excessiva operação da proteção dos bancos de capacitores, ou, em muitos casos, a falha dos capacitores por curto-circuito (Pires 1996).

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo com amplitudes e ângulo de fase de cada componente harmônico individual. É também comum usar um único valor, a *distorção harmônica total* (THD), como uma medida da amplitude da distorção harmônica (IEEE519 1996).

Tabela 3.2: Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão	Distorção Harmônica Total de tensão DHT(%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.4)$$

onde:

DHT = Distorção Harmônica Total

V_h =amplitude dos componentes harmônicos individuais(valores eficazes)[V]

h= ordem da harmônica

V_1 =Valor eficaz da tensão fundamental[V]

As correntes harmônicas resultam da operação normal de dispositivos não lineares no sistema de energia elétrica. Os níveis de distorção da corrente podem ser caracterizados por uma distorção harmônica total, conforme descrito anteriormente, mas isto frequentemente pode levar a erros. Por exemplo, muitos controles ajustáveis de velocidade mostrarão valores altos de distorção harmônica total para uma corrente de alimentação quando eles estão operando em cargas muito baixas. Isto não é uma preocupação importante porque a amplitude da corrente harmônica é baixa, mesmo assim sua distorção relativa é alta.

Para tratar esta preocupação para caracterização das correntes harmônicas em uma forma consistente, a recomendação (IEEE519 1996) define outro termo, a *distorção de demanda total* - DDT (total demand distortion - TDD).

Tabela 3.3: Limites das distorções harmônicas de corrente (I_h) em % de I_L

$V_n \leq 69kV$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DDT
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

$69kV < V_n \leq 161kV$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DDT
< 20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

$V_n > 161kV$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DDT
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (3.5)$$

onde:

I_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais (valores eficazes)

h = ordem da harmônica

I_L =Valor eficaz da corrente de carga na demanda máxima

I_{sc} =Corrente de curto-circuito no ponto comum de acoplamento(PCC)

PCC=Ponto comum de acoplamento, é o ponto de ligação localizado entre a concessionária do sistema elétrico e os vários consumidores.

3.7.3 Interharmônicas

É a combinação da tensão (ou corrente) fundamental com componentes não múltiplas inteiras. São produzidas em geral por cargas não lineares com espectro contínuo. Fornos a arco são os exemplos típicos.

As interharmônicas podem ser encontradas em redes de todas as classes de tensões. Elas podem aparecer como frequências discretas ou como um espectro de banda larga. As principais fontes de distorções interharmônicas na forma de onda são os conversores estáticos de frequência (static frequency), cicloconversores, motores de indução, e dispositivos a arco. Elas também ocorrem em redes elétricas de laminadores quando a corrente de carga cresce e decresce rapidamente e se os transformadores operam em um ponto de saturação alto, estando em série ou paralelo com um compensador de potência reativa (Igor Zhezhelenko 2000).

Certos tipos de cargas mecânicas tais como compressores, aparelhos de ar condicionado e bombas(por exemplo bombas hidráulicas de pistão)também produzem efeitos na forma de onda da tensão de baixa frequência(0,5-35kHz) (A.M. Sharaf 2000).

As interharmônicas são consideradas mais prejudiciais do que as componentes harmônicas, porque elas são variáveis e muito longas. Portanto é muito importante desenvolver melhores ferramentas para estimar as interharmônicas com o objetivo de escapar das suas influências danosas (T. Lobos 2000).

3.7.4 Recortes de comutações (Notching)

“Notching” é um distúrbio periódico de tensão causado pela operação normal dos dispositivos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

O recorte (notching) de tensão representa um caso especial em que as falhas ocorrem entre os transitórios e a distorção harmônica. Desde que o recorte (Notching) ocorre continuamente (estado permanente), ele pode ser caracterizado através do espectro harmônico da tensão afetada. Entretanto, os componentes de frequência associados com o recorte podem ser bem elevados e podem não ser facilmente caracterizados com o equipamento de medição normalmente usado para análise harmônica.

Os conversores trifásicos são os causadores mais importante do recorte (notching) de tensão.

Os recortes ocorrem quando a corrente comuta de uma fase para outra. Em cada comutação há um momentâneo curto circuito entre duas fases. A gravidade do recorte em qualquer ponto do sistema é determinada pela indutância da fonte e indutância de alisamento entre o conversor e o ponto que está sendo alimentado por corrente contínua.

3.7.5 Ruído (Noise)

São componentes espectrais de larga faixa de frequência observados na tensão ou corrente fundamentais. Do ponto de vista do sistema de 60Hz onde a faixa de avaliação vai até a 50a. harmônica (3kHz), tudo que estiver acima disso é considerado ruído.

O ruído nos sistemas de energia elétrica pode ser causado pelos dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamento a arco, cargas com retificadores de estado sólido e alimentadores de potência com chaveamentos. Os problemas de ruído são frequentemente agravados pelo aterramento inadequado. Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejável do sinal de potência que não pode ser classificado como distorção harmônica nem como transitórios.

A faixa de frequência e o nível de amplitude do ruído dependem da fonte que produz o ruído e das características do sistema. Uma amplitude típica de ruído é menor que 1% da amplitude da tensão. O ruído perturba os dispositivos eletrônicos tais como microcomputadores e controladores programáveis. O problema pode ser atenuado usando filtros, transformadores de isolamento, e por algumas características da linha.

3.8 Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão são variações sistemáticas na curva da tensão ou uma série de mudanças aleatórias de tensão, cuja amplitude normalmente não excede os limites de tensão especificados de 0,95-1,05 pu (ANSIC84.1 1989).

Qualquer carga que tenha variações significativas de corrente, especialmente no componente reativo, pode causar flutuações de tensão. Cargas que exibem variações contínuas e rápidas na amplitude da corrente de carga podem causar variações erradamente denominadas como flicker. O termo flicker é derivado do impacto da flutuação de tensão na intensidade da iluminação. A flutuação de tensão é a resposta do sistema de energia elétrica à variação de carga e o flicker da luz é a resposta do sistema de iluminação como observado pelo olho humano. O sistema de energia elétrica, o sistema de iluminação e a resposta humana são todas variáveis. Mesmo assim há uma distinção clara entre estes termos causa-e-efeito eles são frequentemente confundidos ao ponto do termo flicker de tensão ser usado em alguns documentos.

Os fornos a arco são os causadores mais comuns das flutuações de tensão no sistema de transmissão e de distribuição. As flutuações de tensão são definidas pelo seu valor eficaz expresso como uma porcentagem da fundamental. O flicker de iluminação é medido com relação a sensibilidade do olho humano.

As flutuações de tensão geralmente aparecem como uma modulação da frequência fundamental (igual a modulação da amplitude de um sinal de rádio). Por isso, é mais fácil definir uma amplitude para a flutuação de tensão como valor eficaz do sinal de modulação. Isto pode ser obtido demodulando a forma de onda para remover a frequência fundamental e depois medir a amplitude dos componentes de modulação. Tipicamente, as amplitudes menores que 0,5% pode resultar em flicker de luz perceptível se as frequências estão nos limites de 6-8Hz.

3.9 Variações de frequência da rede

A frequência do sistema de energia elétrica é diretamente relacionada à velocidade de rotação dos geradores do sistema. Em todo o instante, a frequência depende do balanço entre a carga e a capacidade de geração disponível. Quando muda esse balanço dinâmico ocorrem pequenas modificações na frequência. A dimensão da mudança da frequência e sua duração depende das características da carga e da resposta do sistema de geração às mudanças de carga.

As variações de frequência fora dos limites aceitáveis pela operação normal em estado permanente de um sistema de energia elétrica são normalmente causados por falhas em todo o sistema de transmissão de energia elétrica, como um grande bloco de carga sendo desconectado, ou uma grande fonte de geração saindo da rede.

As variações de frequência que afetam a operação de maquinário rotativo, ou processos cujos os tempos dependem da frequência da rede (relógios), são raras nos modernos sistemas de potência interligados. As consequências das variações de frequência são mais prováveis de ocorrer quando um equipamento alimentado por um gerador isolado do sistema em operação. Em tais casos, a resposta do regulador devido as mudanças bruscas de carga pode não ser adequada para regular dentro de uma banda estreita requerida pelo equipamento sensível à uma variação de frequência.

Capítulo 4

Estudo de Caso em Qualidade de Energia Elétrica

4.1 Introdução

Nesta análise de caso, procurou-se traçar um perfil dos comportamentos das diversas cargas, conhecer a natureza de cada máquina que integra o sistema elétrico e em seguida fazer uma observação a partir da rede de alta tensão. Neste sentido, buscou-se implementar no trabalho a visão de que as de distorções podem ter origem dentro da fonte de alimentação (concessionária) ou nos equipamentos da indústria em questão, podendo também haver a interação entre ambos.

Procurou-se atender as recomendações das técnicas de medição e, através dos dados monitorados pelo instrumento BMI modelo 7100 (BMI 1993), buscou-se interpretá-los com base na recomendação (IEEE1159 1995). Entretanto o maior desafio enfrentado nesta pesquisa foi buscar as causas das distorções de forma a atenuar os seus efeitos.

4.2 Instrumentos de Medição

Basicamente os instrumentos de medição utilizados para o monitoramento das instalações industriais foram:

4.2.1 BMI Power Evaluation Software

Especificações:

Fabricante: BMI Basic Measuring Instruments

Modelo:7100

Tensão: 0-600V

Corrente:0-3000A(depõe da ponta de prova de corrente que é usada)

Este equipamento tem, através de software dedicado, possibilidade de avaliar a Qualidade de Energia(Power Quality) dependendo da escolha do que se quer avaliar, assim ele pode ser ativado com Waveshape Disturbances (usado para detectar mudanças no padrão das formas de ondas), Impulse Disturbances (usado para captar impulsos entre 5KHz e 1MHz), RMS Disturbances (usado para detectar alterações do valor eficaz), Snapshots Waveform (usado para avaliar conteúdo harmônico) ou Demand Report (relatório de demanda). (BMI 1993)

Precisão:

Tensão rms:

$\pm 1.0\%$ da leitura

$\pm 0.5\%$ do fundo de escala

Corrente rms:

$\pm 1.0\%$ da leitura

$\pm 1.0\%$ do fundo de escala

4.2.2 Multiteste ET-2001

Especificações:

Fab:Minipa

Corrente(CA/CC): $200\mu A - 20A$

Tensão(CA/CC): $1000V_{cc}/750V_{ca}$

Resistência: $20M\Omega - 200\Omega$

4.2.3 Nanovip

Especificações:

Fab:Elcontrol

Tensão superior: $750V_{ac}$ (20Hz- 600Hz)

Corrente:200A

Potência:7W-150kW

Medidas:Tensão, Corrente, Fator de Potência, Potência Ativa, Potência Reativa, Potência Aparente e Freqüência.

4.3 Sistema de distribuição de energia elétrica da fábrica

O monitoramento simultâneo das formas de onda de tensão e corrente é necessário para que se possa caracterizar a qualidade de energia elétrica, de acordo com as tabelas 3.2 e 3.3. Em alguns casos, o objetivo do monitoramento é diagnosticar as incompatibilidades entre a fonte (concessionária) e a carga (indústria). Em outros, pode-se avaliar o comportamento do sistema elétrico, em particular a localização das distorções, para que se possa aperfeiçoar as técnicas de modelagem ou desenvolvimento de uma linha básica no tratamento das estratégias de qualidade de energia. Ou ainda em outros casos, o monitoramento pode ser usado para prever futuros comportamentos de um equipamento industrial.

O trabalho mais importante a ser desenvolvido em um projeto de monitoramento consiste em definir claramente os objetivos. Com as experiências obtidas pelo trabalho de campo, pode-se definir pontos estratégicos na condução de um projeto de monitoramento de qualidade de energia em um sistema industrial, tais como:

- Escolha do instrumento de medição com todos seus acessórios, verificando-se previamente os níveis de tensão e corrente em que serão realizadas as medições;
- Estabelecer um método para coletar os dados de acordo com os limites definidos para tensão e corrente;
- Definir técnicas de análise estatística das amostras, bem como técnicas de decomposição de sinais;
- Dispor de todas as informações possíveis sobre equipamentos constituintes do sistema elétrico monitorado.

A figura 4.1 mostra o diagrama unifilar da instalação industrial na qual foram realizadas diversas medições, visando avaliar a qualidade de energia elétrica.

Neste diagrama verifica-se que a potência aparente total instalada dos transformadores corresponde à 2225kVA, sendo que a tensão do alimentador primário da concessionária é igual à 11900V e a tensão no secundário de 4 transformadores é igual à 220/127V e somente de 1 transformador é igual à 380/220V. Todos os transformadores apresentam ligação delta/estrela com neutro acessível. As medições foram realizadas nas principais cargas, nos barramentos do lado secundário dos transformadores e na cabine de medição(11900V).

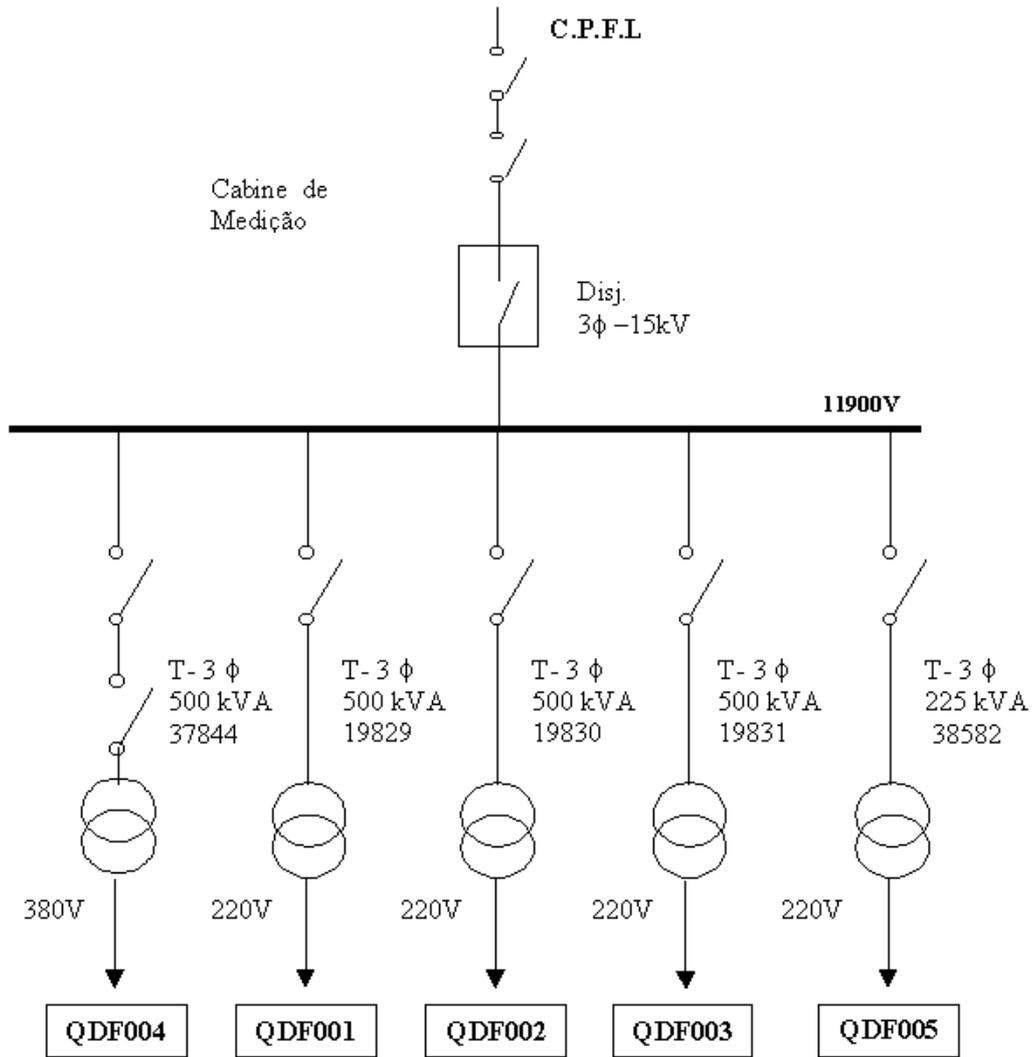


Figura 4.1: Diagrama Unifilar da Fábrica

Em seguida estão relacionadas as especificações dos principais equipamentos instalados no sistema de distribuição de energia da indústria, de acordo com o que foi apresentado no diagrama unifilar. As principais cargas em cada barramento de distribuição também são relacionadas.

4.3.1 Cabine de Medição

Disjuntor Principal

Fabricante:Sace

Tipo:C-15C LA

Tensão Nominal:15kV

Corrente Nominal:600A

Frequência:50/60Hz

Extinção de Arco:Óleo

Nesta cabine está instalada todo o sistema de medição da concessionária, e o dispositivo de proteção(sobrecorrente) da indústria.

4.3.2 Quadro de Distribuição de Força QDF001

Especificações dos Equipamentos

Transformador Trifásico

Localização:P-19831

Série:9111050

Tipo de ligação:delta-estrela com neutro disponível

Potência:500kVA

Tensão primária:11900V

Tensão secundária:220-127V

Frequência:60Hz

Ano de Fabricação:1991

Impedância:4.05 %

Fabricante:Dedini

Disjuntor Geral (DJ3A)

Corrente:1600A

Tensão:220V

Capacidade de Interrupção:440V-50kA

Fabricante: Beghin

Cargas principais:

Este quadro de distribuição é responsável por alimentar máquinas de solda a arco elétrico (cerca de 450kVA no total), em operação não simultânea, compressor(150cv), prensas 200T(motor principal 30cv), Recravador Comas(potência do motor principal igual à 35kW).

4.3.3 Quadro de Distribuição de Força QDF002

Especificações dos Equipamentos

Transformador Trifásico

Localização: P-19830

Série: 311335

Tipo de ligação: delta-estrela com neutro disponível

Potência: 500kVA

Tensão primária: 11900V

Tensão secundária: 220-127V

Frequência: 60Hz

Ano de Fabricação: 1978

Impedância: 3,67 %

Fabricante: Tusa

Disjuntor Geral (DJ2A)

Corrente: 1600A

Tensão: 220V

Capacidade de Interrupção: 440V-50kA

Fabricante: Beghin

Cargas principais:

Este quadro de distribuição alimenta máquinas de solda a arco elétrico(cerca 400kVA no total), operação não simultânea, agrafadeira (potência do motor principal 30kW), abadeira(potência do motor principal 20cv), curvadora de tubos(potência total 30kW).

4.3.4 Quadro de Distribuição de Força QDF003

Especificações dos Equipamentos

Transformador Trifásico
Localização:P-19829
Série:304440
Tipo de ligação:delta-estrela com neutro disponível
Potência:500kVA
Tensão primária:11900V
Tensão secundária:220-127V
Frequência:60Hz
Ano de Fabricação:1974
Impedância:3,5 %
Fabricante:Tusa

Disjuntor Geral (DJ1A)
Corrente:1600A
Tensão:220V
Capacidade de Interrupção:440V-50kA
Fabricante:Beghin

Cargas principais:
Através deste quadro de distribuição são alimentadas diversas máquinas de solda a arco elétrico(cerca de 450kVA no total), em operação não simultânea , compressores(motores de 40cv), ponteadeiras(200kVA), prensas 200T (motor principal 20cv).

4.3.5 Quadro de Distribuição de Força QDF004

Especificações dos Equipamentos

Transformador Trifásico
Localização:P-37844
Série:8910681
Tipo de ligação:delta-estrela com neutro disponível
Potência:500KVA
Tensão primária:11900V
Tensão secundária:380-220V

Frequência:60Hz
Impedância:4,29 %
Fabricante:Dedini

Disjuntor Geral (DJ4A)
Corrente:1600A
Tensão:220V
Capacidade de Interrupção:440V-50kA
Fabricante:Beghin

Cargas principais:
Através deste quadro de distribuição são alimentadas cargas como curvadeiras de tubos(30cv), sistema desengraxante (100kW), prensas(30cv).

4.3.6 Quadro de Distribuição de Força QDF005/Escritório-Restaurante

Especificações dos Equipamentos

Transformador Trifásico
Localização:P-38582
Tipo de ligação:delta-estrela com neutro disponível
Potência:225kVA
Tensão primária:11900V
Tensão secundária:220-127V
Frequência:60Hz

Disjuntor Geral (DJ5A)
Corrente:1600A
Tensão:220V
Capacidade de Interrupção:440V-50kA
Fabricante:Beghin

Cargas principais:
Dentre as cargas alimentadas pelos quadros de distribuição as mais preocupantes são as máquinas de solda, uma vez que elas são alimentadas através de equipamentos retificadores. Alguns destes equipamentos retificadores são pontes trifásicas totalmente controladas e, portanto, sob condições ideais deveriam apresentar harmônicas nas ordens ($6k \pm 1$). No en-

tanto, como estes conversores não operam sob condições ideais (existem desequilíbrios na alimentação) e como também o seu comportamento está distante do modelo ideal (a reatância de alisamento está com valor muito baixo e a carga alimentada do lado contínuo não é linear, pois é um arco), a presença de harmônicas não-características pode ser plenamente justificada.

4.4 Monitoramento das Formas de Onda - Cabine de Medição

Os problemas de qualidade de energia estão na maioria dos casos associados à sensibilidade de equipamentos e de processos a distúrbios originários do sistema elétrico. Perturbações que no passado não eram percebidas têm hoje provocado elevados prejuízos no meio industrial. Aqui se inicia as observações em relação às formas de onda registradas no barramento primário dos transformadores. As tensões monitoradas podem ser apresentadas, a seguir, como V_a , V_b ou V_c , simplesmente para se distinguir as três diferentes tensões de linha. Nos casos em que as tensões monitoradas forem as de fase-neutro, tal situação será destacada no texto. Em todos os casos monitorados as correntes (I_a , I_b , I_c) correspondem às correntes de linha. O monitoramento ideal seria realizado em vários pontos simultâneos, principalmente nos barramentos alimentados pelos secundários dos transformadores, no entanto devido à indisponibilidade de instrumentos de medição, este procedimento não foi adotado.

Quando um impulso de tensão é acompanhado por um simultâneo impulso de corrente, a interação entre estas grandezas pode colaborar na interpretação e identificação dos distúrbios. Neste caso a polaridade do transitório é um indicador do sentido da propagação de energia. A tabela 4.1 indica o sentido dos impulsos em função das respectivas polaridades (Price 1992).

Tabela 4.1: Mudança de Polaridade

Tensão	Corrente	Origem
+	+	Fonte
-	-	Fonte
+	-	Carga
-	+	Carga

Observa-se que, quando mudanças de polaridade ocorrem com o mesmo sentido nas tensões e correntes, a provável origem dos distúrbios é o sistema (concessionária). Para polaridades opostas a origem é relacionada com a carga.

A experiência relatada no artigo (Price 1992), oferece um suporte técnico para que se possa fazer uma análise mais consistente a respeito da possível localização do distúrbio. Esse trabalho mostra uma situação em relação ao comportamento de um grupo de lâmpadas de vapor de

sódio de alta pressão. No mesmo instante em que ocorre uma diminuição da corrente elétrica verifica-se um afundamento de tensão, indicando que a fonte do distúrbio observado não se encontrava no interior da indústria, mas sim em algum ponto do alimentador da concessionária. Em razão da dificuldade na análise de vários tipos de distúrbios, torna-se importante o estudo de casos práticos como este, com características típicas que auxiliam na solução de outras ocorrências. Entretanto, é preciso destacar que a determinação do sentido de propagação dos impulsos em sistemas trifásicos nem sempre é possível. Por causa da interação com o circuito nos quais eles circulam, os transitórios frequentemente irão propagar-se em uma frequência de ressonância determinada pela característica da impedância e da capacitância do circuito. Estas ressonâncias devem ser em frequências acima de 100kHz ou mais, e quando elas estão presentes tendem a dificultar a visão da polaridade do pulso inicial. As seis figuras a seguir correspondem ao monitoramento simultâneo dos sinais de tensão e corrente na cabine de medição (ponto de entrada da CPFL).

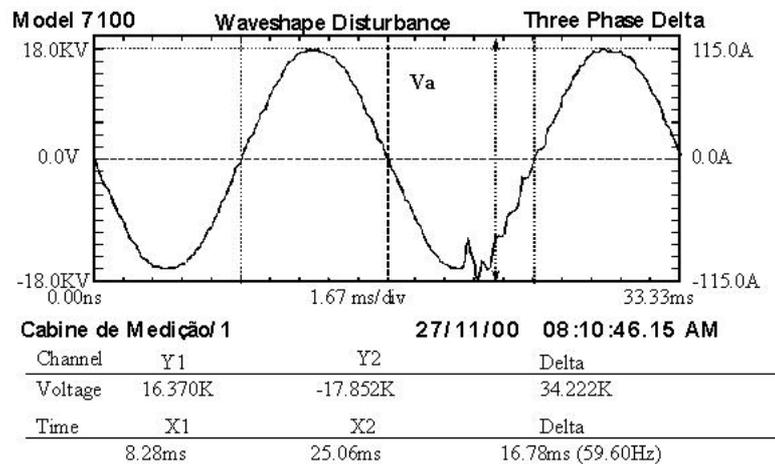


Figura 4.2: Forma de Onda da Tensão V_a -Cabine de Medição

Nas figuras 4.2 e 4.3 verifica-se que as mudanças de polaridade dos pulsos da tensão V_a e da corrente I_a ocorreram no mesmo sentido, portanto a provável origem dos distúrbios deverá estar localizada a montante do ponto da medição, o que se torna necessário uma manutenção no disjuntor geral, dispositivos de proteção (para-raios) e no alimentador da concessionária.

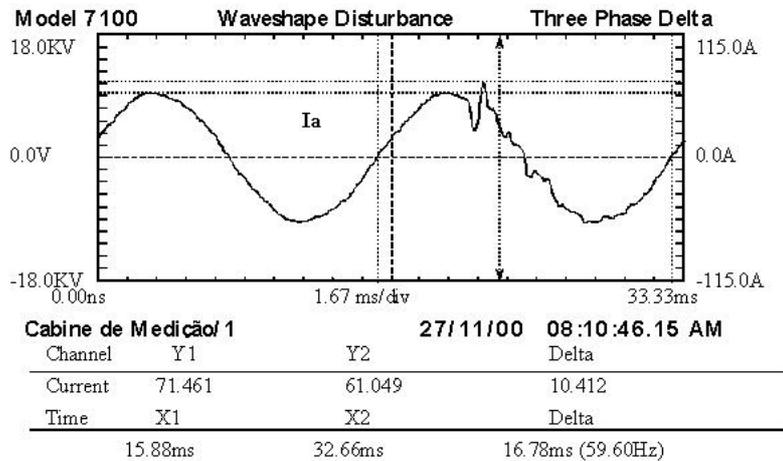


Figura 4.3: Forma de Onda da Corrente Ia-Cabine de Medição

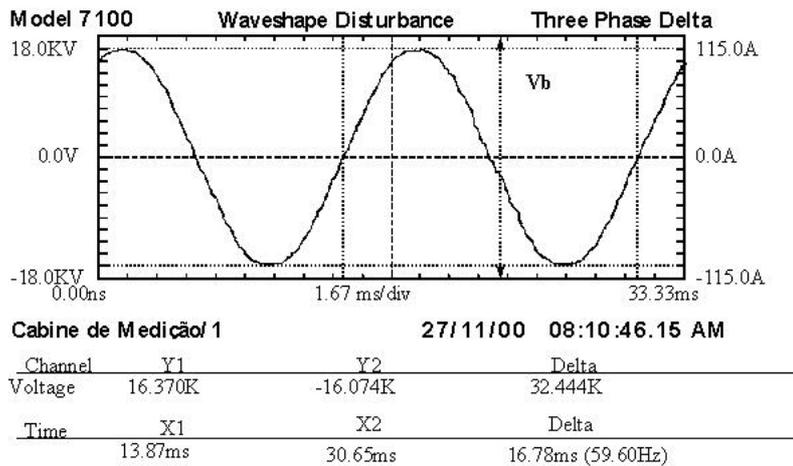


Figura 4.4: Forma de Onda da Tensão Vb-Cabine de Medição

Observa-se nas figuras 4.4 e 4.5 que no instante da ocorrência do início do primeiro transitório o valor instantâneo de Ib deveria tender a zero, no entanto tem-se um pico de aproximadamente 60A, pois significa uma variação de corrente de 3245A distribuída nos barramentos secundários dos transformadores. Isto não é impossível de ocorrer em decorrência da grande maioria das máquinas funcionarem em regime intermitente com grandes impactos.

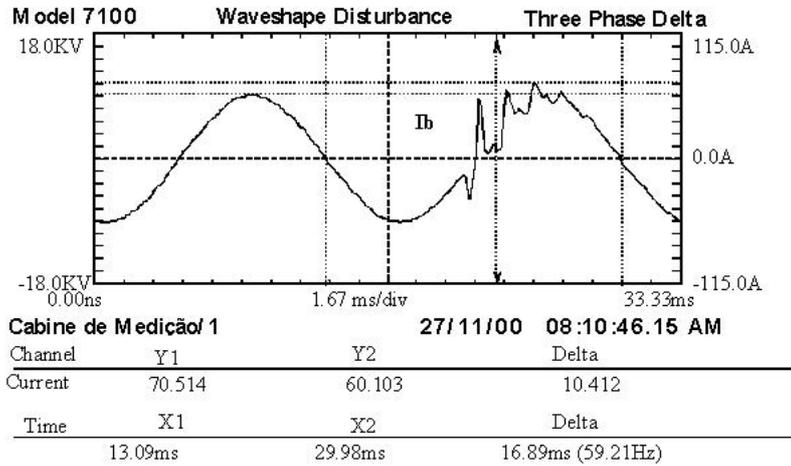


Figura 4.5: Forma de Onda da Corrente Ib-Cabine de Medição

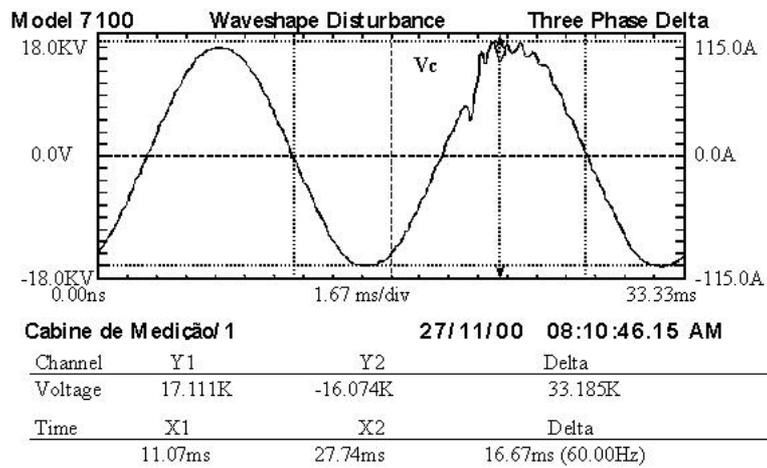


Figura 4.6: Forma de Onda da Tensão Vc-Cabine de Medição

A forma de onda de I_c na figura 4.7 , é muito diferente das demais, apresentando elevado nível de distorção. Verifica-se que no instante da ocorrência do maior pico de corrente I_c da ordem de 114A (em 21,68ms) ocorreu uma diminuição da tensão V_c , o que indica uma provável origem dos distúrbios no comportamento das cargas.

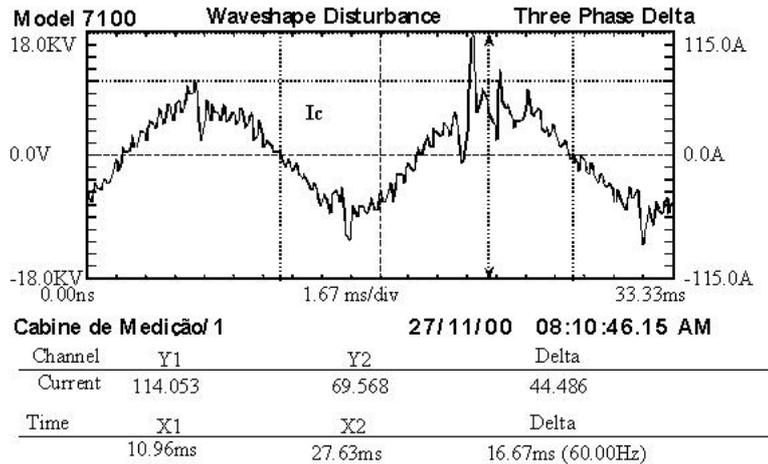


Figura 4.7: Forma de Onda da Corrente I_c -Cabine de Medição

4.5 Monitoramento dos Afundamentos de Tensão - Cabine de Medição

Os gráficos que se seguem correspondem ao monitoramento das variações momentâneas de tensão, sendo que neste mesmo período são apresentadas as variações de correntes.

Sendo que estes distúrbios foram provocados por elevadas correntes das cargas que operam nesta indústria.

Por outro lado, aparece uma grande preocupação, visto que existem diversos equipamentos sensíveis a estes distúrbios, tais como: curvadoras de tubos(BLM),cabines de pinturas, recravadores Comas, sistema telefônico e os computadores.

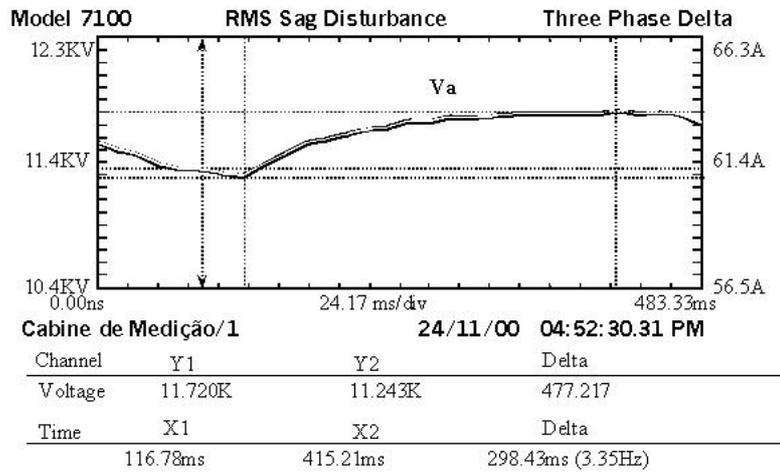


Figura 4.8: Afundamento da tensão eficaz V_a -Cabine de Medição

Neste caso observa-se que o afundamento da tensão, ocorreu com o decréscimo da corrente, indicando que a fonte do distúrbio ocorrido nesta fase, é externo (Price 1992).

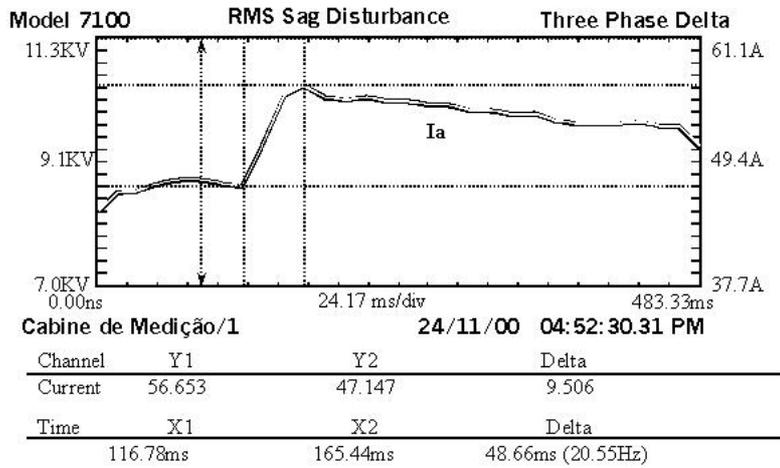


Figura 4.9: Variação da corrente eficaz I_a -Cabine de Medição

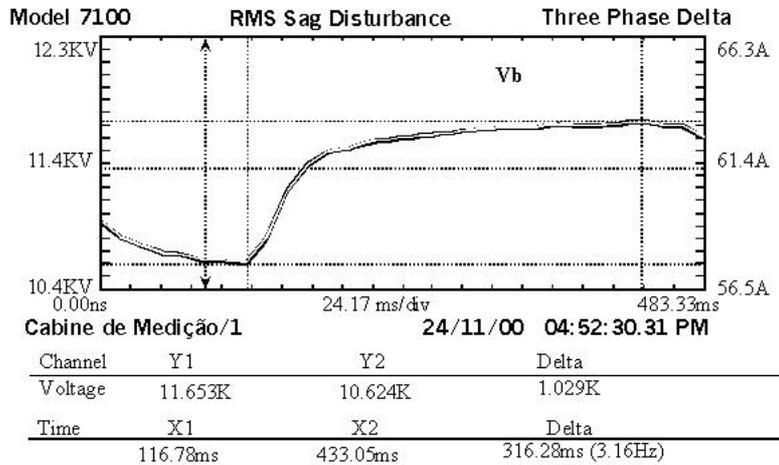


Figura 4.10: Afundamento da tensão eficaz Vb-Cabine de Medição

Nas figuras 4.10 e 4.11 observa-se que a variação momentânea de Vb ocorreu com duração de aproximadamente 25 ciclos, porém de forma muito mais brusca do que aconteceu com a amplitude de Va. Neste caso as variações da tensão Vb ficaram entre 10624V (10,7 %) e 11653V (2,1%). O que realmente caracteriza uma situação muito preocupante principalmente em relação às cargas sensíveis a esta variação. Durante o afundamento da tensão observa-se um decréscimo da corrente Ib.

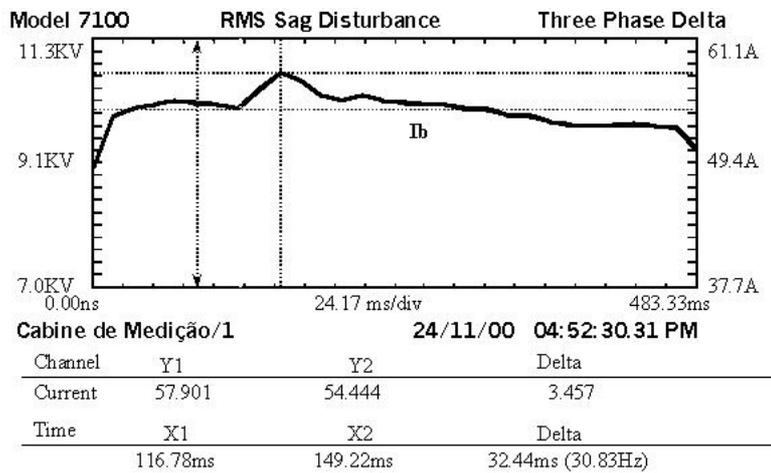


Figura 4.11: Variação da corrente eficaz Ib-Cabine de Medição

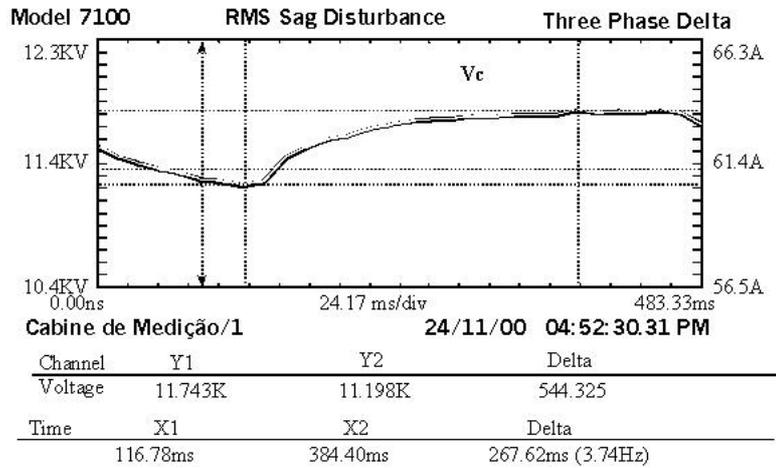


Figura 4.12: Afundamento da tensão eficaz V_c -Cabine de Medição

Na figura 4.12 observa-se que no caso da variação momentânea de V_c o período de duração indicado no gráfico foi de 23 ciclos, sendo que sua amplitude variou entre os valores 11198V (6%) e 11743V (1,3%). Verificou-se portanto uma variação nas três tensões de linha de forma simultânea.

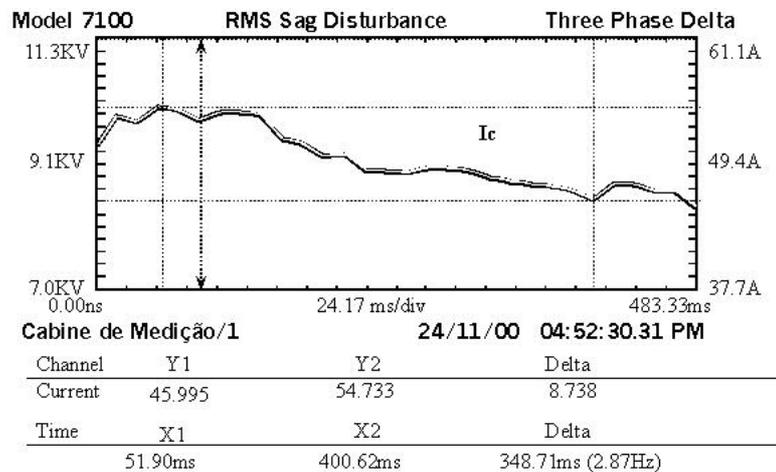


Figura 4.13: Variação da corrente eficaz I_c -Cabine de Medição

Na figura 4.13 a corrente I_c tem o mesmo comportamento das demais correntes. Com vista a uma análise conjunta das tensões e correntes pode-se verificar que os afundamentos de tensões teve como origem a parte interna ao monitoramento, ou seja as cargas industriais, o que não isenta de responsabilidade a concessionária devido a suportabilidade do seu alimentador 11,9 kV.

4.6 Monitoramento das Distorções da Forma de Onda - Cabine de Medição

Há vários anos, diversos grupos de engenheiros tem expressado suas preocupações com o contínuo aumento do nível de harmônicas. Um estudo desenvolvido no Japão fez um prognóstico de que até o ano 2000 a distorção harmônica total(DHT) da tensão chegaria em 6% a 7% na área industrial e de 4% a 5% nas residências (I.M. Nejdawi 1999). As distorções harmônicas de corrente e de tensão podem provocar um sobreaquecimento nas máquinas rotativas, transformadores, o carregamento de condutores, falha prematura ou operação dos dispositivos de proteção e condições de ressonância no sistema elétrico da fábrica, que podem causar falhas na operação do sistema elétrico e medições incorretas. Alguns aspectos dos espectros harmônicos, devem ser enfatizados:

1. A presença de um número significativo de harmônicas de ordem par, pode indicar a presença de formas de onda não simétricas em relação à referência.
2. Dispositivos monofásicos de conversão de potência podem produzir uma componente contínua na corrente.
3. Retificadores trifásicos totalmente controlados ideais produzirão harmônicas características de corrente de cujas ordens são dados por:

$$h = k \times p \pm 1 \quad (4.1)$$

h é a ordem da harmônica, k é um número real inteiro e p representa o número de pulsos. De um modo geral, num sistema de sistema de energia elétrica a presença de correntes e/ou tensões distorcidas podem causar além da indução de ruído em sistemas de comunicação ou de sinalização e controle, uma série de outros problemas como o aumento das perdas nos equipamentos, a redução na eficiência de motores c.a, o aumento da demanda de potência reativa, o aumento da necessidade de investimentos para os sistemas, a redução na qualidade de determinados produtos industriais, o aumento nos custos de

manutenção, o aumento nas contas de energia elétrica, bem como falhas de determinados equipamentos sujeitos à sobretensões harmônicas devido à ressonâncias. Portanto, o monitoramento da presença de distorções harmônicas nos sinais de tensão e corrente faz-se necessário.

As 6 figuras seguintes pretendem mostrar o conteúdo harmônico da tensão e da corrente de entrada da indústria. No entanto deve-se ressaltar que a forma de avaliação do conteúdo harmônico utilizada com o BMI 7100 não é a mais adequada, pois não se pode fazer nenhuma programação no que se refere ao número de ciclos, indicar as principais componentes harmônicas ou qualquer outro direcionamento que se queira dar no monitoramento.

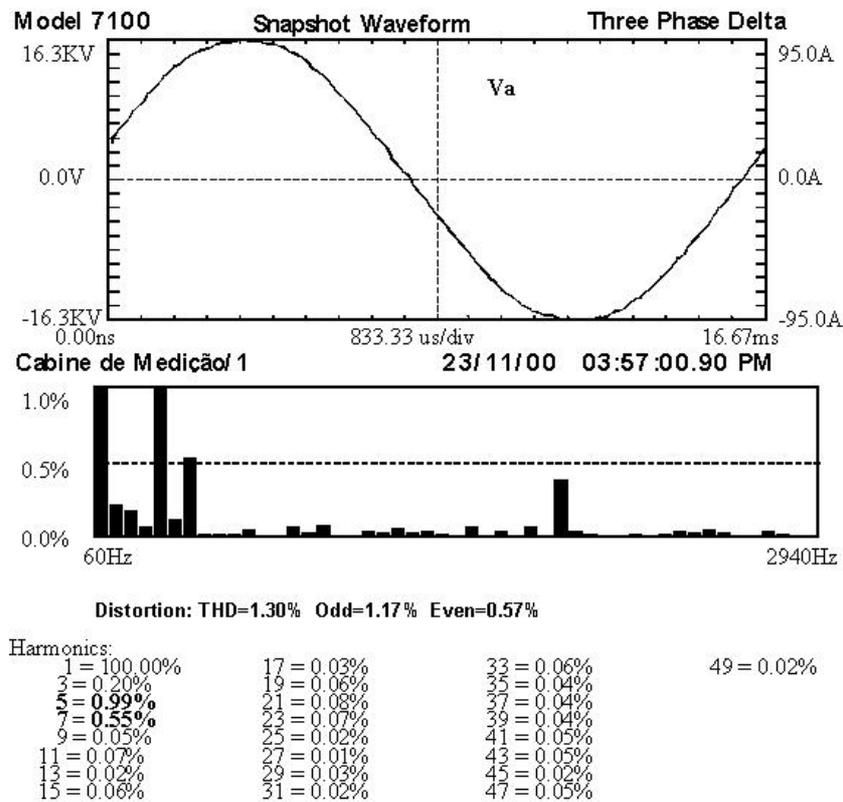


Figura 4.14: Harmônicas da Tensão Va-Cabine de Medição

Os componentes de quinta, sétima e trigésima segunda harmônicas, conforme indicado nas figuras 4.14 e 4.15, são as de maior amplitude. Conforme é do conhecimento as

harmônicas de terceira, quinta e sétima ordens seriam esperadas em razão das cargas monitoradas que apresentam esta característica. A presença das harmônicas pares, notadamente a da trigésima segunda harmônica é aparentemente inexplicável. Além disso, vale a pena lembrar que a operação não idealizada de conversores que alimentam equipamentos de solda que podem apresentar conteúdo harmônico par. A ênfase da trigésima segunda harmônica poderia estar associada a algum tipo de ressonância devido ao lay-out da instalação industrial. Uma provável ressonância só poderia ser realmente prognosticada após levantamento detalhado dos modelos equivalentes de cada equipamento, o que infelizmente não pode ser feito, devido a indisponibilidade de dados aliada à incerteza do melhor modelo.

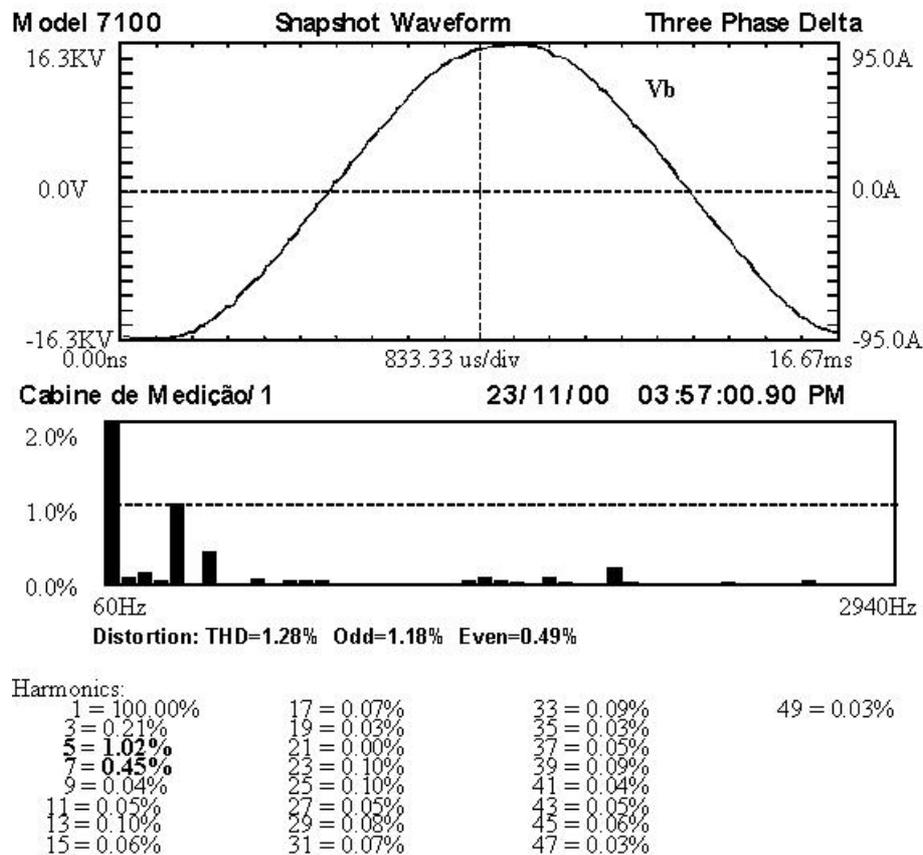


Figura 4.15: Harmônicas da Tensão Vb-Cabine de Medição

Na figura 4.16 a distorção harmônica tem predominância das componentes de quinta, sétima e trigésima segunda ordens. As componentes harmônicas de segunda e quarta ordens são provavelmente injetadas pelas muitas máquinas de soldas à arco elétrico. Neste caso o fator de distorção harmônica total em cada uma das fases não ultrapassou 1,3% e, portanto, pode-se afirmar que a qualidade de energia está razoável sob este restrito aspecto nas formas de onda de tensão.

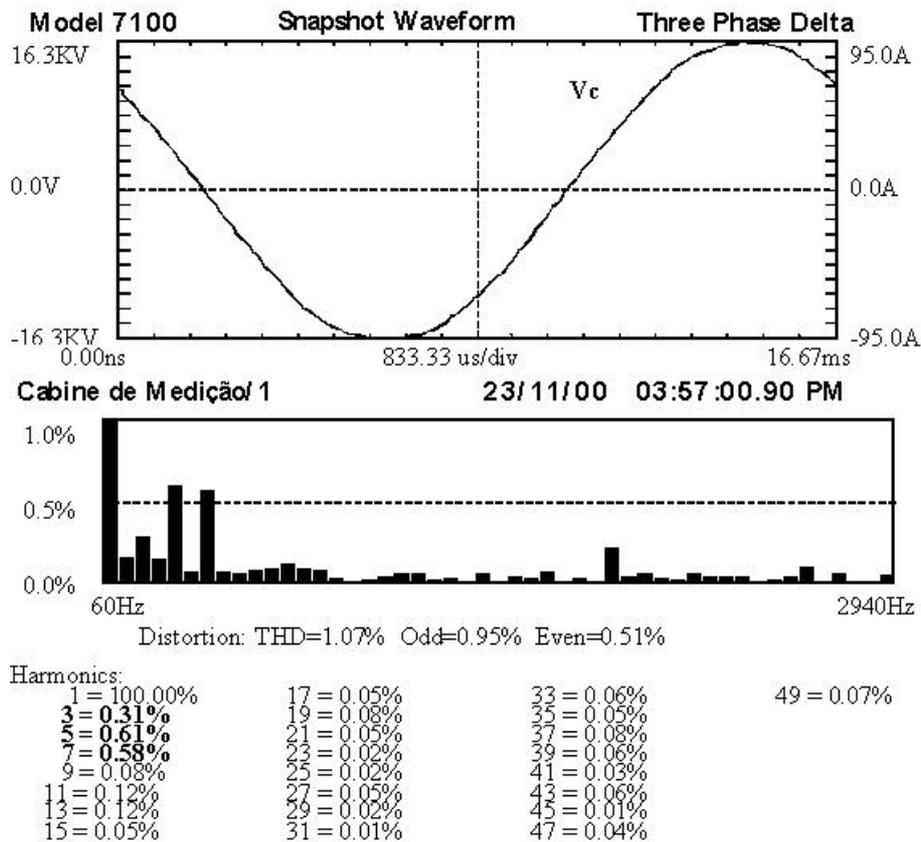


Figura 4.16: Harmônicas da Tensão Vc-Cabine de Medição

Com referência as componentes harmônicas das correntes Ia, Ib e Ic, constata-se através dos gráficos seguintes, que somente a distorção harmônica total de Ic se encontra acima do valor 12%, limite recomendado pela IEEE (IEEE519 1996).

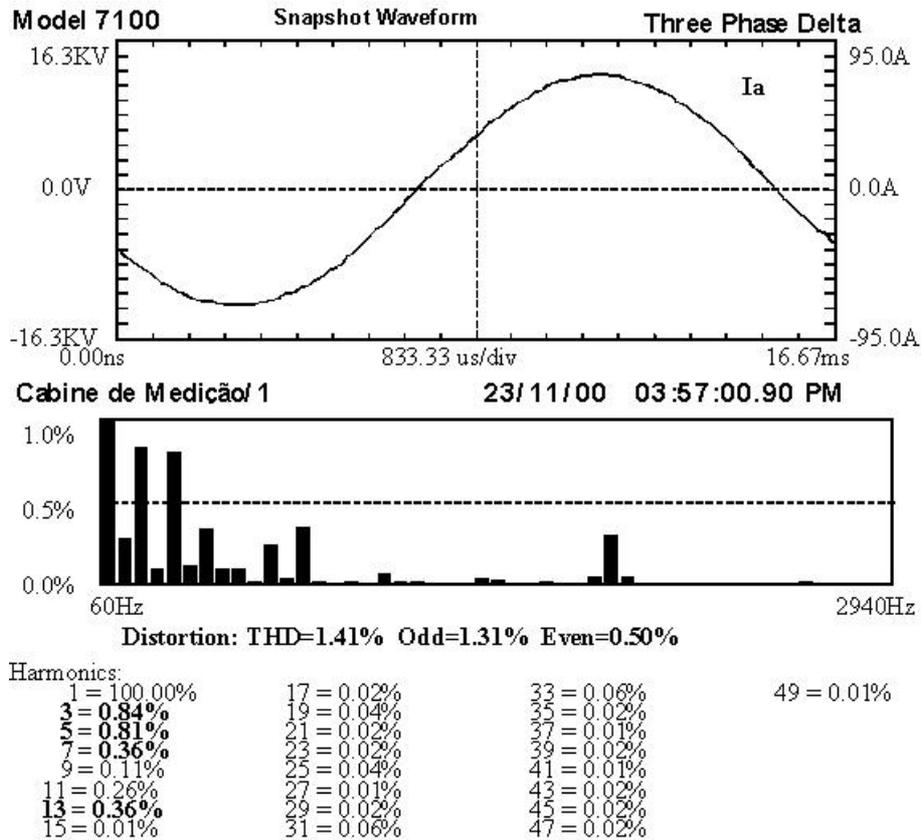


Figura 4.17: Harmônicas da Corrente Ia-Cabine de Medição

No caso da corrente de linha Ia, os componentes que apresentam o maior conteúdo harmônico são a terceira e a quinta.

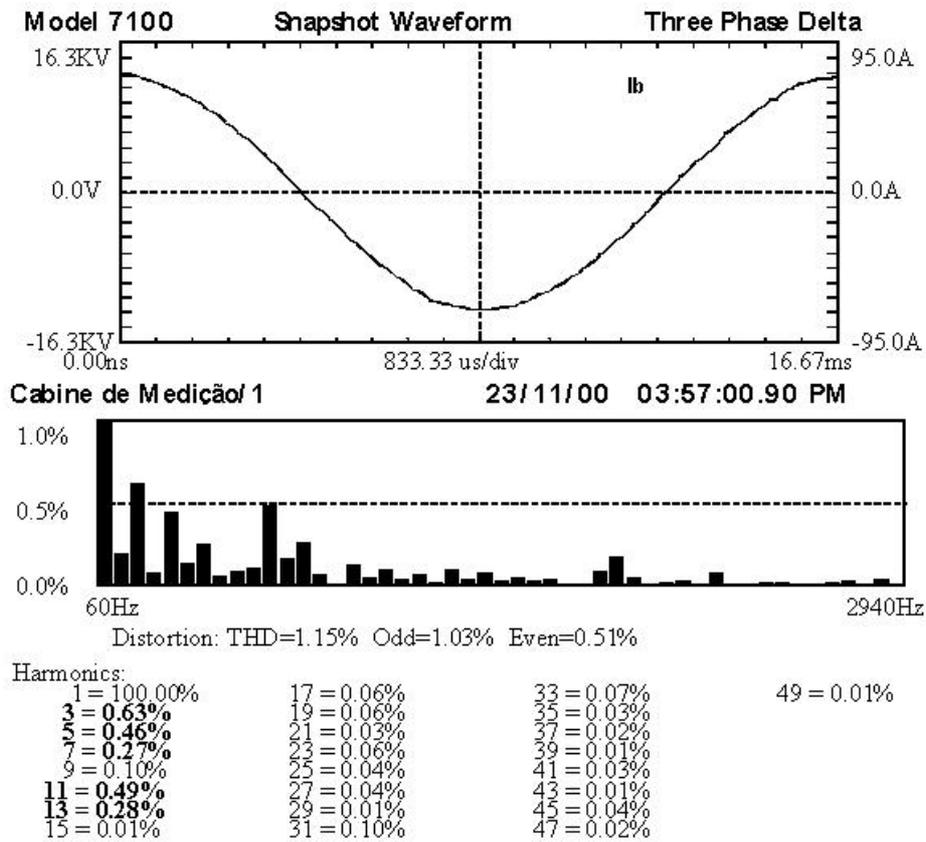


Figura 4.18: Harmônicas da Corrente Ib-Cabine de Medição

No caso da corrente Ib, aparecem com maior evidência as componentes harmônicas de terceira, quinta e décima primeira.

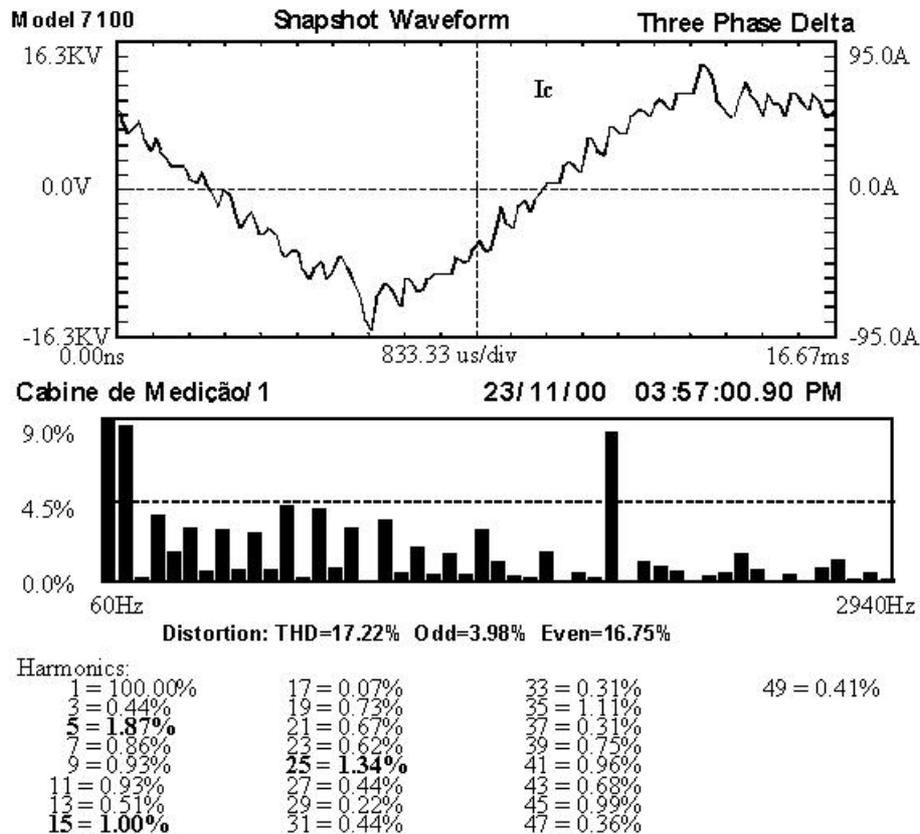


Figura 4.19: Harmônicas da Corrente Ic-Cabine de Medição

Verifica-se uma distorção harmônica total superior ao previsto pela recomendação IEEE (IEEE519 1996) (12 %) que consta na tabela 3.3 considerando $I_{sc}/I_L=50-100$ no ponto de ligação (PCC), valor este utilizado pelas indústrias nacionais. Ocorre que as componentes de segunda e trigésima segunda são as de maiores amplitudes, sendo que as componentes harmônicas de ordem par representam uma característica inerente aos equipamentos de solda, e no caso específico da trigésima segunda provavelmente está associada a um tipo de ressonância no sistema elétrico.

4.7 Monitoramento dos Gráficos de Tensão - Cabine de Medição

A variação média do valor eficaz de V_a ocorre entre os valores 12027V e 11429V, o que representa respectivamente +1,07% e -4,0% em relação a tensão da rede primária da concessionária(11900V). Entretanto, verifica-se picos ocasionais de tensão como 12280V (3,2%) e valor mínimo de tensão 10980(-7,7%).

A tensão V_b assume uma variação média entre os valores 11973V (+0,6%) e 11440V (-4,2%), mas também apresentando alguns afundamentos de tensão da ordem de 10590V (-11% em relação a tensão nominal da rede 11900V), e também um pico de tensão de 12280V(3,2%).

Basicamente a mesma variação que aconteceu com as tensões V_a e V_b se aplica a V_c , ou seja, tem-se uma variação média entre os valores 11994V (+0,8%) e 11440 (-4,2%). Observa-se através do gráfico que houve um pico de tensão da ordem de 12410V (4,3%) e alguns valores em torno de 10980V (-7,7%).

As medições de V_a , V_b e V_c ocorreram simultaneamente do dia 23/11/2000(quinta) a 29/11/2000(quarta), o que se pode considerar um período adequado para se obter um perfil bem próximo da realidade desta indústria, no que diz respeito ao comportamento macro das cargas e as possíveis falhas no alimentador da concessionária.

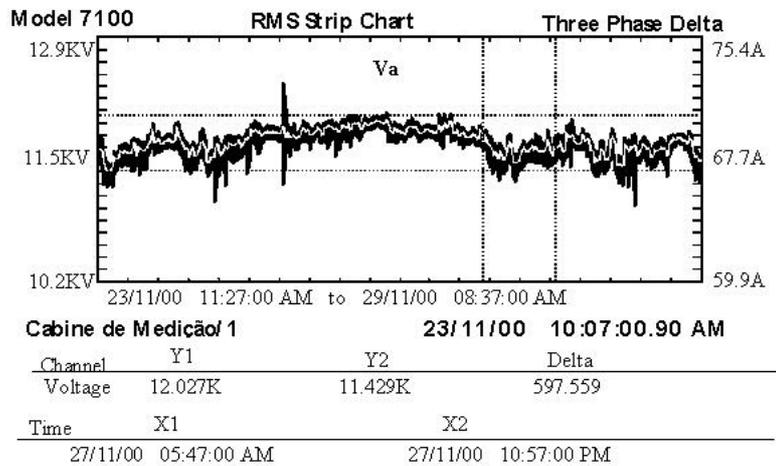


Figura 4.20: Comportamento da tensão eficaz V_a -Cabine de Medição

É interessante observar que em determinadas situações em que ocorre o afundamento da tensão V_a verifica-se um decréscimo da corrente I_a , conforme comentários já feitos, o que indica um provável distúrbio no alimentador da concessionária, ou na própria cabine de medição. Em outros casos nota-se a elevação da tensão quando do decréscimo da corrente, motivado pelo comportamento das cargas.

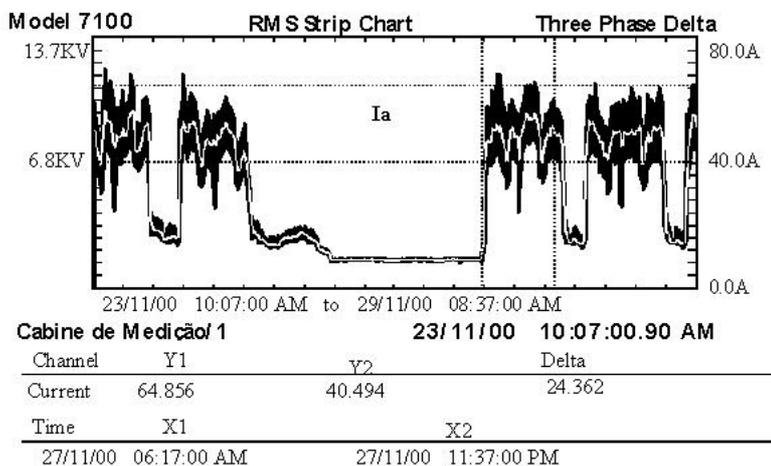


Figura 4.21: Comportamento da corrente eficaz I_a

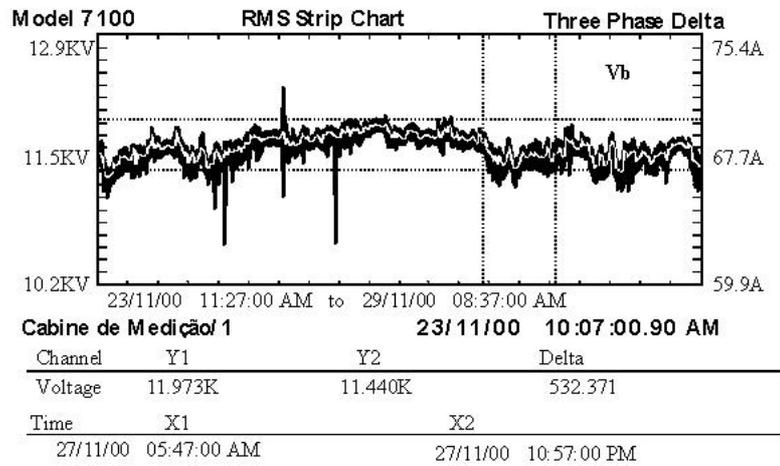


Figura 4.22: Comportamento da tensão eficaz Vb-Cabine de Medição

No período assinalado nos gráficos, de 5:47 a 22:57 do dia 27/11/00, os valores médios eficazes das tensões se encontram em torno de 11,5kV, portanto abaixo da tensão nominal de 11,9kV. Este valor de tensão nominal é realmente alcançado somente quando a fábrica não está produzindo.

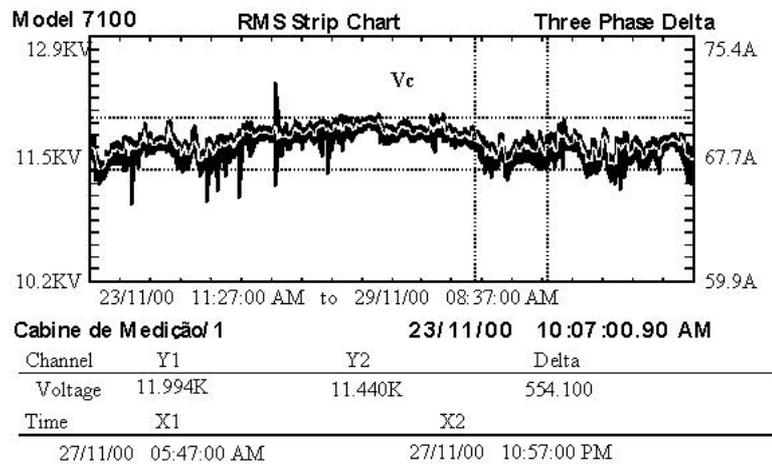


Figura 4.23: Comportamento da tensão eficaz Vc-Cabine de Medição

4.8 Monitoramento da Potência Aparente Demandada - Cabine de Medição

Na figura tem-se a potência aparente demandada pela indústria num período aproximado de uma semana.

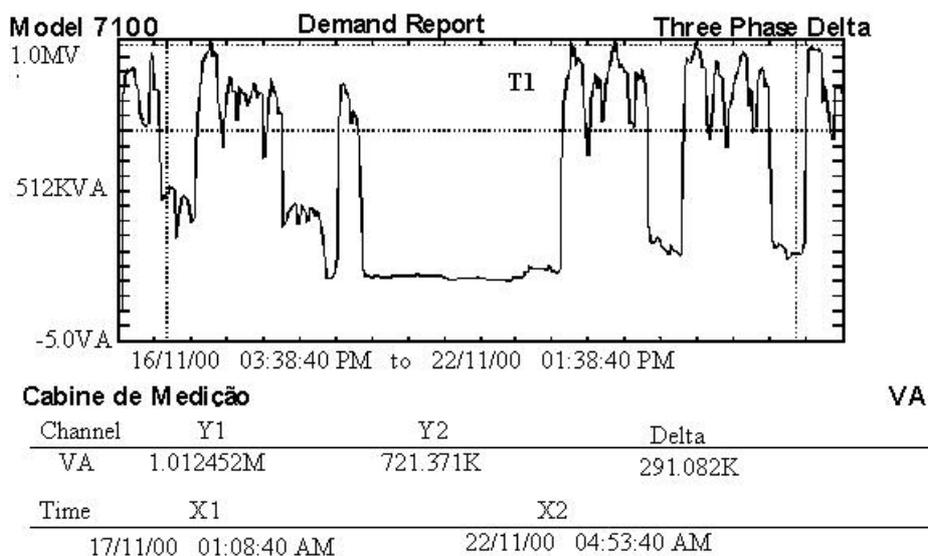


Figura 4.24: Potência aparente demandada (kVA) - Cabine de Medição

Verifica-se que a potência aparente demandada máxima é igual 1012 kVA o que representa a fábrica trabalhando com um fator de demanda igual a 45%, e pode-se considerar uma demanda média com a indústria em operação equivalente à quase 721 kVA nesta situação o fator de carga passa a ser de 32%. Evidentemente é necessário considerar os efeitos de oscilações da produção, principalmente porque as medições foram realizadas no mês de novembro, época na qual ocorre uma queda normal de produção. Provavelmente com uma melhor distribuição de cargas nos circuitos, levando em consideração as variações dos níveis de produção, e com a instalação de um controlador de demanda, é possível aproximar os valores dos fatores de demanda máximo e mínimo.

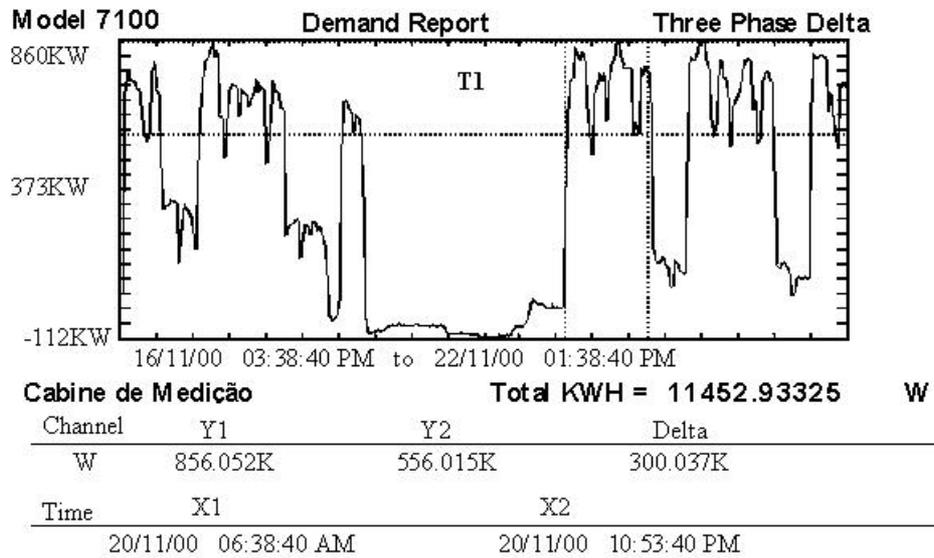


Figura 4.25: Demanda em kW - Cabine de Medição

Os valores observados das demandas máxima e mínima em kW, são respectivamente iguais a 856kW e 556kW, e quando as máquinas de produção estão paradas, a demanda é igual a zero. Portanto pode-se então concluir que neste intervalo de tempo os bancos de capacitores permaneceram ligados, visto que se registrou-se um valor de demanda de 200 kVA (veja a figura 4.24).

4.9 Monitoramento dos Transitórios - QDF001

Os transitórios de tensão causados por descargas atmosféricas ou operações de chaveamento podem resultar em degradação ou a imediata falha no dielétrico em todo o tipo de equipamento. A elevada amplitude e o rápido crescimento do transitório no tempo contribui para a ruptura do isolamento(breakdown)nos equipamentos elétricos como máquinas rotativas, transformadores, capacitores, cabos, transformadores de corrente(TC), transformadores de potencial (TP) e disjuntores.

A repetição dos transitórios de baixa amplitude aplicada nestes equipamentos provoca uma lenta degradação e uma eventual falha no isolamento, ocorrendo assim uma redução da vida média dos equipamentos. Na avaliação das ocorrências procurou-se sempre confrontar os parâmetros propostos pelas recomendações da IEEE(IEEE1159 1995), procurando analisar a gravidade de cada ocorrência de forma apresentar a sugestões com a finalidade de mitigar os distúrbios.

Como a ligação do enrolamento secundário do transformador que alimenta o barramento é estrela com neutro aterrado acessível, foi possível realizar o monitoramento da formas de onda da tensão e corrente do neutro.

É importante mencionar que o monitoramento foi realizado em todos os barramentos alimentados pelos secundários dos transformadores. Observa-se que em cada medição tem sua peculiaridade para uma análise mais concisa em relação a natureza das cargas. Optou-se por mostrar o monitoramento do QDF001 pelo fato de estar alimentando cargas como máquinas de solda, máquinas BLM, recravador Comas e prensas.

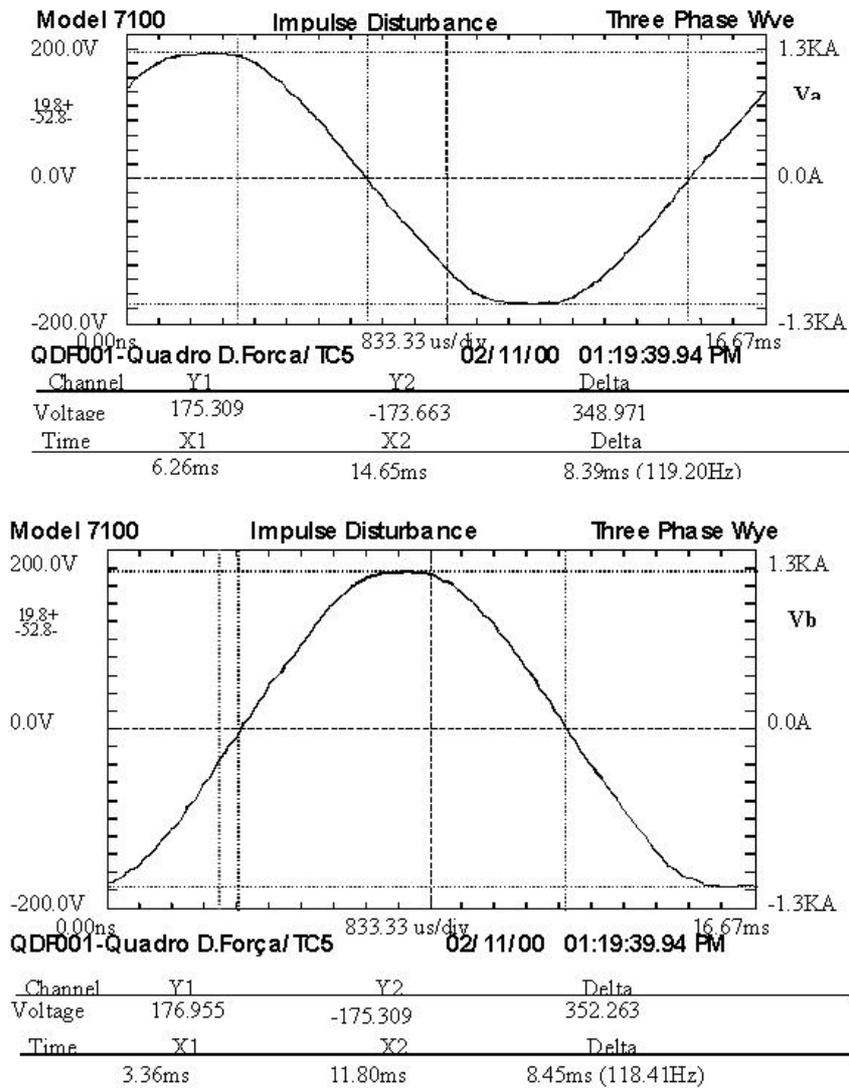
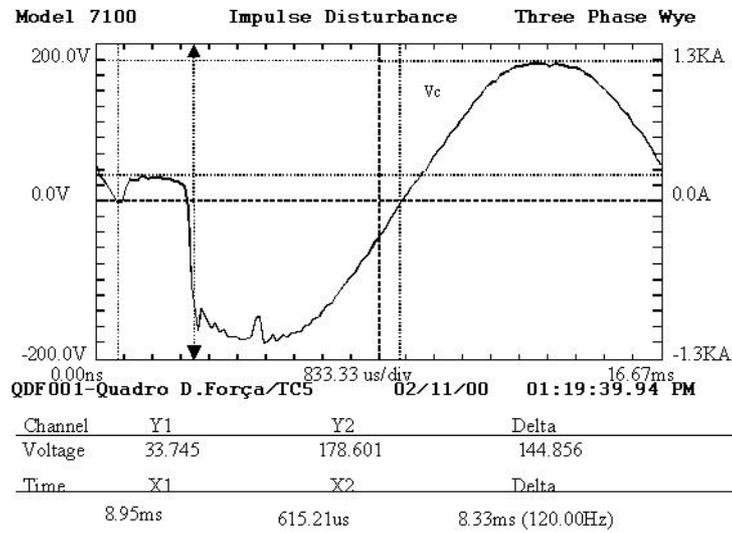
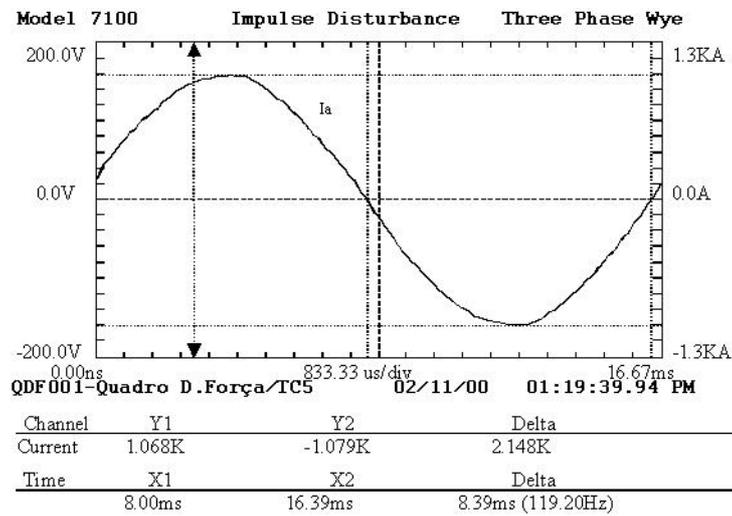


Figura 4.26: Impulso das Tensões Va e Vb - QDF001

Na figura 4.26 verifica-se que as tensões Va e Vb estão com comportamento razoável visto que suas amplitudes em valores eficazes são respectivamente 123,7V (queda 2,6%) e 125,1V (queda de 1,5%) sendo que a frequência está na ordem de 59,6Hz e as formas de onda não apresentam visualmente grandes distúrbios.

Figura 4.27: Impulso da tensão V_c - QDF001

Na figura 4.27 observa-se que a tensão V_c sofreu um impacto pois apresentou uma variação de aproximadamente 145V em sua amplitude, inclusive podendo constatar que houve uma tendência na inversão da polaridade da tensão no instante $t=8.95\text{ms}$.

Figura 4.28: Impulso da corrente I_a - QDF001

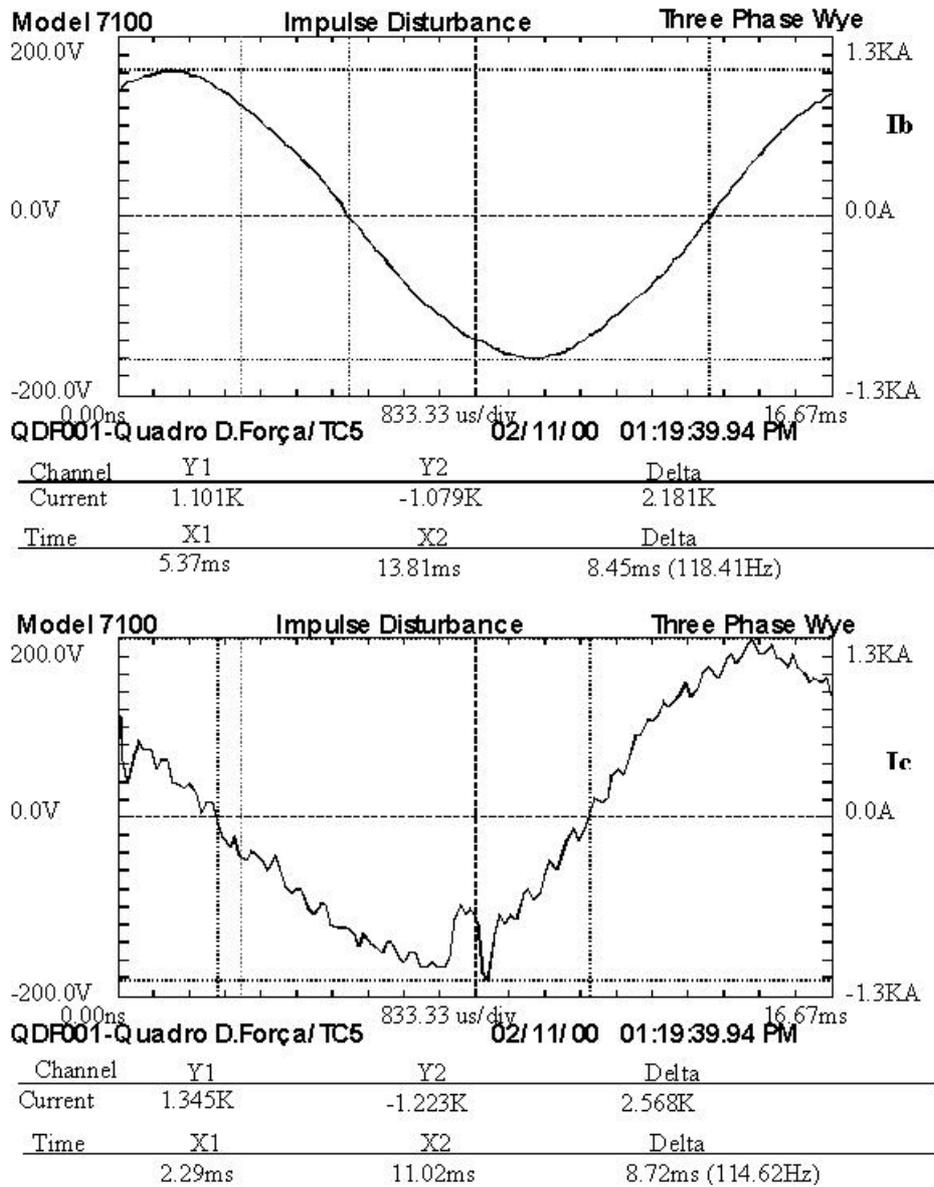


Figura 4.29: Correntes Ib e Ic - QDF001

Na figura 4.29 observa-se que o valor de Ib máximo é igual à 1101A, e para Ic o valor máximo é igual a 1345A. Na figura 4.28 ocorre um valor máximo Ia igual à 1068A, neste caso verifica-se um desequilíbrio considerável no sistema elétrico.

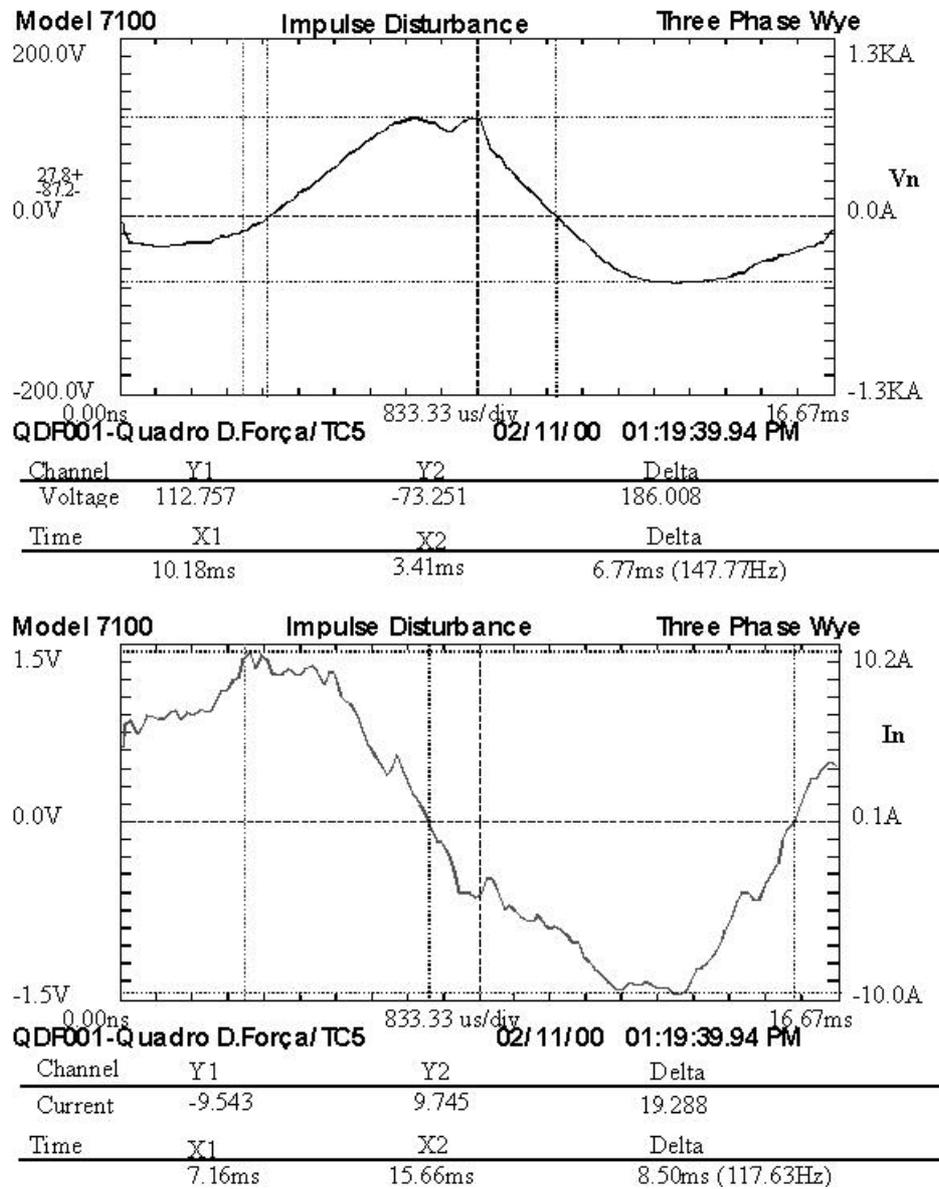


Figura 4.30: tensão V_n e corrente I_n - QDF001

Na figura 4.30 observa-se que o valor de pico da corrente de neutro I_n é igual 9,7A, sendo 0,9% da corrente de linha I_a , e que para a tensão V_n de neutro para terra tem-se o valor de pico igual à 112,7V.

4.10 Monitoramento das Formas de Ondas - QDF001

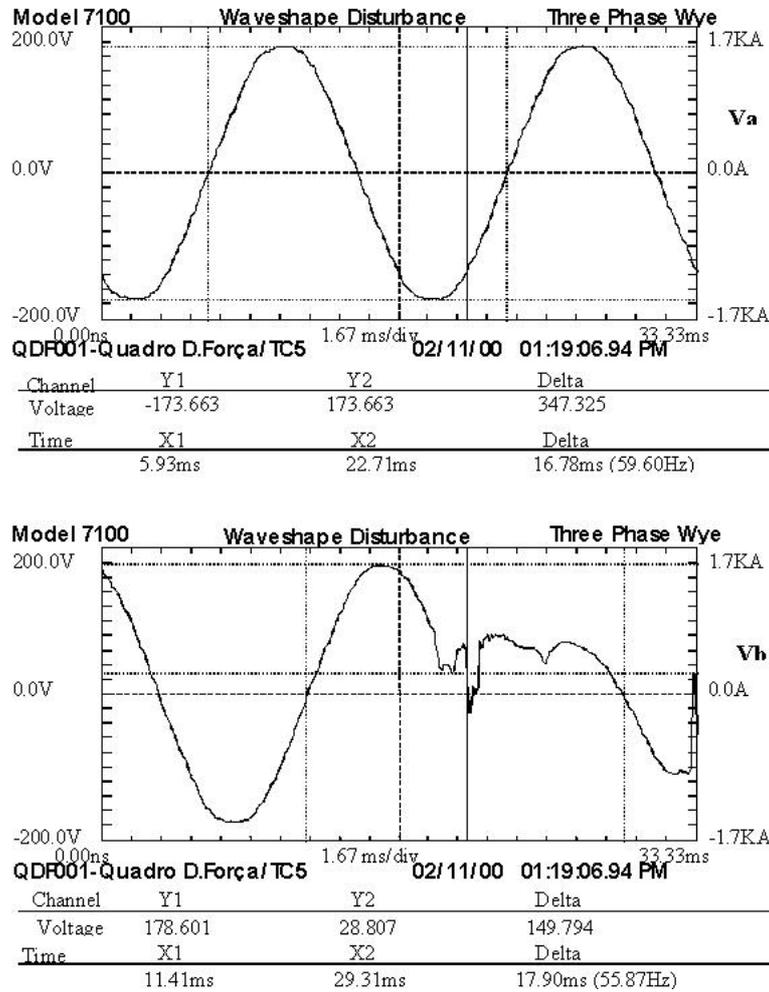


Figura 4.31: Forma de Onda das Tensões Va e Vb - QDF001

A situação representada pela figura 4.31, evidencia-se que houve uma variação de tensão Vb próximo a 98V em uma frequência 2,6kHz, sendo que as tensões Va e Vc (ver figura 4.32) não foram comprometidas com esta distorção.

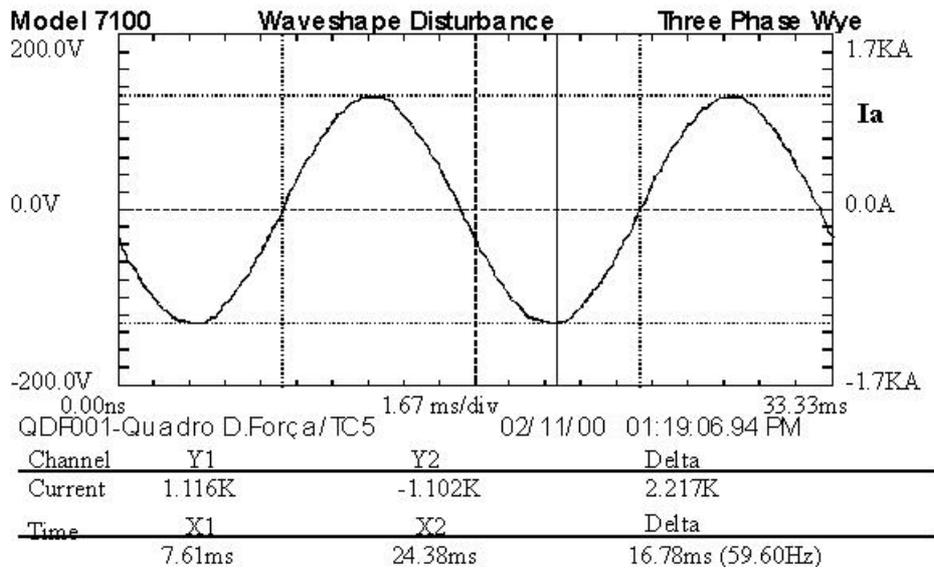
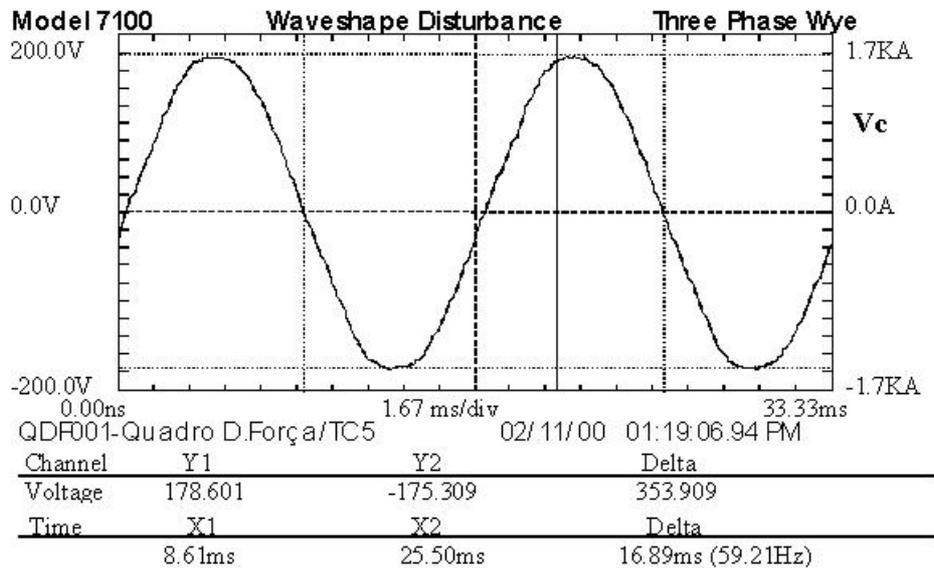


Figura 4.32: Forma de Onda da Tensão V_c e da Corrente I_a - QDF001

Conforme pode-se verificar pela tabela o valor de pico da corrente I_a corresponde a 1116A, sendo exatamente o mesmo valor de I_b mostrado pela figura 4.33.

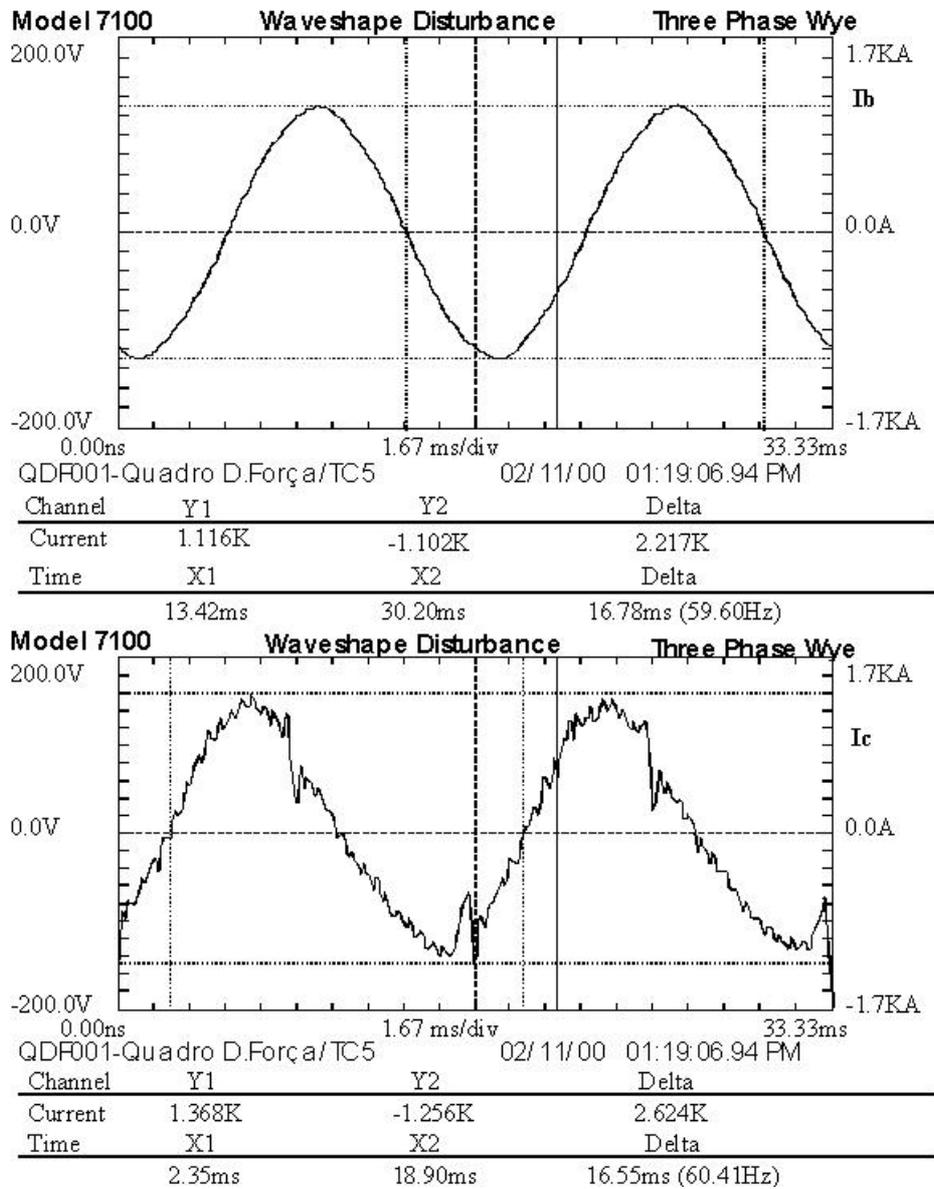


Figura 4.33: Forma de Onda das Correntes Ib e Ic - QDF001

A forma de onda de Ic é aproximadamente senoidal, mas mostra variações bruscas, tipicamente em oposição de fase separadas por 180^0 , sendo que uma das causas prováveis são as cargas capacitivas (banco de capacitores para correção do fator de potência).

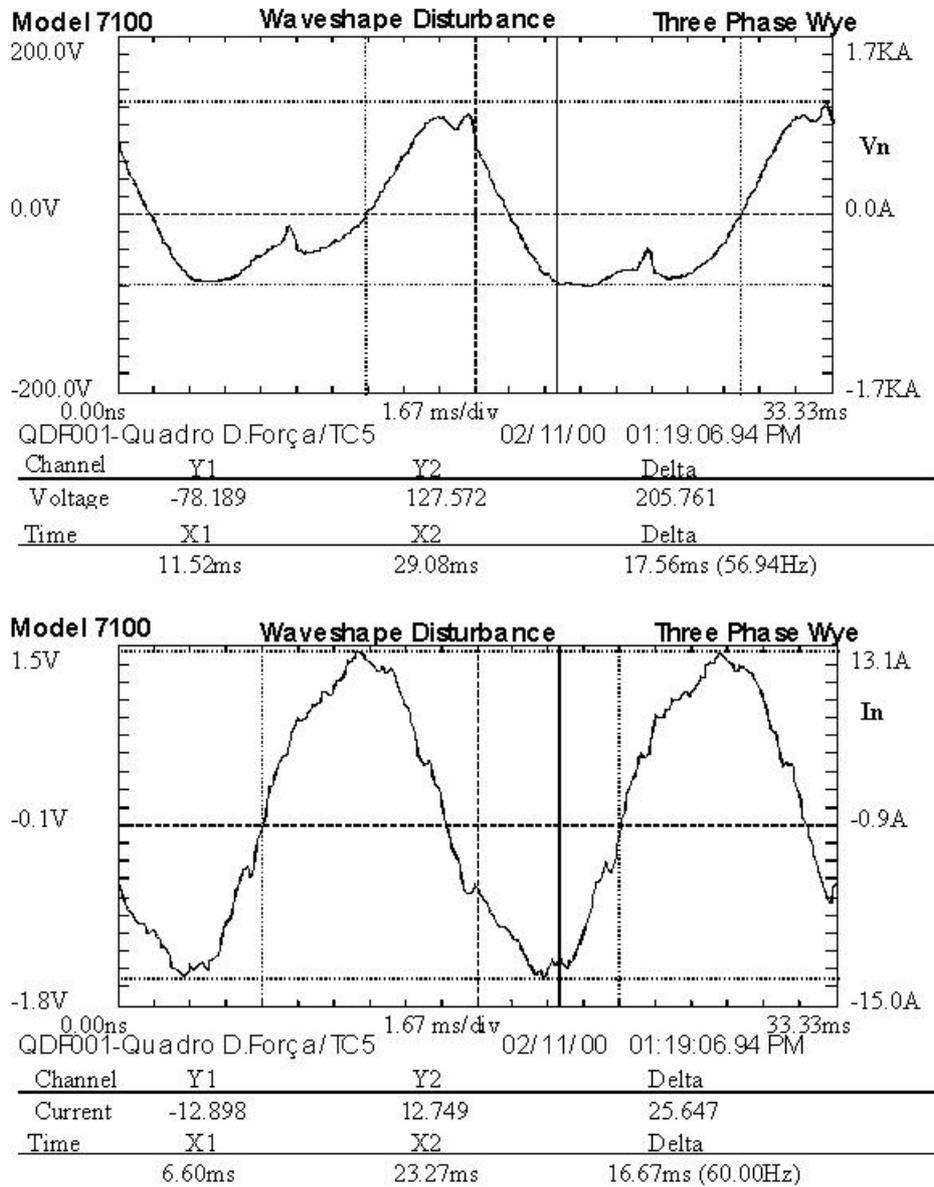


Figura 4.34: Forma de Onda da Tensão V_n e da Corrente I_n - QDF001

Verifica-se pelo gráfico da tensão V_n a ocorrência periódica de distorções devido a um controle eletrônico de cargas. O grau da distorção irá variar com a quantidade de potência requerida pela carga.

4.11 Monitoramento das Distorções da Forma de Onda - QDF001

Seria muito interessante fazer uma abordagem mais significativa em relação as distorções harmônicas, mas não foi possível devido a limitação do instrumento utilizado.

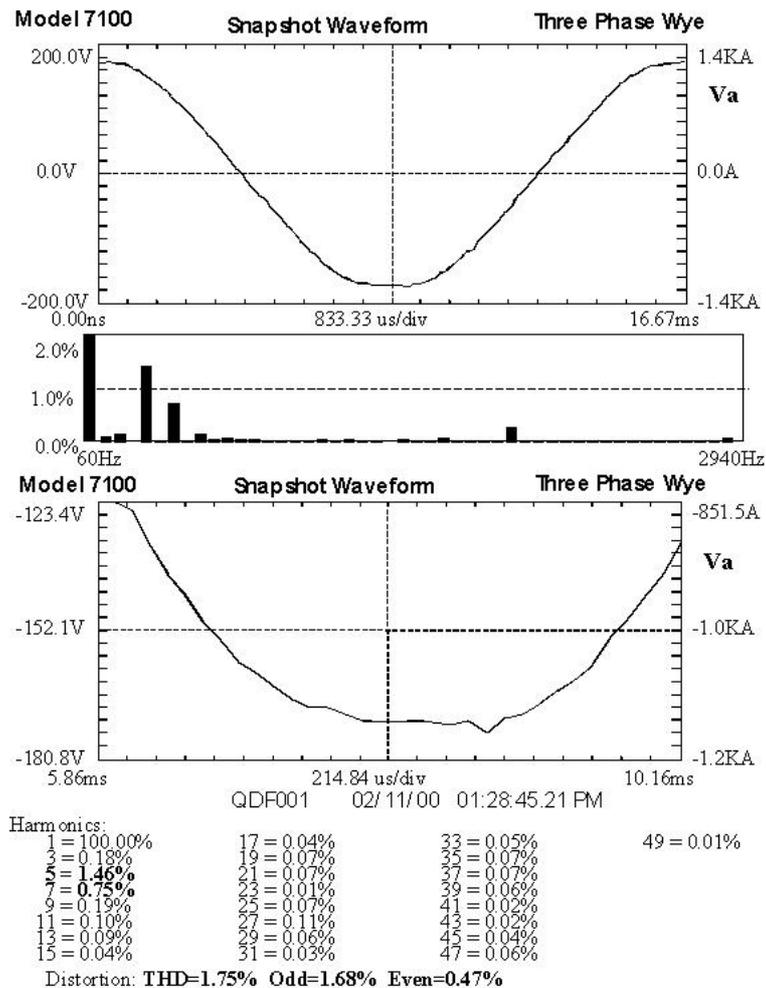


Figura 4.35: Distorção Harmônica da Tensão Va -QDF001

O valor total da distorção harmônica da tensão Va é igual à 1,75% (ímpar=1,68%,par=0,47%) com maior destaque para a quinta e sétima harmônicas.

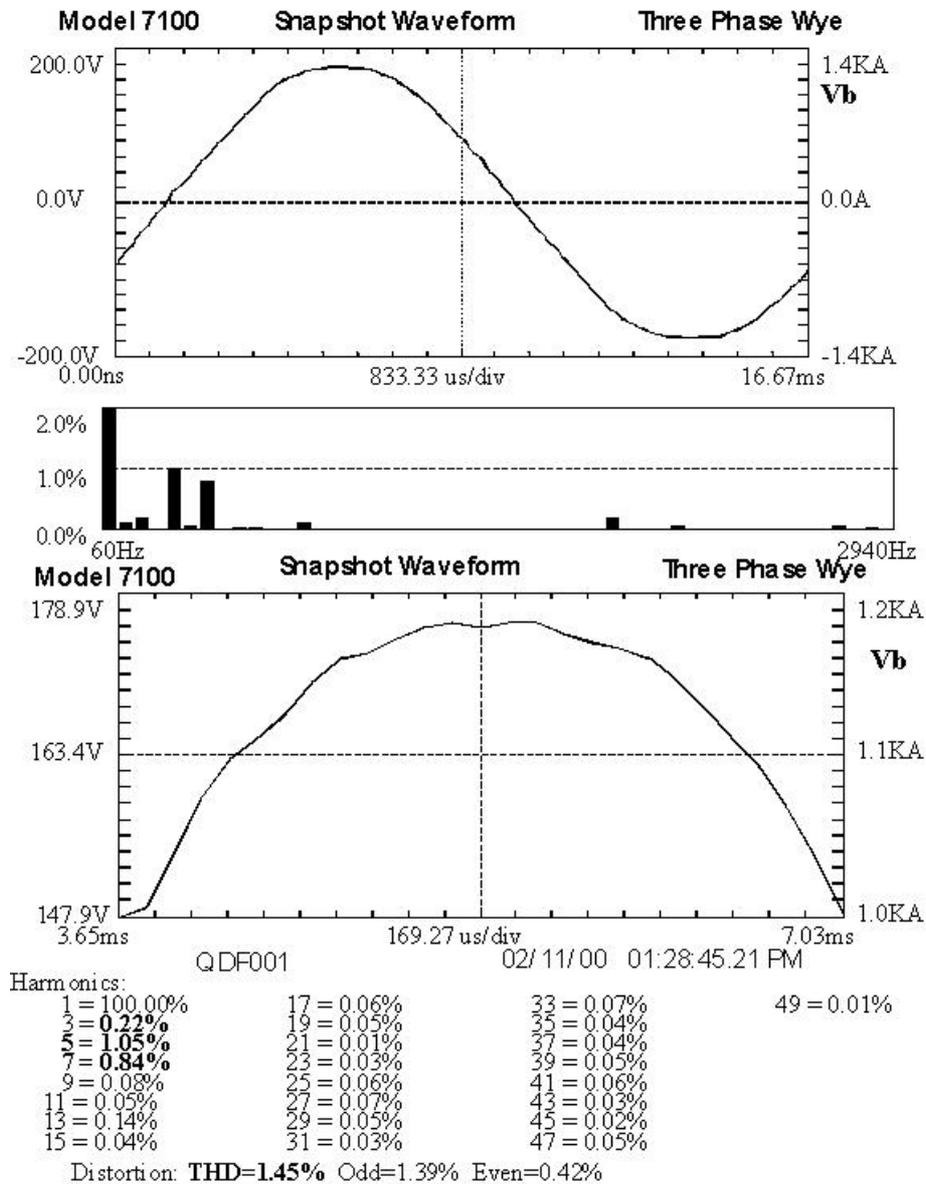


Figura 4.36: Distorção Harmônica da Tensão Vb - QDF001

A tensão Vb apresentou uma distorção total de tensão (DHT) igual à 1,45%, sendo a quinta e sétima harmônicas as maiores como aconteceu com Va.

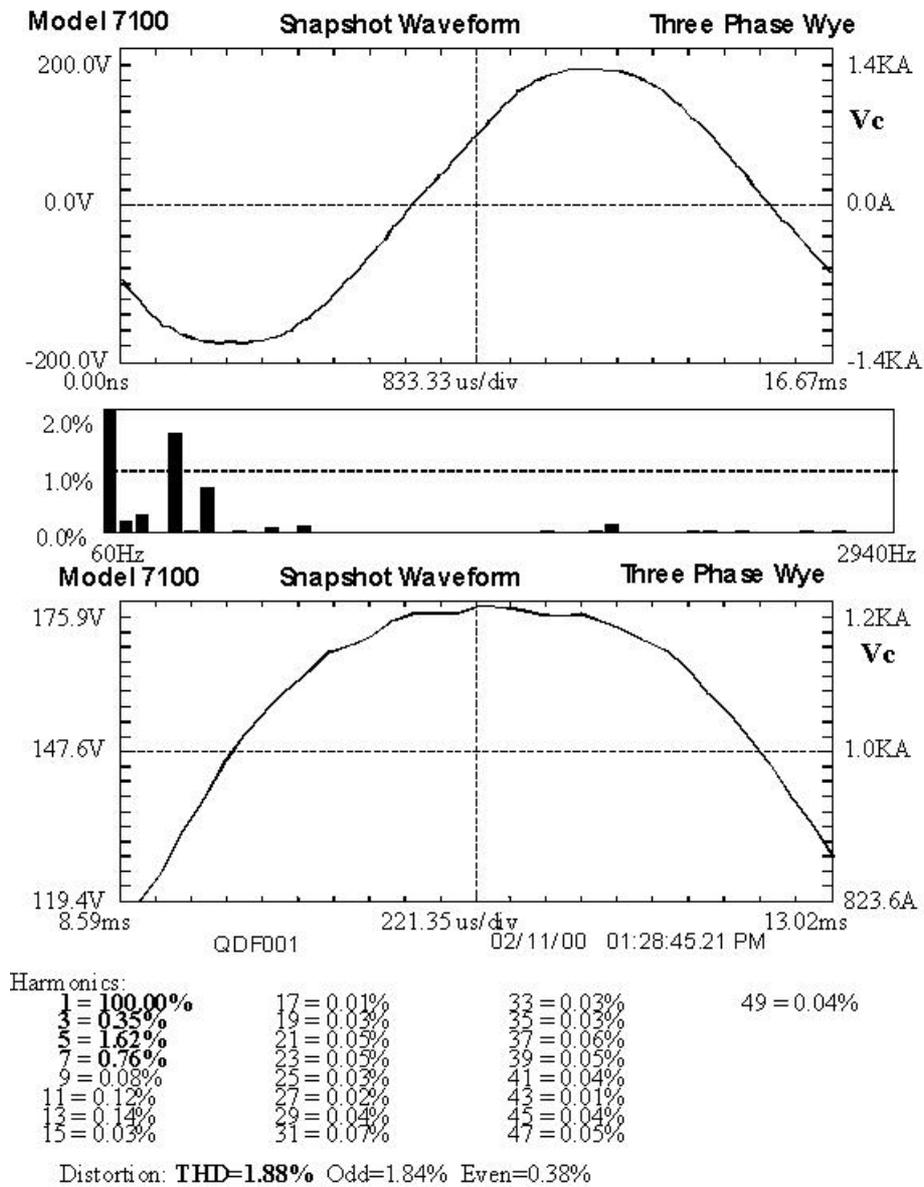


Figura 4.37: Distorção Harmônica da Tensão Vc - QDF001

A tensão Vc apresentou DHT=1,88% (ímpar=1,84%,par=0,38%) da mesma forma que as demais as maiores são quinta e sétima harmônicas.

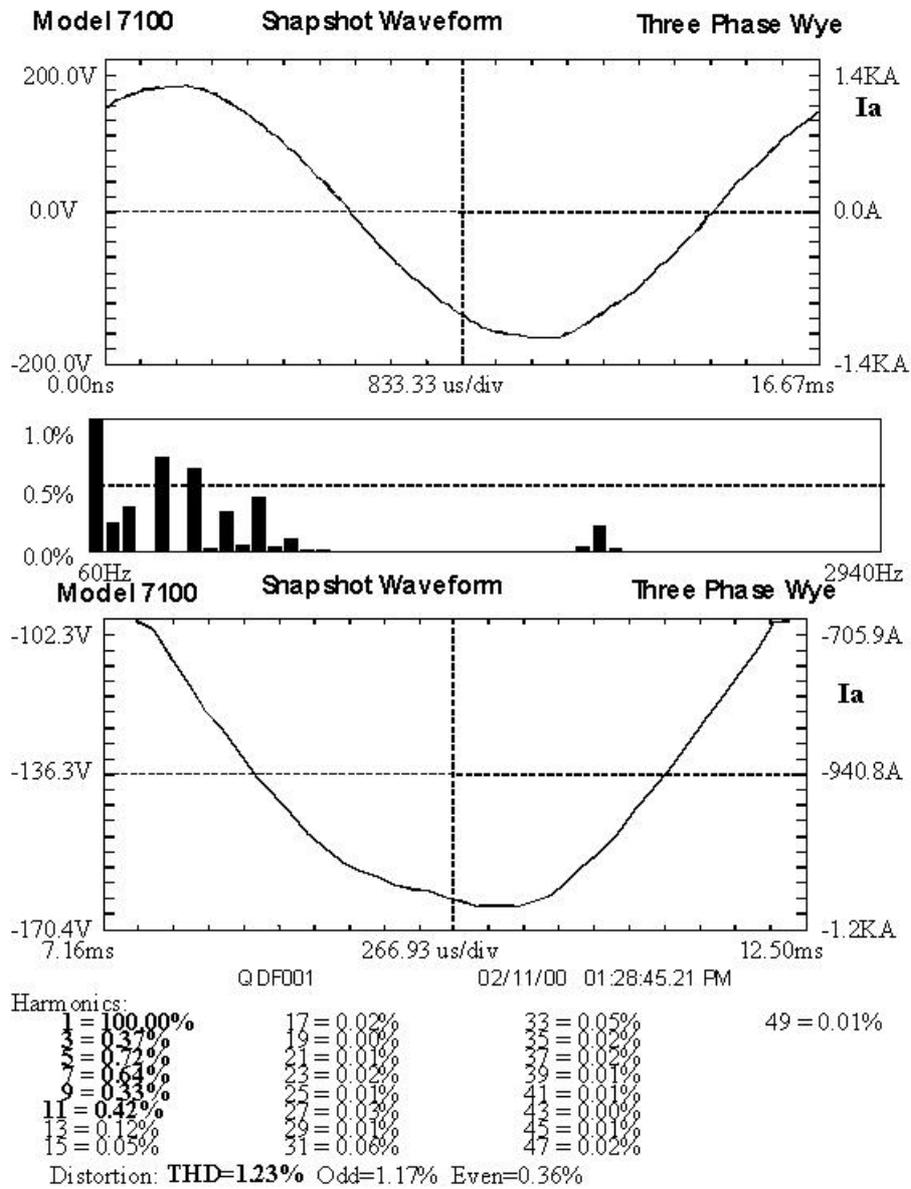


Figura 4.38: Distorção Harmônica da Corrente Ia - QDF001

Verifica-se que a distorção de demanda total (DDT) está abaixo do proposto pela tabela 3.3 da IEEE (IEEE519 1996) que indica que este valor deve ser menor que 12% na condição de $\frac{I_{sc}}{I_L}=50-100$.

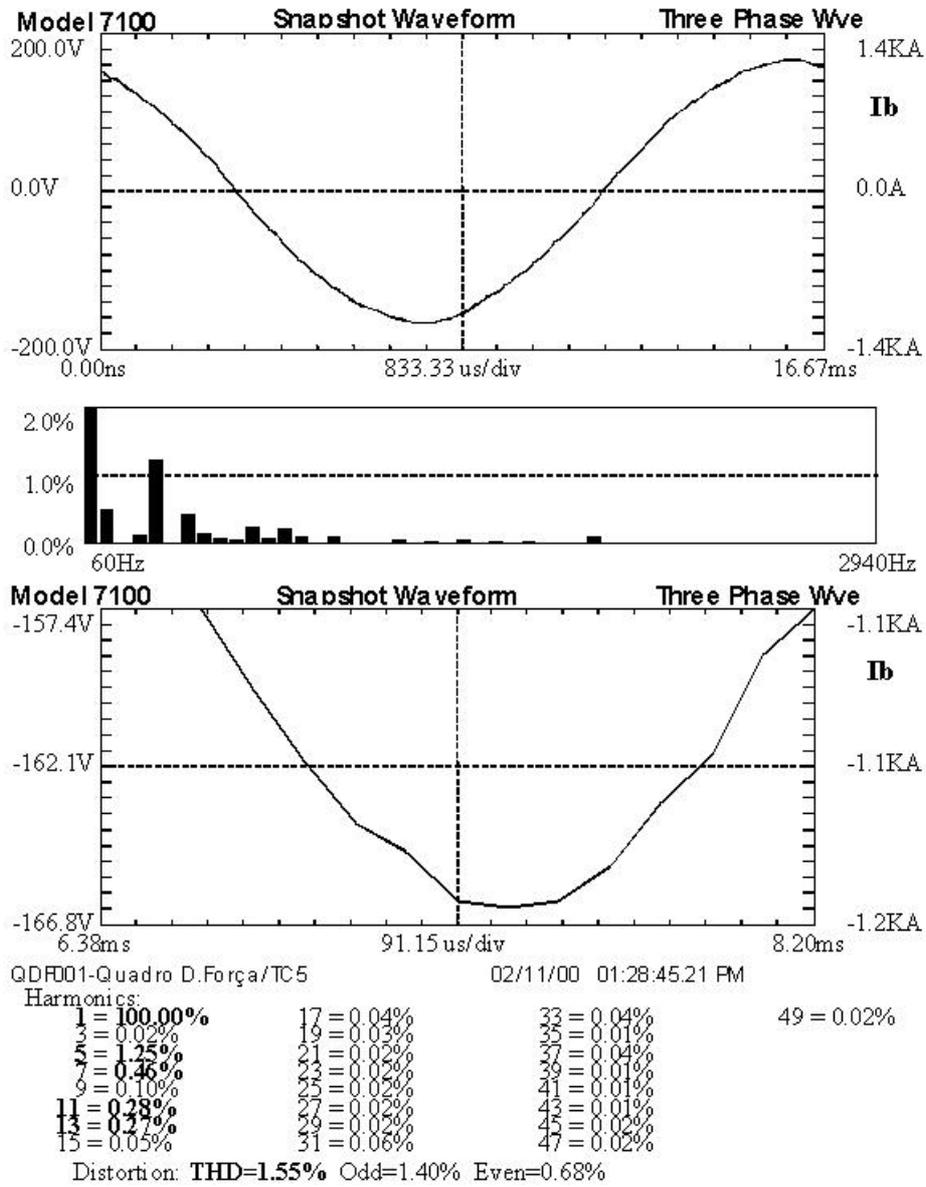


Figura 4.39: Distorção Harmônica da Corrente Ib - QDF001

Como ocorreu com a corrente Ia, as componentes de quinta e sétima harmônicas são as de maiores valores em relação às demais.

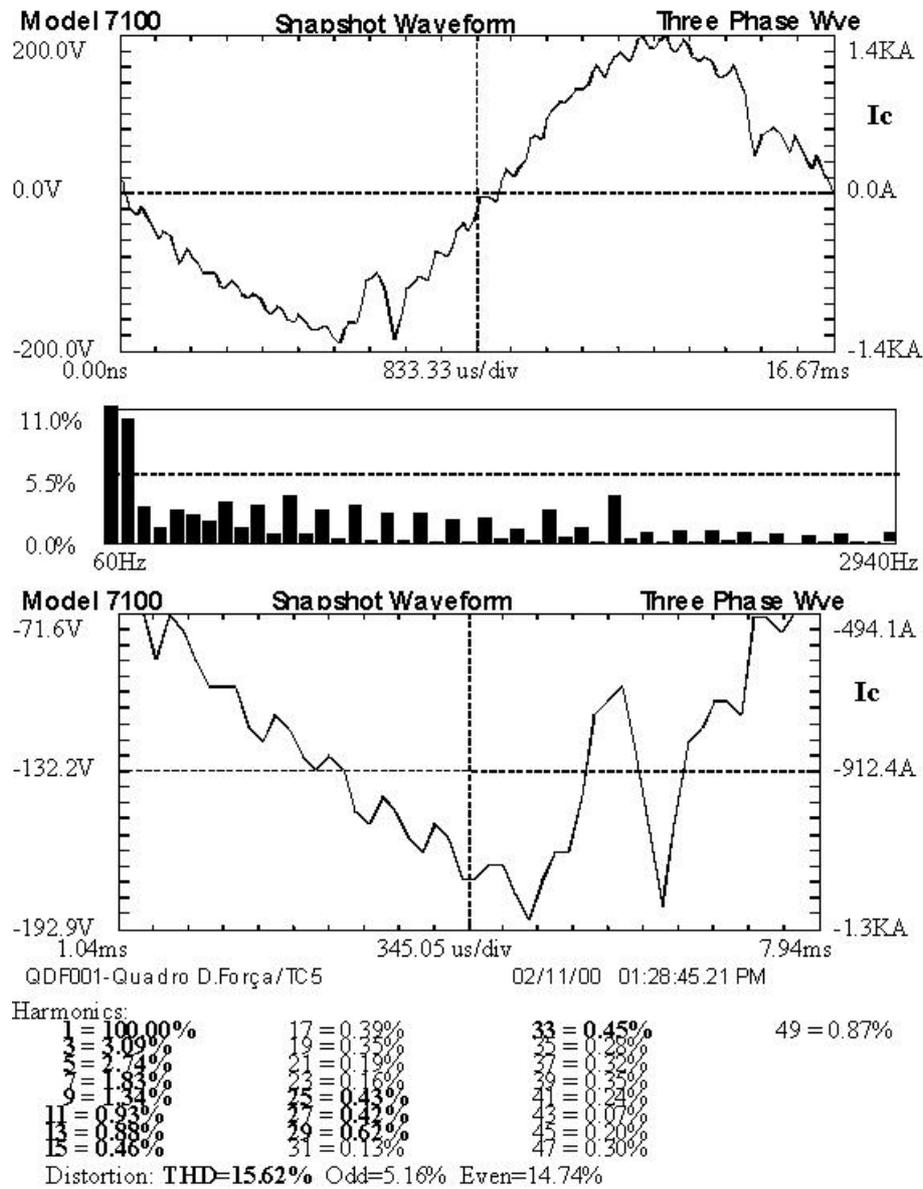
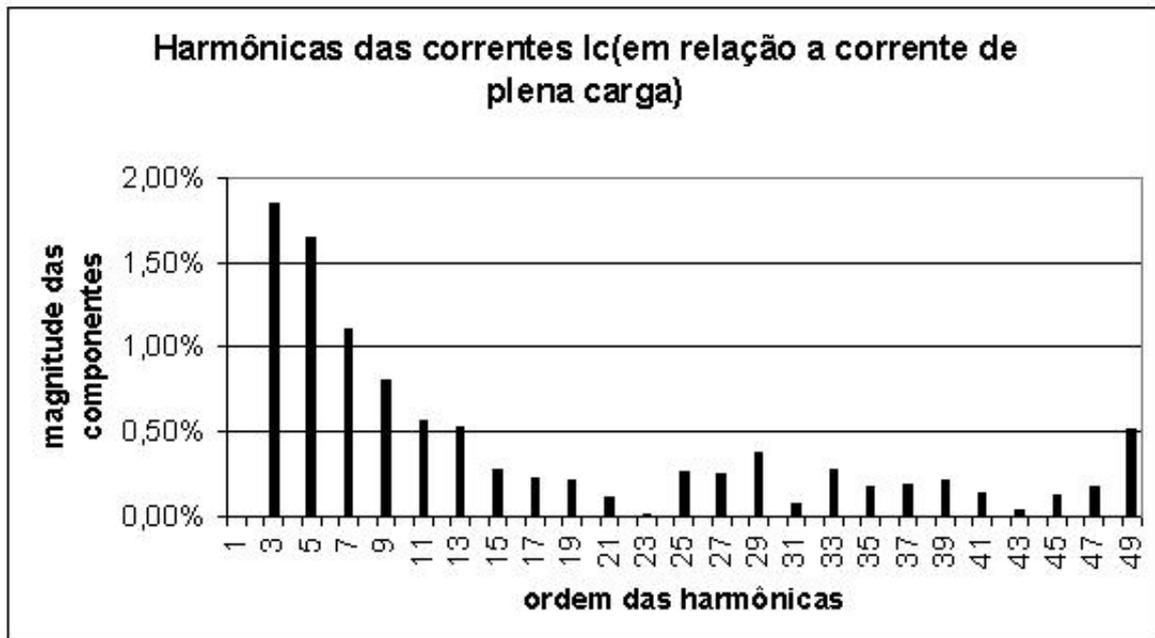


Figura 4.40: Distorção Harmônica da Corrente Ic - QDF001

No caso das correntes verificamos que a condição de maior impacto inicialmente se estabeleceu em relação a Ic pelo fato de apresentar DDT=15,62% (ímpar=5,16% e par=14,74%).



TDD=9,4% ímpar=3,1% par=8,8%

Obs: correção do gráfico SnapIc(QDF001)

Figura 4.41: Distorção Harmônica da Corrente I_c -corrigida

Devido à correção, ou seja, ajustou-se os valores da tabela que aparece na figura 4.40 na condição do transformador estar funcionando a plena carga, o que resultou em um DDT=9,4% (ímpar=3,1% e par=8,8%) e valores individuais das harmônicas de I_c conforme mostra a figura, não excedendo a nenhum dos dados indicados na tab.3.3, considerando a relação I_{cc}/I_L na faixa de 50-100 para tensão nominal $V_n \leq 69$ kV da recomendação da IEEE (IEEE519 1996), mas não se pode ignorar que os valores relativos das harmônicas são altos na condição de operação do transformador com 60% da sua capacidade a plena carga. Um fato que deve ser avaliado com bastante critério se refere a esta injeção de corrente que poderá causar uma distorção na tensão do sistema de alimentação da concessionária.

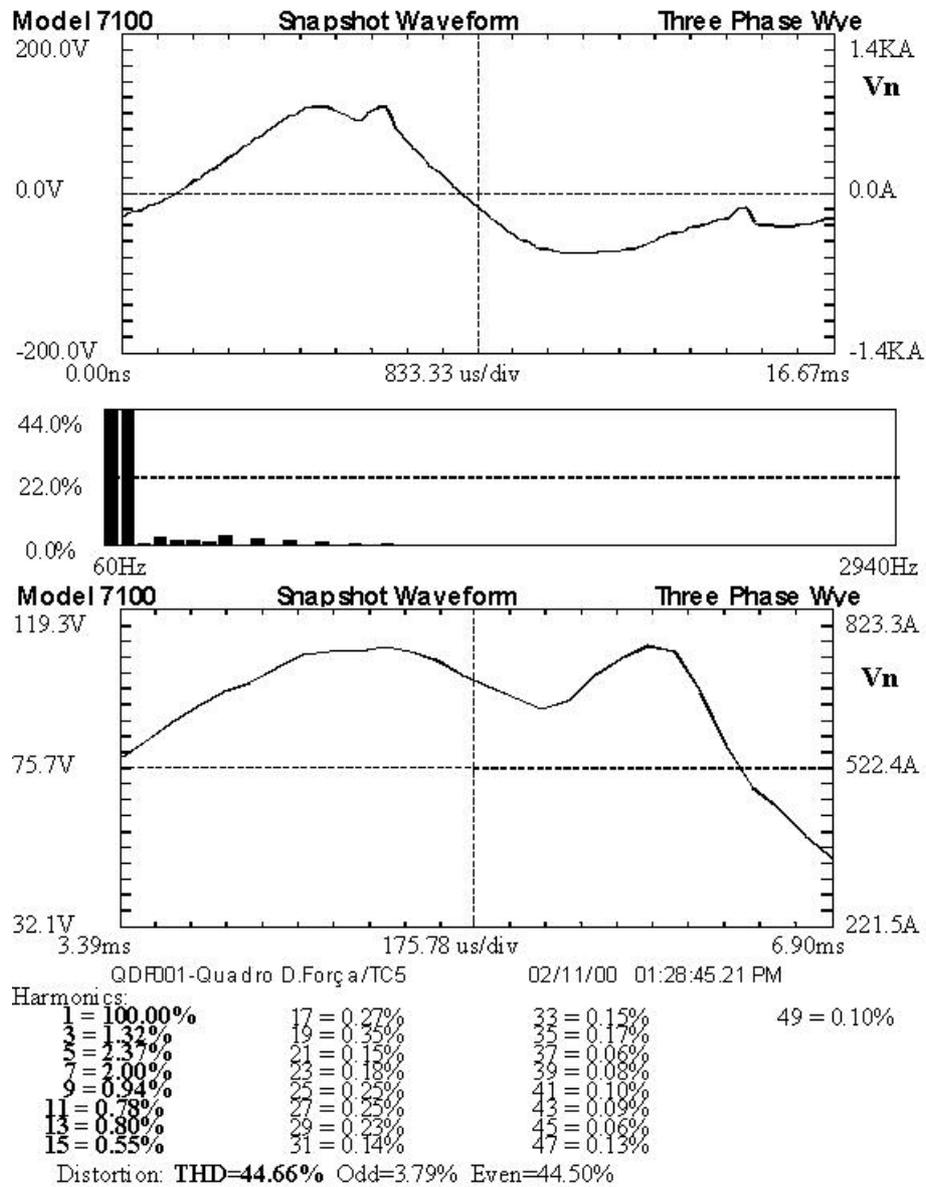


Figura 4.42: Distorção Harmônica da Tensão Vn

Observa-se que neste caso, que a componente de segunda harmônica representa a totalidade do espectro conforme mostra o gráfico da figura.

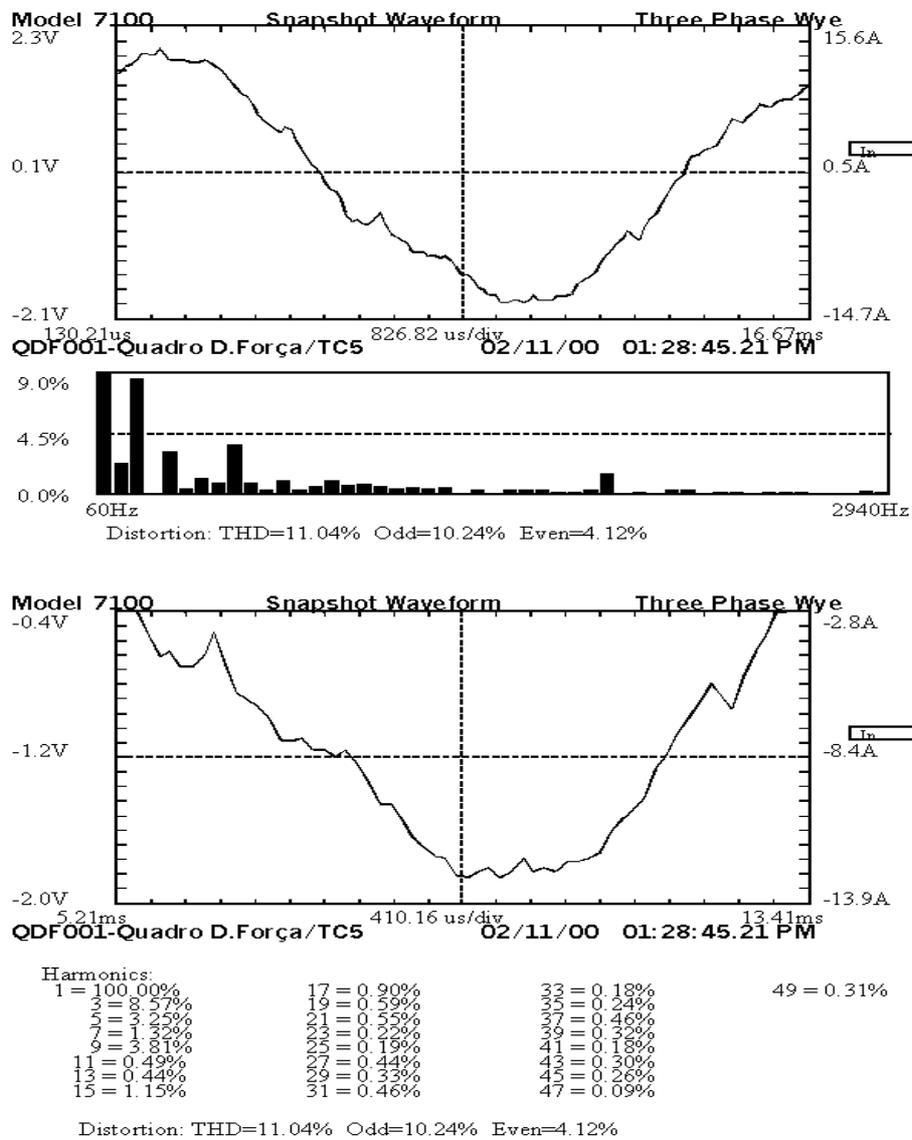


Figura 4.43: Distorção Harmônica da Corrente In

Em se tratando da corrente de neutro, o espectro apresentado indica que a segunda, terceira, quinta, nona e trigésima segunda são as componentes harmônicas de maiores valores.

4.12 Monitoramento dos Gráficos de Tensão e Corrente - QDF001

Através dos gráficos que serão apresentados, pode-se avaliar as variações das tensões e correntes devido as operações das cargas, assim como também avaliar a suportabilidade do sistema elétrico em relação aos impactos resultantes do funcionamento destes equipamentos.

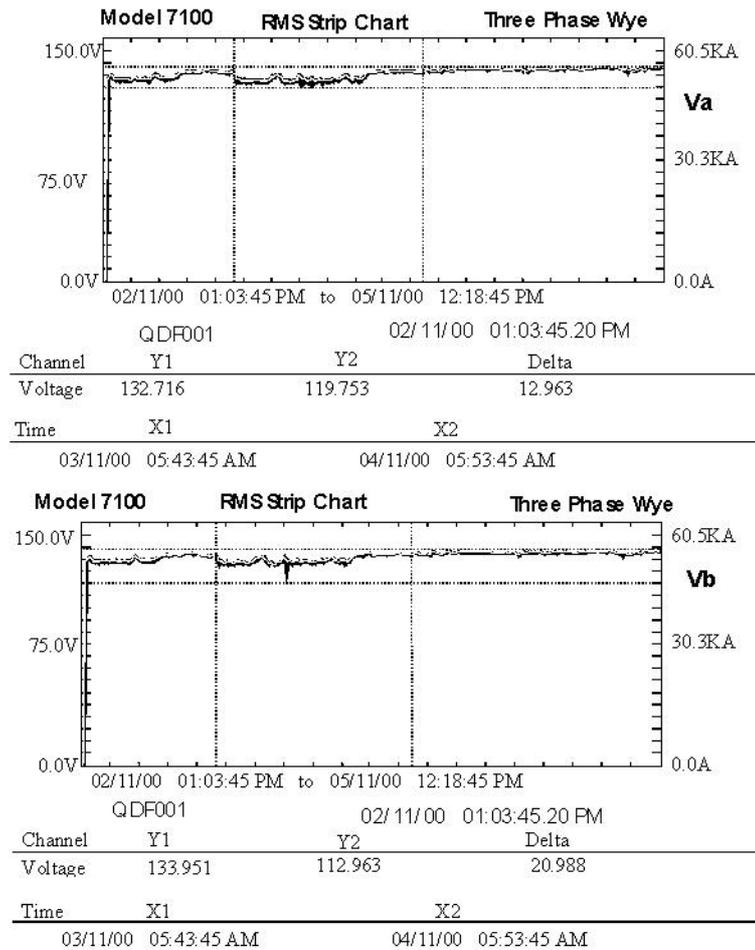


Figura 4.44: Variações das Tensões Va e Vb - QDF001

Os períodos de funcionamento da fábrica são bastante distintos, ou seja, primeiro e segundo turnos operando com os valores de suas tensões bem próximo à 207V (-5,9%), enquanto que no terceiro turno os seus valores estão perto de 232V (5,5%).

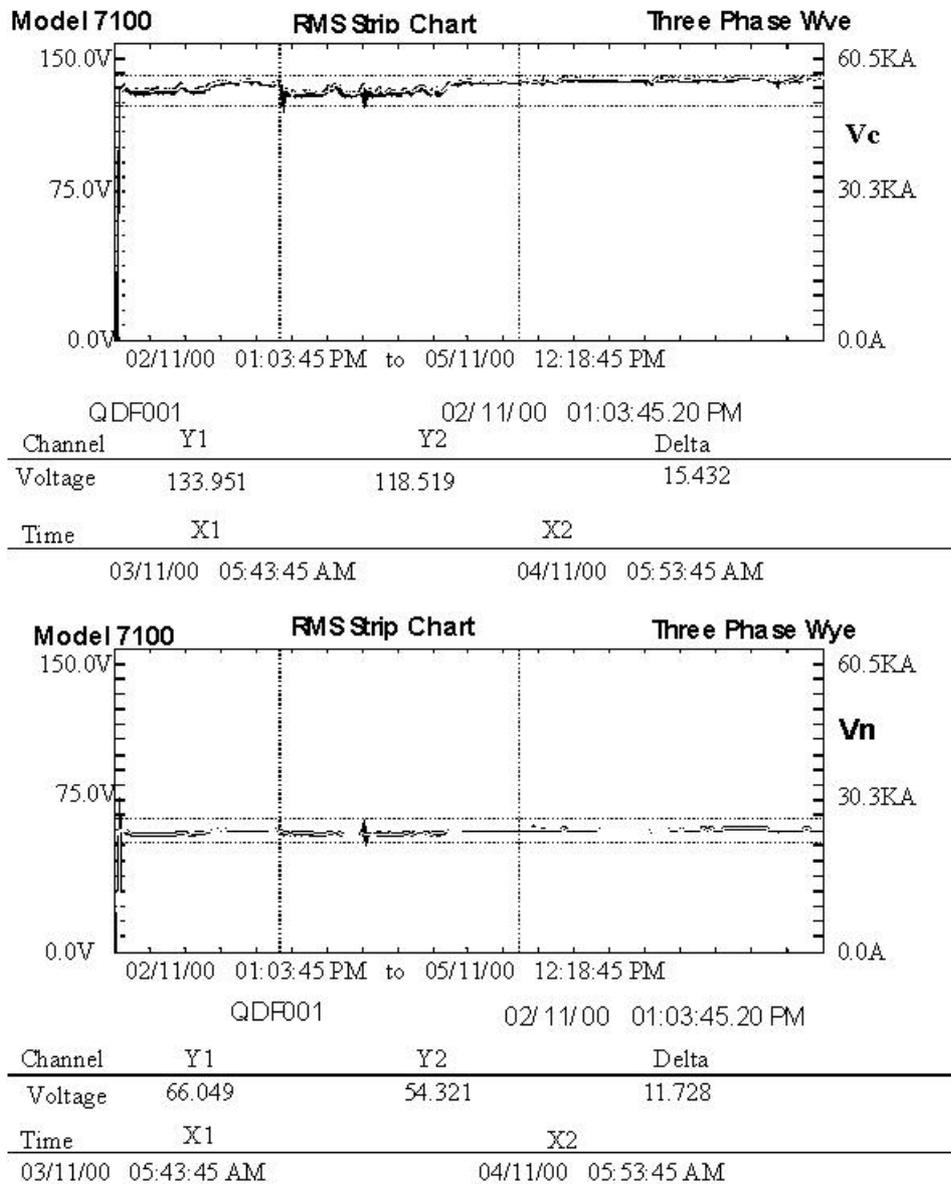


Figura 4.45: Variações das Tensões Vc e Vn - QDF001

O valor eficaz da tensão Vn é igual 66V, isto é, tensão medida entre o neutro e o terra do sistema em estrela. Visto que ocorre um deslocamento do ponto neutro, o que indica uma assimetria no sistema de energia elétrica, devido ao desbalanço de cargas ou condições de falta.

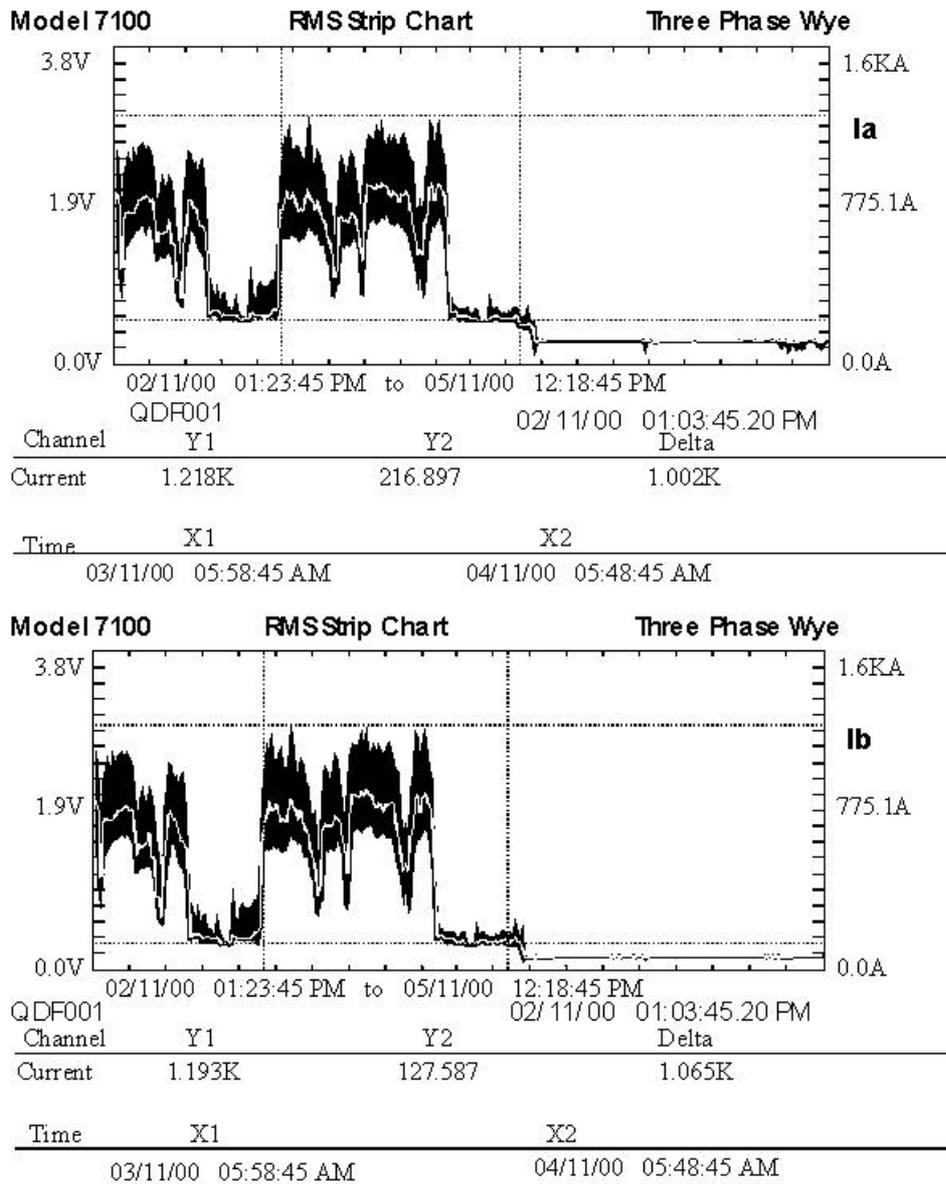


Figura 4.46: Variações das Correntes Ia e Ib - QDF001

Os valores máximos de Ia (1200A) e Ib (1193A) não superaram durante o período de medição, o nominal da corrente do transformador que corresponde a 1312A.

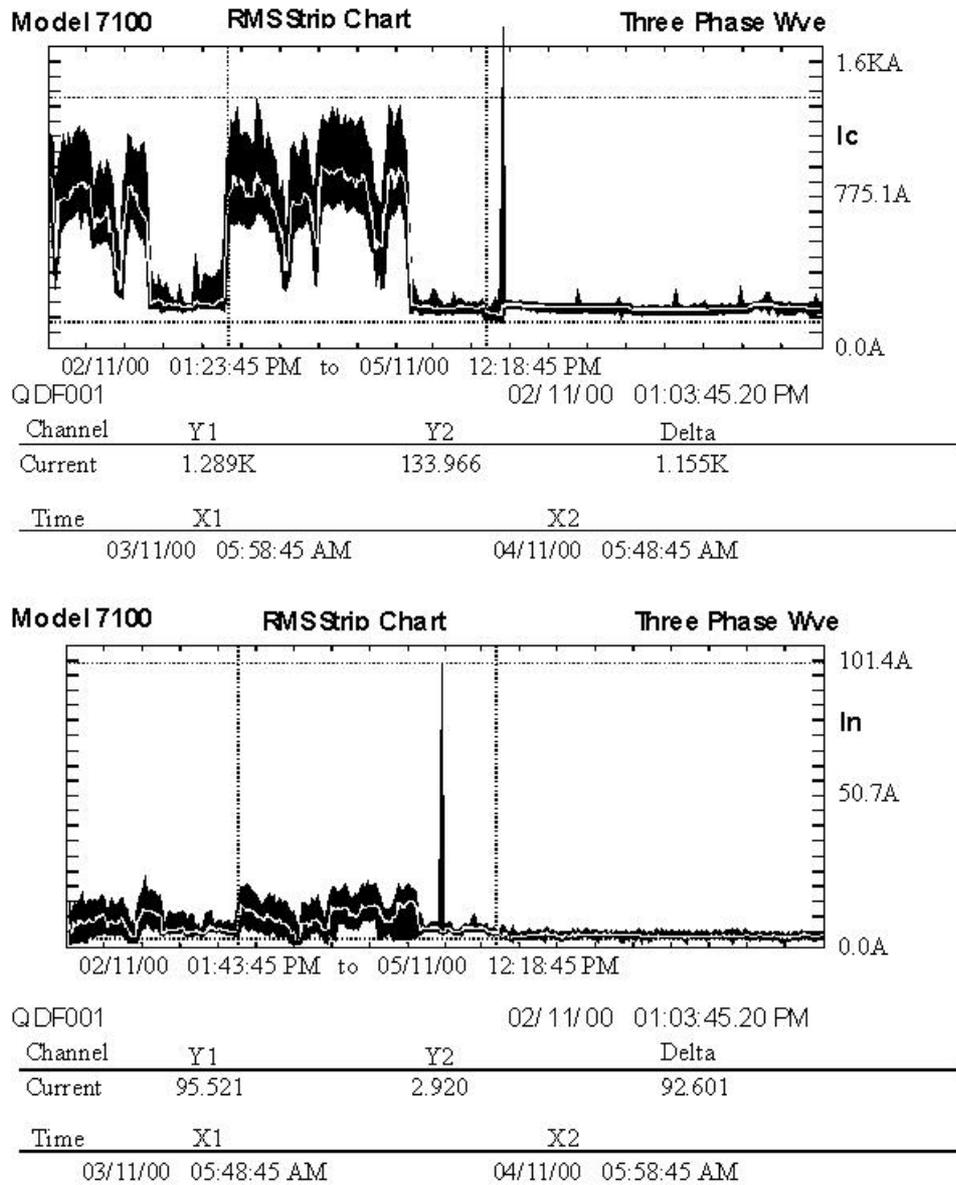


Figura 4.47: Variações das Correntes Ic e In - QDF001

Verifica-se que houve somente um pico da corrente Ic maior que o valor nominal do transformador de 500kVA (BT), que aconteceu por volta das 8hs do dia 4/11/2000, o que poderá ter ocorrido uma falta no sistema de energia elétrica.

4.13 Monitoramento da Potência Aparente Demandada - QDF001

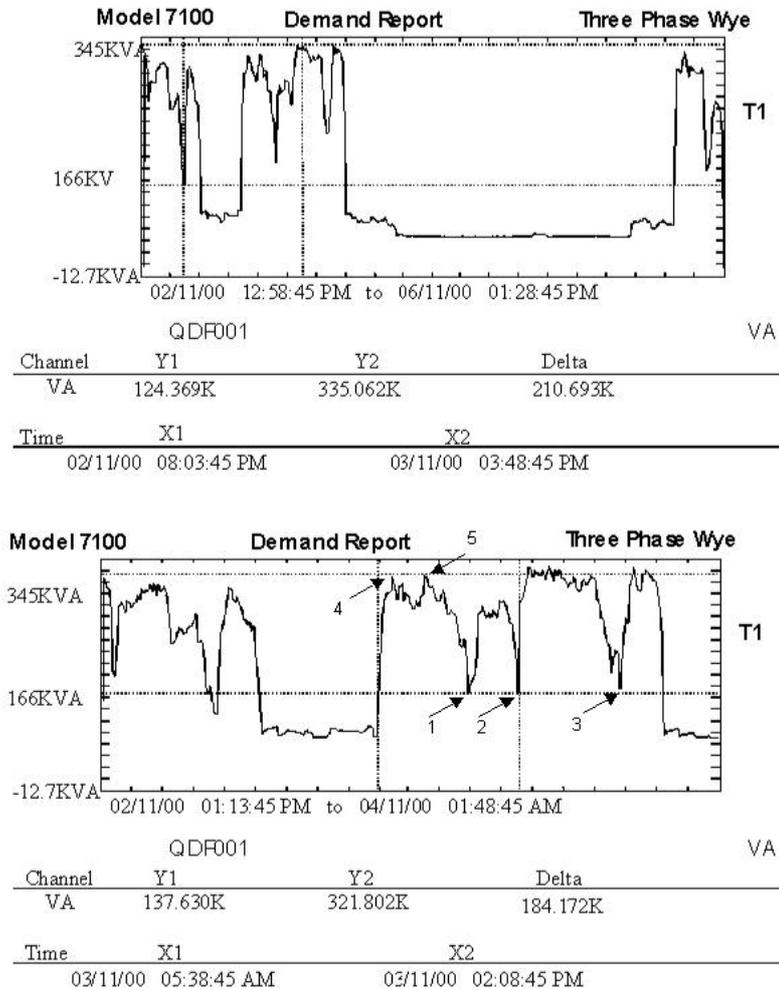


Figura 4.48: Curvas da Potência Aparente Demandada Total (kVA)- QDF001

Pode-se ver que os pontos 1(refeição), 2(troca de turno) e 3(refeição) são pontos críticos, pois são instantes em que ocorrem uma queda da demanda chegando a valores próximos de 138kVA (28%da capacidade nominal), que poderá ser corrigido pela produção.

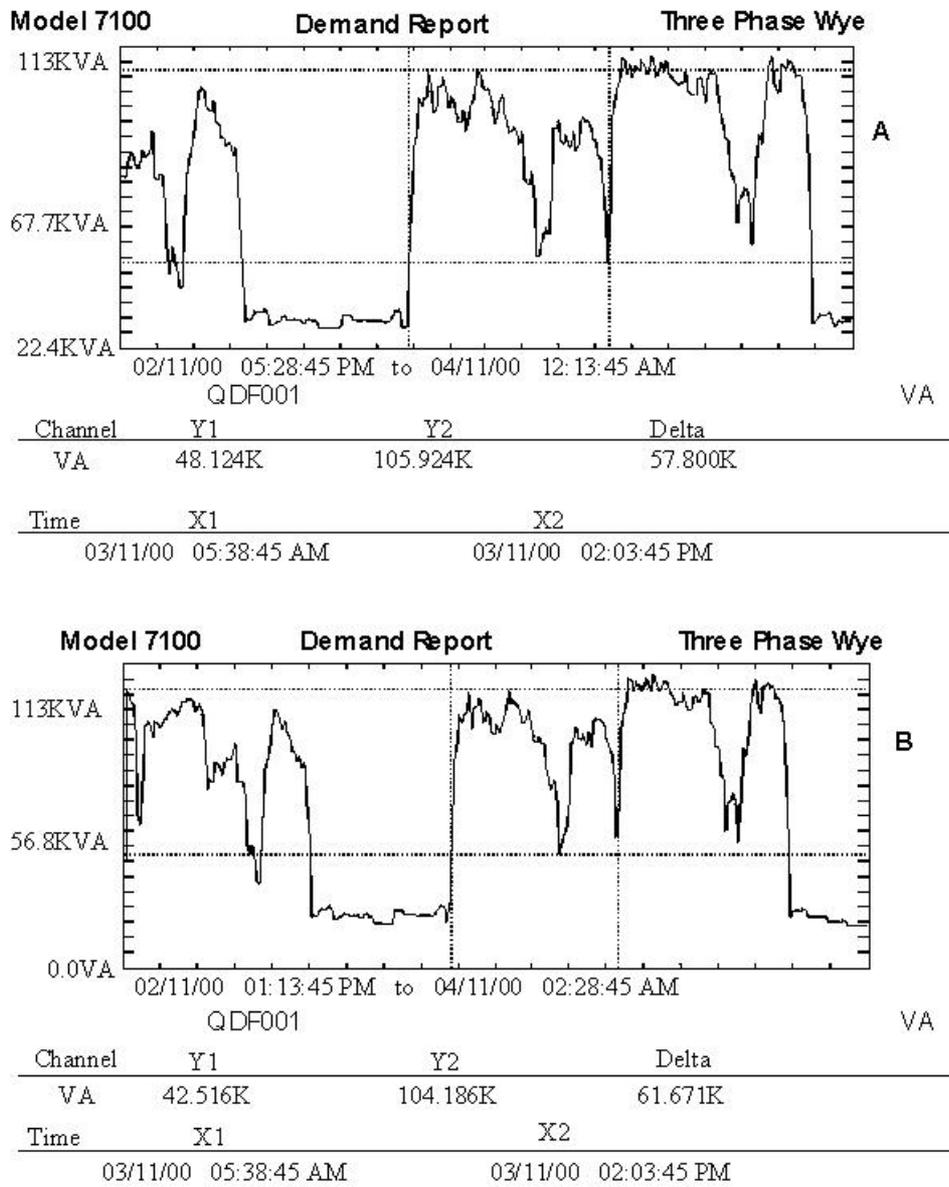


Figura 4.49: Curvas de Potência Aparente Demandada nas Fases A e B - QDF001

Verifica-se que as demandas máximas em kVA nas fases A e B são bem próximas.

O comportamento das potências aparente demandada nas três fases são nitidamente idênticas, conforme pode-se avaliar através dos gráficos 4.49 e 4.50 .

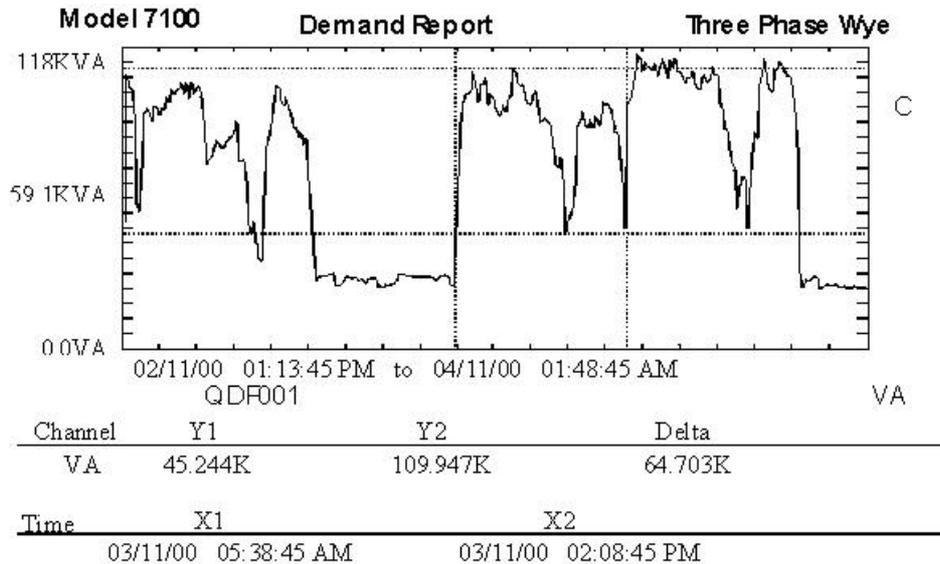


Figura 4.50: Curva de Potência Aparente Demandada na Fase C - QDF001

Através da figura 4.48, verifica-se uma demanda máxima igual 335kVA, o que representa 67% da capacidade nominal do transformador, sendo que esta condição aconteceu nos pontos 4 e 5 assinalados durante um período de aproximadamente 9 horas de funcionamento, entretanto, no período seguinte a demanda se estabilizou a valores bem próximos da demanda máxima. Observa-se que o comportamento das cargas são acentuadamente irregulares com a presença de elevado número de picos em intervalos de tempo consideravelmente pequenos.

Os instantes 1 e 3 são reservados para alimentação dos funcionários, disponibilizando um intervalo de tempo maior para as refeições de todos os funcionários mantendo em funcionamento as máquinas de maior potência, cuidando evidentemente que a seqüência da produção não seja prejudicada. O ponto 2 é o período para troca do turno, neste caso poder-se-ia se fazer uma experiência para se colocar em prática uma mudança de turno parcial, de forma a manter as máquinas de maior potência em funcionamento.

4.14 Máquina de Solda Soltronic MSM 132

Na verdade foram monitorados vários equipamentos da produção, tais como: Abadeira, Agrafadeira, Alargadora de Tubos, Compressor, Prensa, Recravador Comas e Máquina BLM, o que garante um perfil bastante eficiente a respeito do comportamento peculiar de cada máquina. Deixou-se de mostrar estes gráficos neste trabalho, mas foram observados, na busca de se identificar as causas das distorções ocorridas neste sistema industrial.

DADOS OBTIDOS COM O INSTRUMENTO NANOVIP:

Estas medições foram obtidas através das chaves seccionadoras que alimentam as máquinas de solda.

Tensão[V]: 214 - 215
Corrente[A]: 15,7 - 19,6 $I_{max}[A]=19,6$
Potência ativa trifásica[kW]: 5,9 - 7,0 $P_{max}[kW]=7,0$
Fator de potência: 0,94 - 0,97
Potência reativa[kVAr]: 1,6 - 2,9
Potência aparente[kVA]: 4,9 - 7,6
Frequência[Hz] : 59,9 - 60

DADOS DE PLACA:

Fabricante: Soltronic Equipamentos de Solda Ltda
n.o=06.0337
Potência[kVA] : 9
Primário[V]: 220 secundário[A]: 300
Ligação do primário: delta ou estrela
Ligação do secundário: delta

PARTES COMPONENTES:

Cada máquina de solda é composta por um transformador trifásico cujo primário pode ser conectado em estrela ou delta e o secundário em delta, um conversor ca-cc, e a unidade de solda propriamente dita que é alimentada pelo conversor em corrente contínua.

REGULAGEM BÁSICA DA SOLDA:

- 1) Ligação primária em Y (estrela) ou Δ (delta), posição "0" máquina desligada; posição "Y" tensão de solda regulável entre 8 e 15V; posição "D" tensão de solda regulável entre 15 e 30V.
- 2) Ligação Y (estrela) para solda de chapas finas e na ligação Δ para solda de chapas médias ou grossas.
- 3) A tensão de solda pode ser regulada através das chaves fraco-forte, observando que a tensão de solda deverá ser mais alta ou mais baixa de acordo com a espessura da chapa a ser soldada bem como com a largura do cordão de solda.
- 4) Regular o avanço do arame-eletrodo de tal maneira que se obtenha um arco constante e praticamente silencioso.
- 5) A posição da pistola de solda durante a soldagem deverá ser de maneira tal, que o soldador possa ver o arco voltaico e o arame-eletrodo, e ainda que o bico difusor de gás da pistola de solda esteja aproximadamente a 12mm da peça a ser soldada.

COMENTÁRIOS SOBRE AS MEDIÇÕES:

Durante o processo de solda das peças, ocorrem várias paradas para acerto das peças no dispositivo, troca de peças e conferência das peças no gabarito. Durante estas paralisações a máquina permanece energizada na posição delta o que significa uma potência aproximada de 60W com fator de potência igual a 0,5 (capacitivo). Uma vez que nesta indústria pode haver até 100 máquinas de solda em operação simultânea, pode ocorrer uma demanda de até 6000W sem que as máquinas de solda estejam realizando o trabalho de soldagem.

4.15 Monitoramento das Distorções na Forma de Onda da Máquina de Solda Soltronic

O propósito é observar o comportamento de um equipamento de solda, para que se possa traçar um perfil bem próximo da realidade, de forma a levantar os impactos desta carga sobre o sistema de energia elétrica da fábrica.

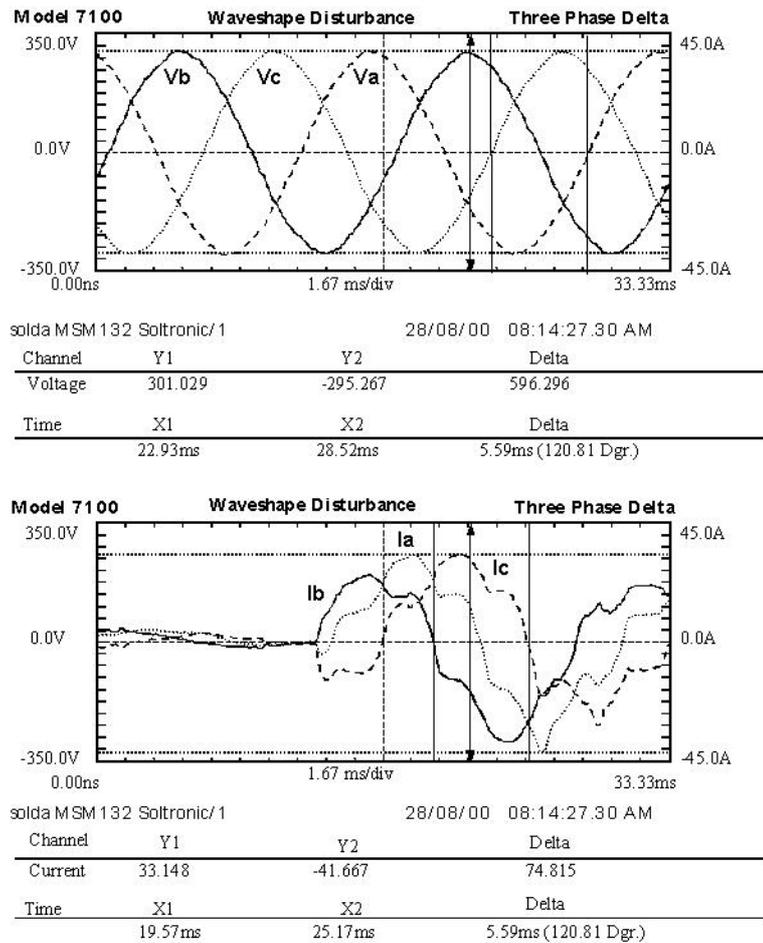


Figura 4.51: Forma de Ondas da tensão e corrente na Máquina de Solda Soltronic

As correntes apresentam distorções devido ao sistema de controle cc, que nesta instalação, é um equipamento antigo a tiristores ou diodos.

Observa-se um transitório impulsivo das tensões V_a e V_c , enquanto que a amplitude de V_b permanece em zero, gerando um grande desequilíbrio no sistema elétrico.

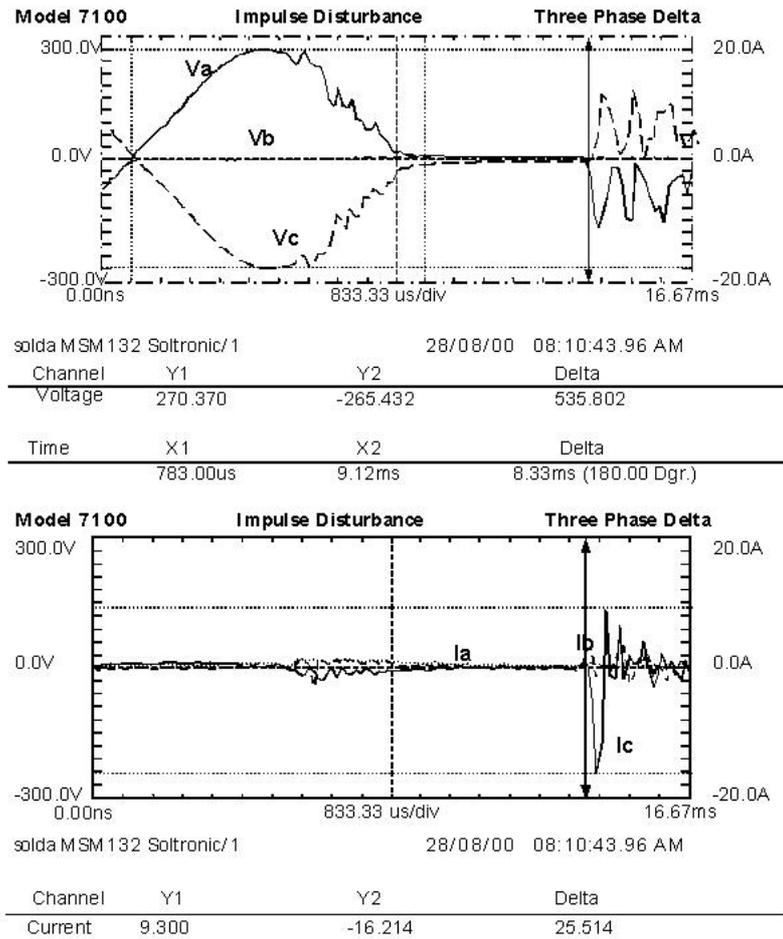


Figura 4.52: Impulsos da Tensão e Corrente na Máquina de Solda Soltronic

Estas medições foram realizadas na chave seccionadora que alimenta exclusivamente esta máquina. Verifica-se que ocorre uma oscilação na amplitude da corrente I_c a níveis elevados quando comparados com as outras correntes, visto que existem aproximadamente 150 máquinas, e considerando que 30 máquinas estejam funcionando de forma idêntica, o reflexo poderá ser expressivo sobre todo o sistema.

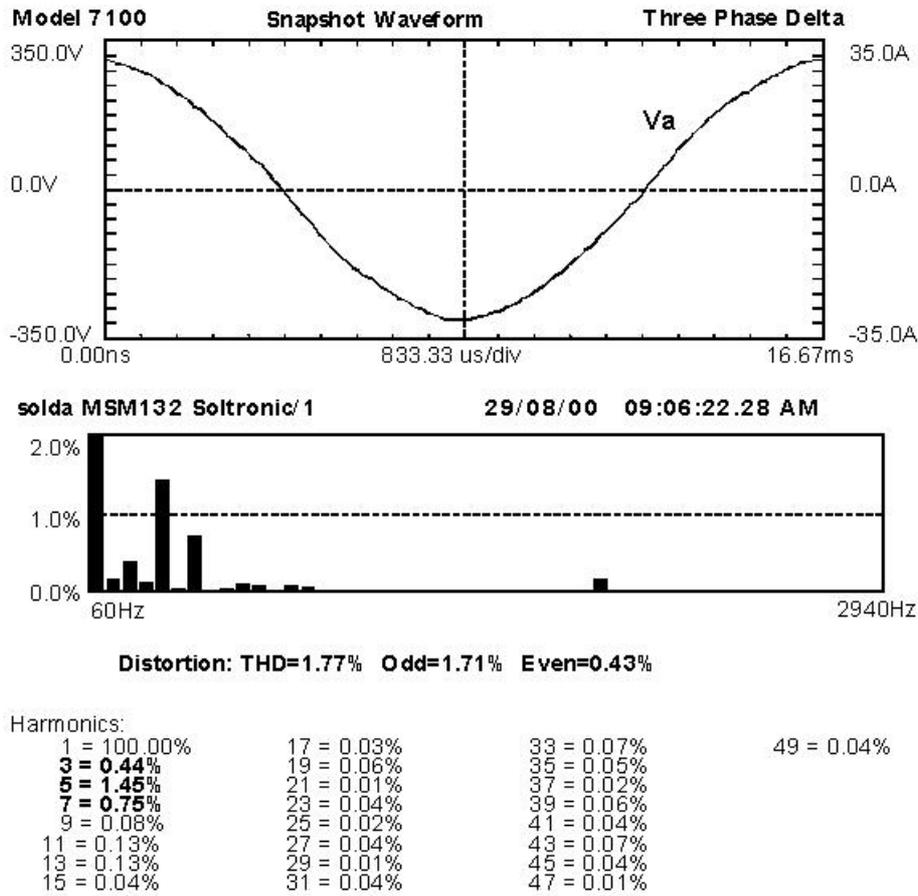


Figura 4.53: Harmônica da Tensão Va na Máquina de Solda Soltronic

As maiores amplitudes são as harmônicas de terceira, quinta e sétima ordens, e no caso das harmônicas pares se destacam a segunda, quarta e trigésima segunda conforme pode ser observado pelo gráfico de barras.

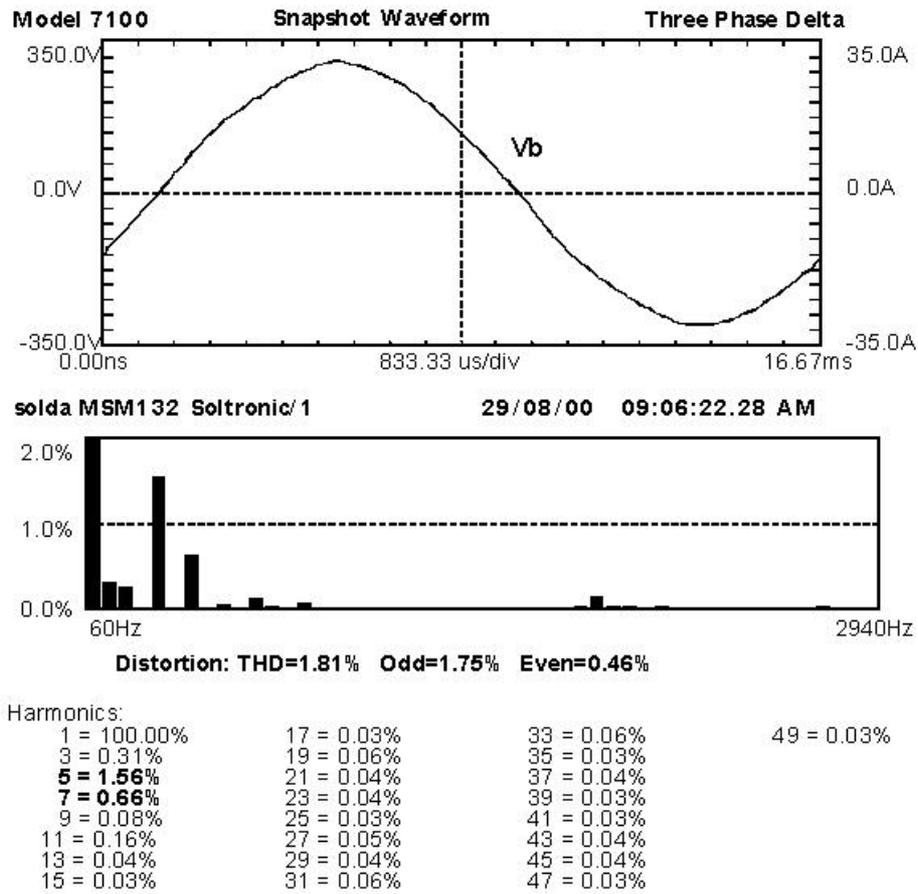


Figura 4.54: Harmônica da Tensão Vb na Máquina de Solda Soltronic

As harmônicas ímpares de maiores amplitudes são respectivamente: quinta, sétima e terceira, no caso das harmônicas pares se destacam a segunda e trigésima segunda.

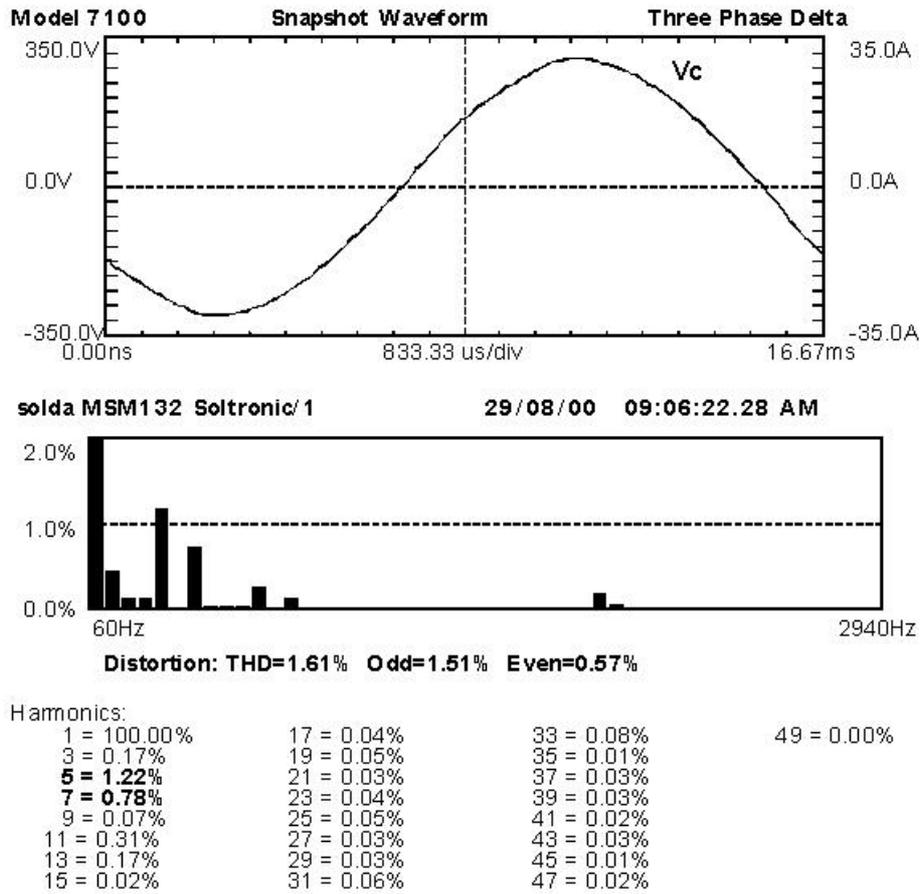


Figura 4.55: Harmônica da Tensão Vc na Máquina de Solda Soltronic

Conforme pode-se ver através da tabela 3.2 tanto no que diz respeito à distorção harmônica individual de tensão como à distorção harmônica total (DHT), os valores obtidos nas três tensões estão abaixo dos recomendados pela tabela. É interessante observar que a componente de trigésima segunda ordem aparece de forma frágil, mas o seu efeito se propagou até no lado de alta tensão (cabine de medição), também tem-se que levar em consideração a existência de uma grande quantidade destas máquinas operando no setor produtivo industrial.

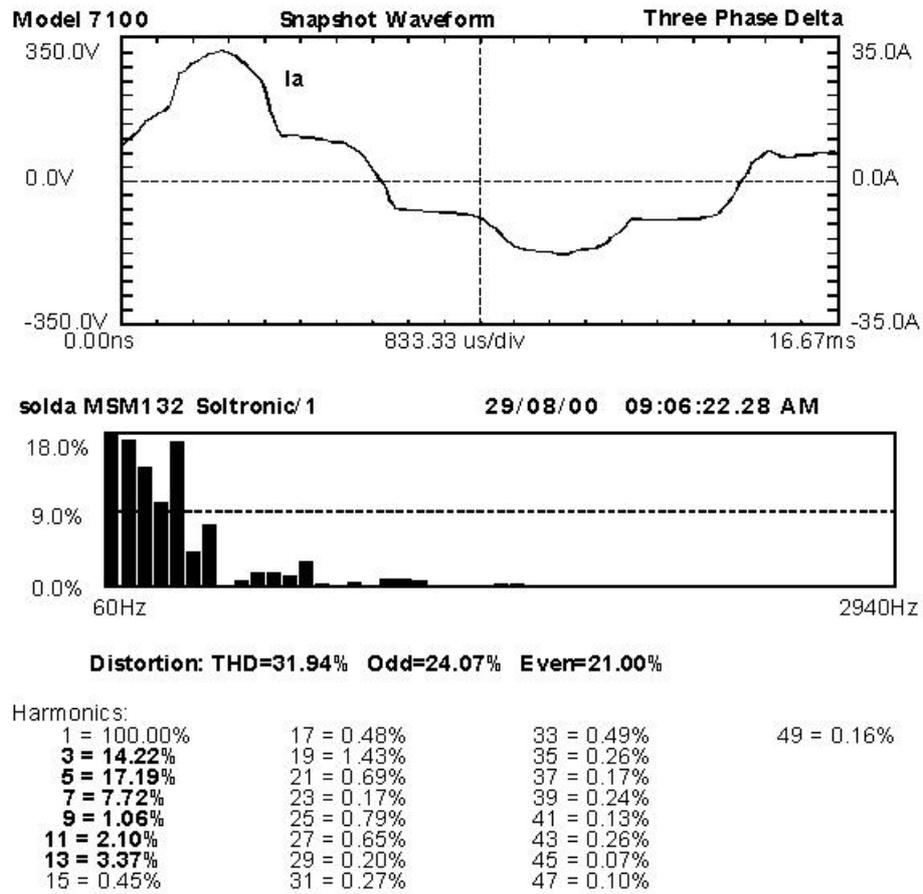


Figura 4.56: Harmônica da Corrente Ia na Máquina de Solda Soltronic

Verifica-se que as maiores amplitudes harmônicas ímpares são respectivamente: quinta, terceira, sétima e décima terceira, e com referência as pares destacam-se: segunda (maior de todas), quarta e sexta.

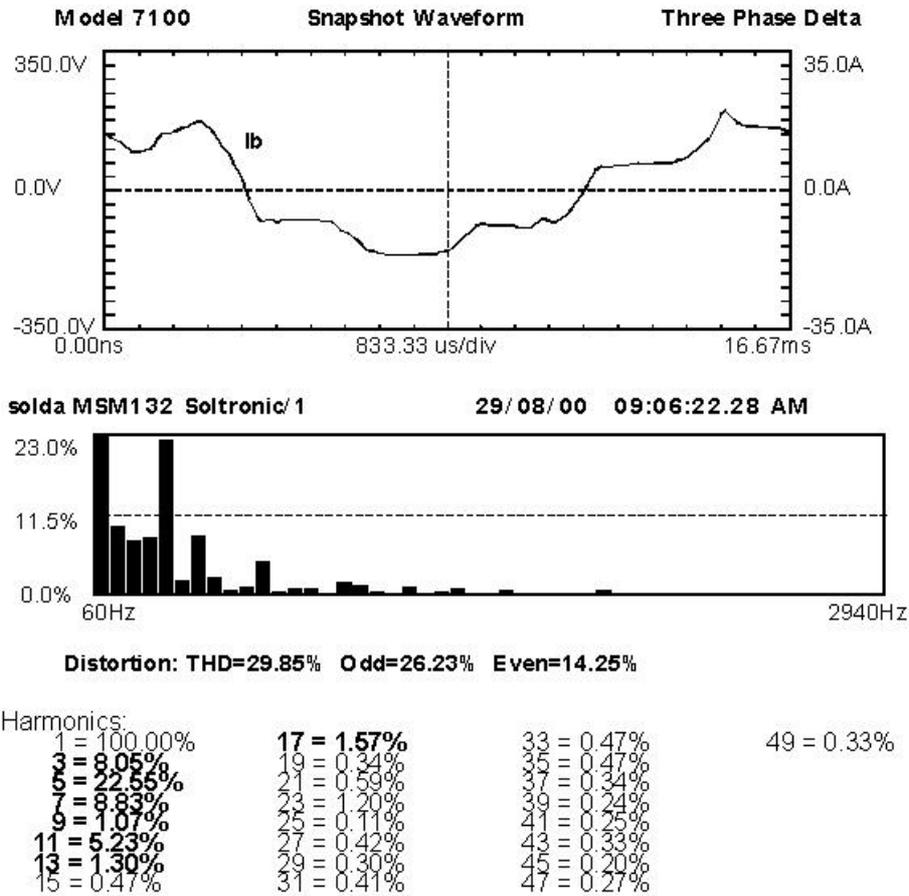


Figura 4.57: Harmônica da Corrente Ib na Máquina de Solda Soltronic

A quinta harmônica é consideravelmente muito superior às demais componentes de Ib, da mesma forma acontece com as harmônicas das correntes Ia e Ic, neste caso torna-se viável a instalação de um filtro sintonizado nesta frequência, o que não descarta a utilização de um filtro ativo para eliminar as demais componentes harmônicas.

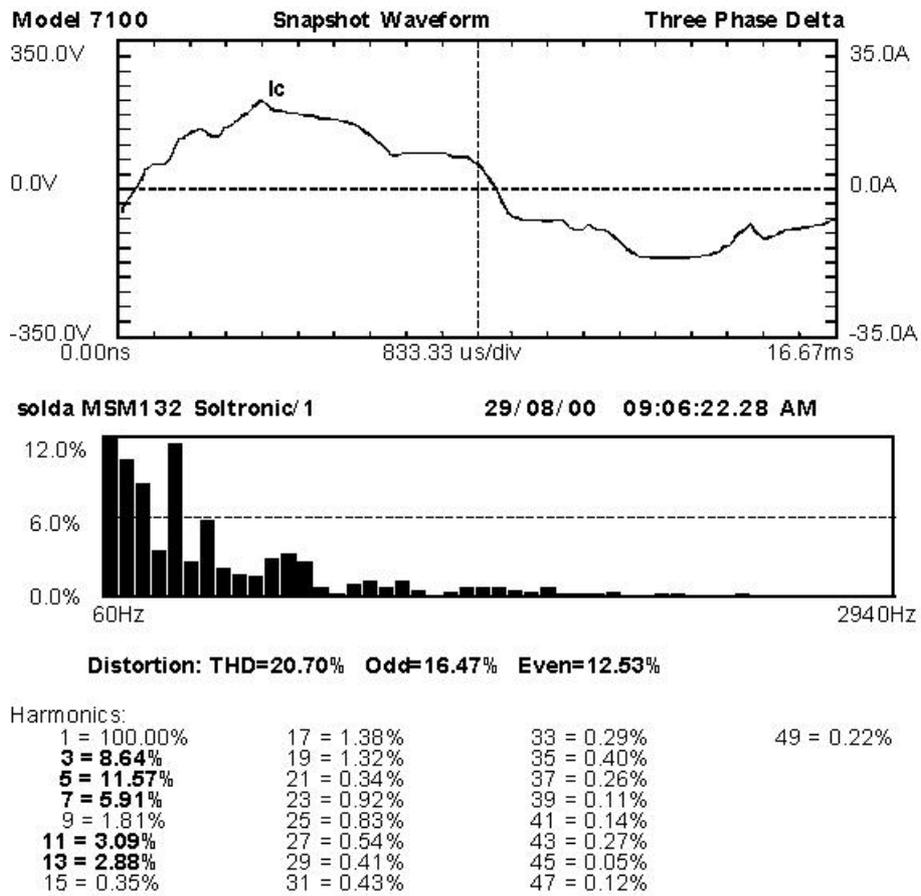


Figura 4.58: Harmônica da Corrente Ic na Máquina de Solda Soltronic

Portanto verifica-se o alto nível de distorções harmônicas de corrente produzido, o que inevitavelmente irá contaminar os barramentos, os transformadores, enfim todo o sistema elétrico sofrerá as conseqüências destas distorções injetadas pelas máquinas de solda.

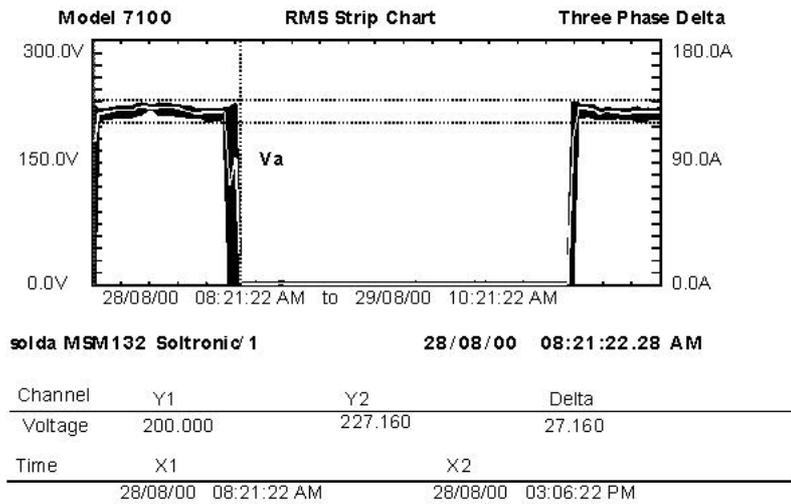


Figura 4.59: Comportamento da Tensão Va na Máquina de Solda Soltronic

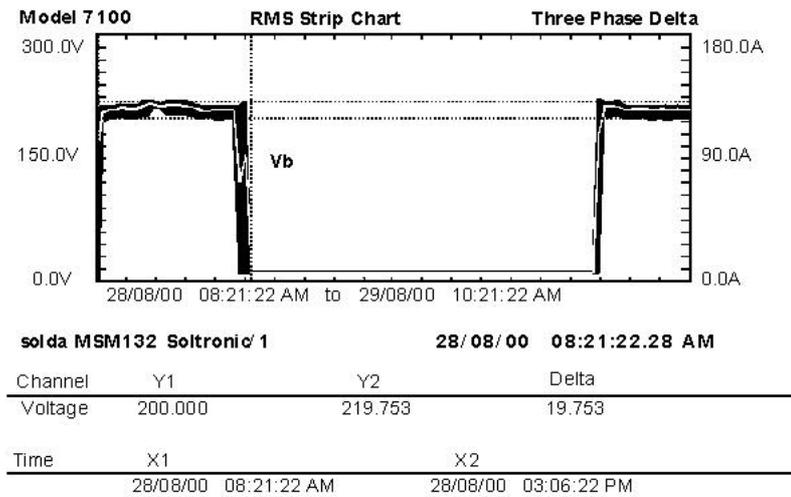


Figura 4.60: Comportamento da Tensão Vb na Máquina de Solda Soltronic

Verifica-se que durante o processo de soldagem ocorre uma variação da tensão em torno de 9%, e é interessante informar que a operação de soldagem ocorre de forma intermitente com períodos curtos.

4.15 Monitoramento das Distorções na Forma de Onda da Máquina de Solda Soltronic

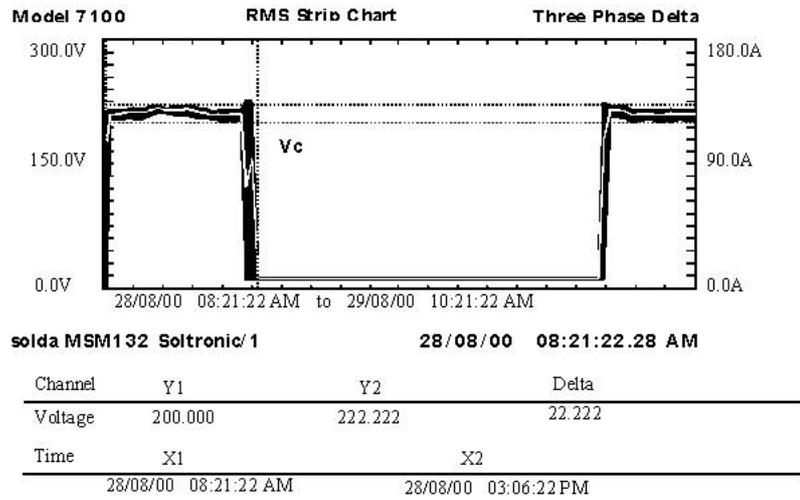


Figura 4.61: Comportamento da Tensão Vc na Máquina de Solda Soltronic

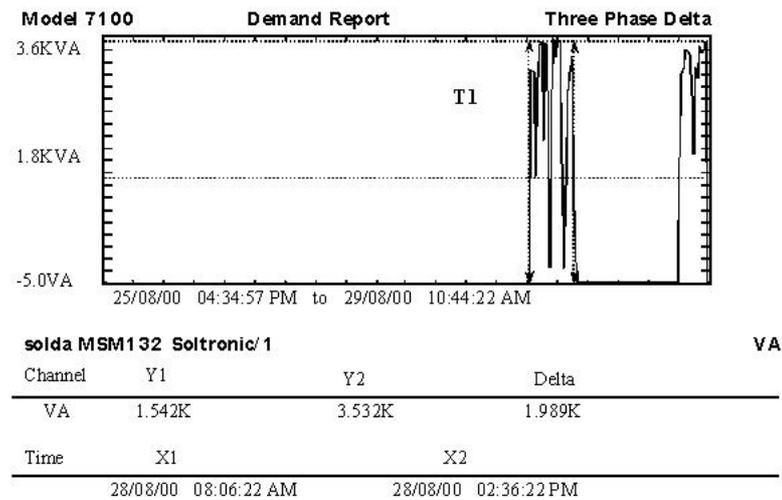


Figura 4.62: Potência Aparente Demandada da Máquina de Solda Soltronic

Tem-se um processo extremamente intermitente em função do tipo de soldagem que é realizado, na qual a potência assume valores máximos e mínimos bastante distintos (3,5kVA-1,5kVA).

4.16 Monitoramento das Distorções na Forma de Onda dos Equipamentos da Produção

Aqui nestas figuras procuramos mostrar o comportamento de diversos equipamentos do setor produtivo da fábrica. No caso da máquina da figura 4.63 trata-se de um equipamento hidráulico antigo, cujo o seu regime de operação é intermitente.

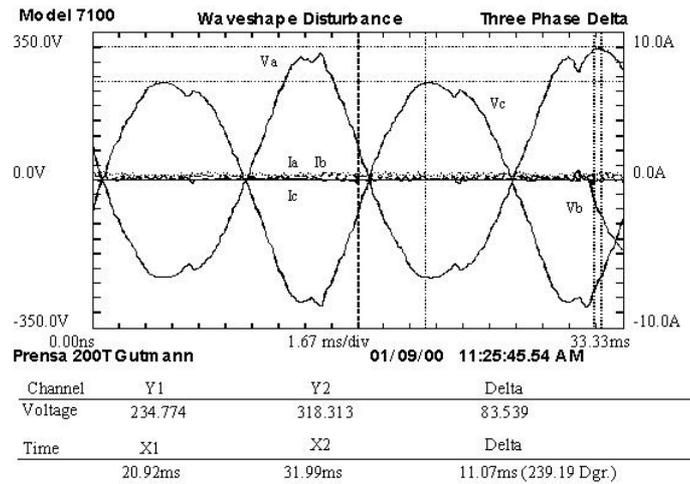


Figura 4.63: Comportamento das Tensões V_a, V_b, V_c e das correntes I_a, I_b, I_c da Prensa

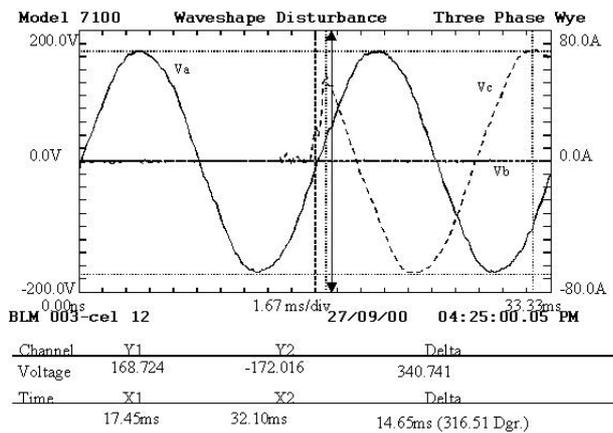


Figura 4.64: Forma de Onda das tensões da Curvadora de Tubos BLM

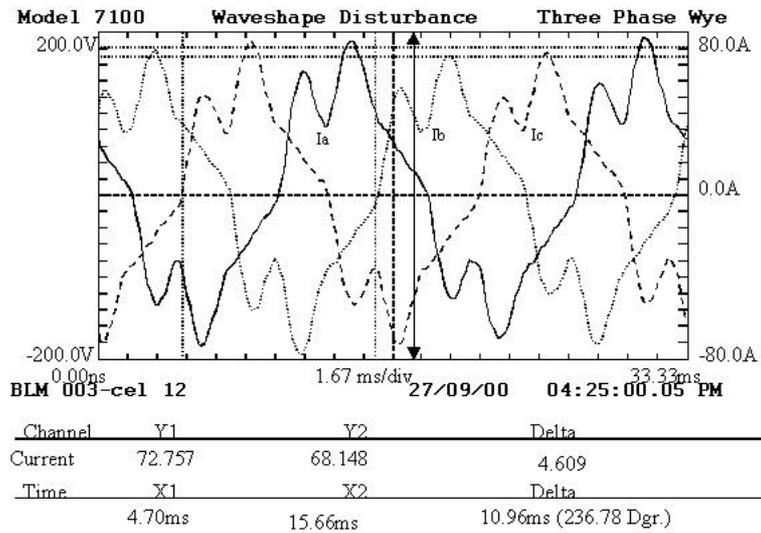


Figura 4.65: Forma de Onda das correntes da Curvadora de Tubos BLM

Estes equipamentos são modernos, utilizam-se do Controlador Lógico Programável(PLC).

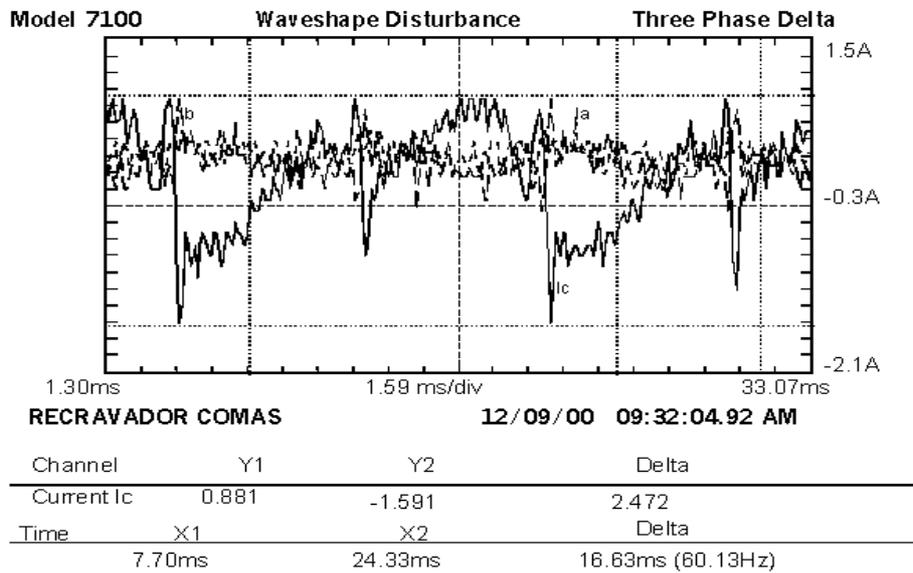


Figura 4.66: Forma de Onda das Correntes do Recravador Comas

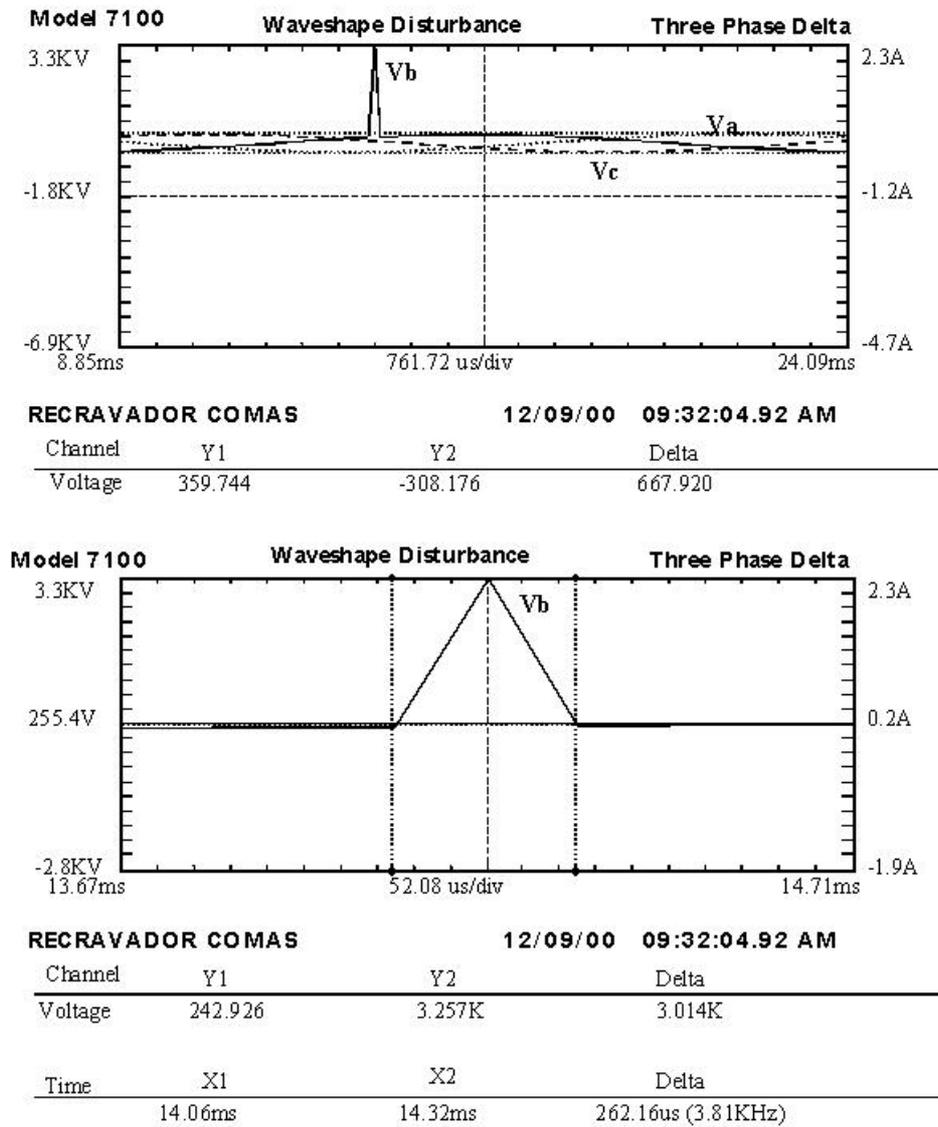


Figura 4.67: Forma de Onda das Tensões do Recravador Comas

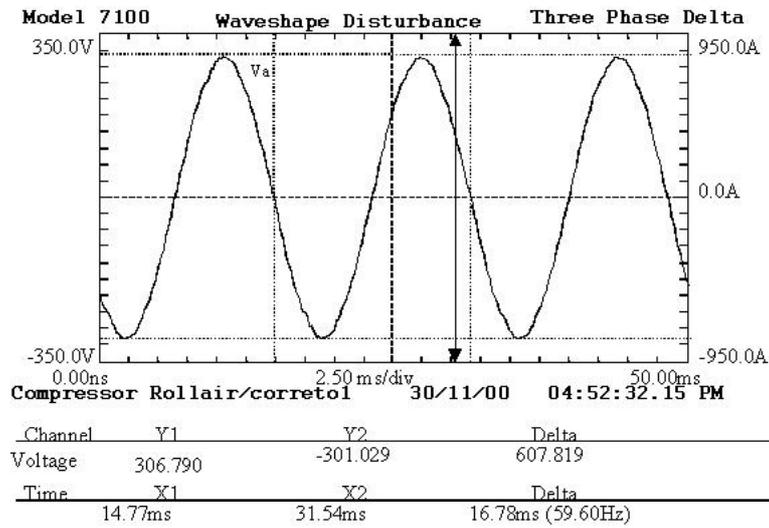


Figura 4.68: Forma de Onda da tensão Va do Compressor

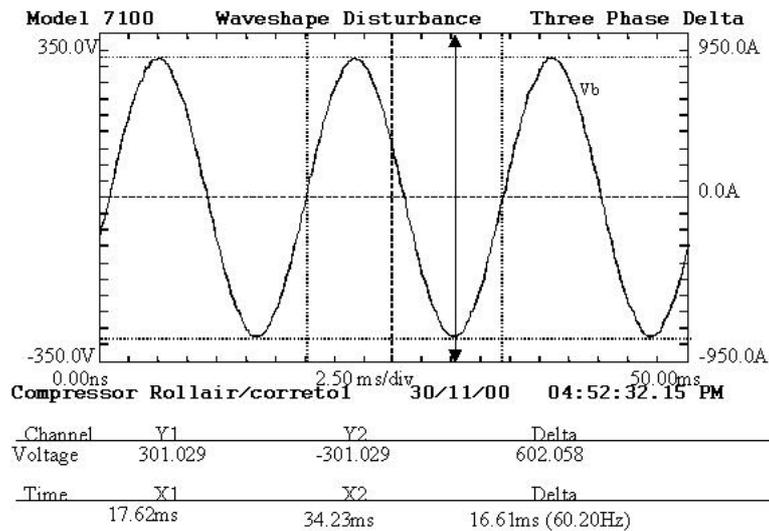


Figura 4.69: Forma de Onda da tensão Vb do Compressor

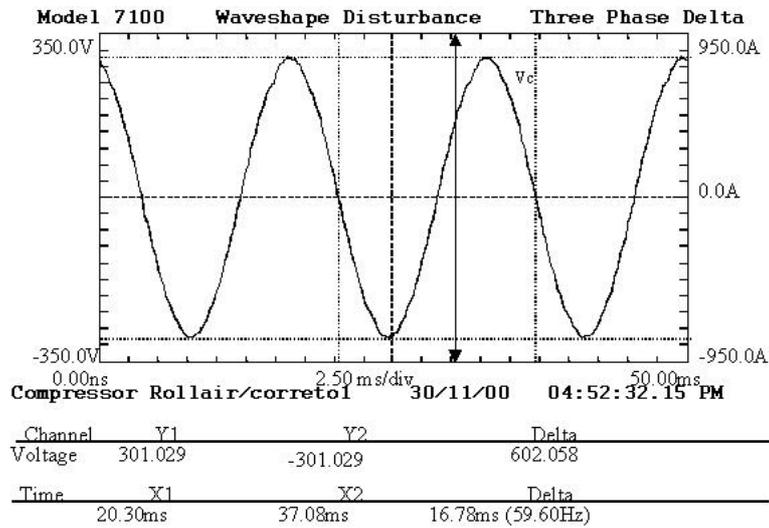


Figura 4.70: Forma de Onda da tensão V_c do Compressor

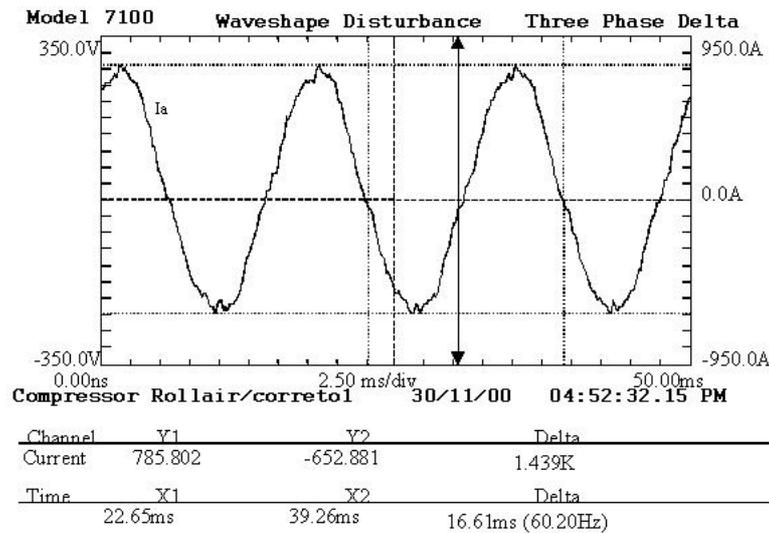


Figura 4.71: Forma de Onda da corrente I_a do Compressor

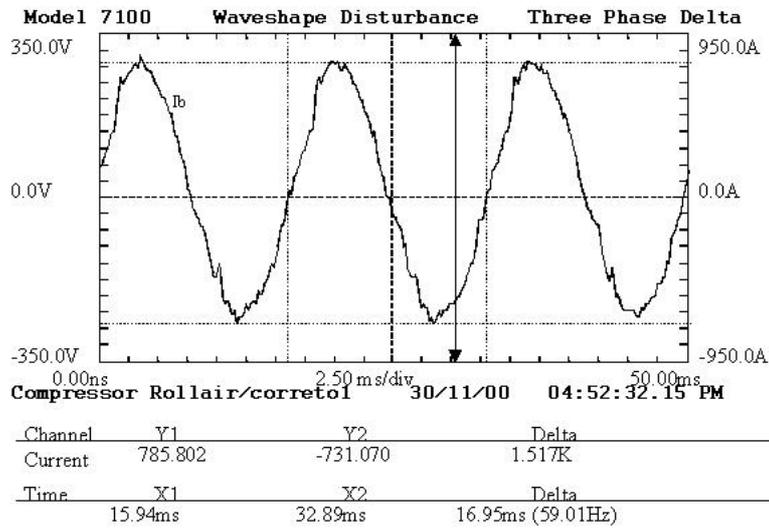


Figura 4.72: Forma de Onda da corrente Ib do Compressor

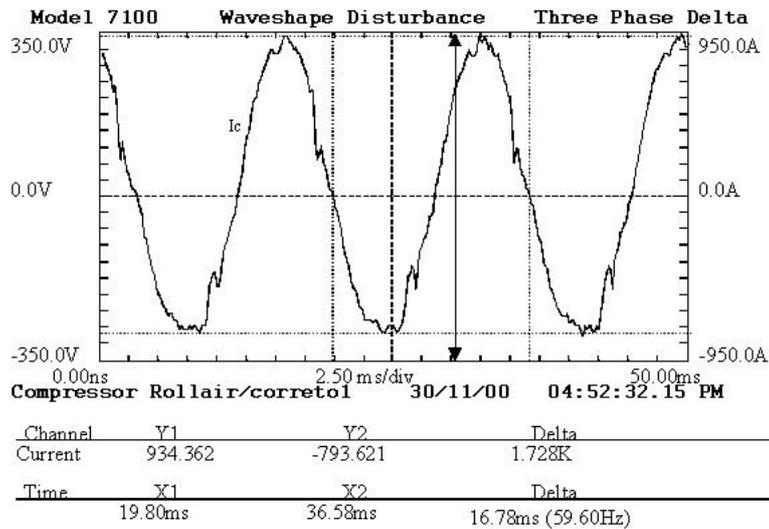


Figura 4.73: Forma de Onda da corrente Ic do Compressor

Capítulo 5

Conclusões Gerais

O maior desafio proposto neste trabalho consiste em buscar as causas das distorções de forma a mitigar os seus efeitos. Através dos dados e análises realizadas é possível elaborar um planejamento adequado no sentido de melhorar a operação desta indústria. Algumas soluções envolvendo baixo custo poderão ser implementadas em curto prazo, tais como:

1. Realizar uma discussão ampla na questão de operação das máquinas ou seja, implantar uma nova topologia do sistema elétrico industrial. Fazer um levantamento de campo das características de todos os cabos alimentadores juntamente com suas cargas, implementando assim mudanças na distribuição de cargas obedecendo as normas elétricas propostas pela ABNT, bem como atendendo a vulnerabilidade do processo produtivo;
2. Melhorar criteriosamente o carregamento dos transformadores com transferências de cargas, mediante a análise do comportamento transitório e das demandas obtidas. Verifica-se a necessidade da instalação de um transformador na rede de 380V para que seja possível o remanejamento de cargas, diminuindo assim as distâncias entre os equipamentos e seus circuitos alimentadores.

Outras, demandando custo e prazos médios poderão ser aplicadas :

1. Solicitar junto a concessionária um monitoramento do alimentador 11,9kV, realizando um levantamento de possíveis ocorrências de afundamentos de tensão que foram observados nos gráficos de tensão da Cabine de Medição, e promover uma discussão para se obter uma solução mais eficiente no sentido de reduzir estes afundamentos;
2. Melhorar o sistema de aterramento, com as medições necessárias das resistências de terra em cada malha, para que se possa fazer um estudo eficaz em relação ao desequilíbrio do sistema elétrico;

3. Compensação da potência reativa em pontos estratégicos, fazendo uma modelagem com base na topologia do sistema elétrico para se determinar os pontos adequados para instalação dos capacitores, para este objetivo utiliza-se o EMTP ou outros programas de análise de transitórios que são similares. É muito importante também, ser estudado o chaveamento destes capacitores, visto que, é uma das condições mais críticas para provocar ocorrência de distúrbios;
4. Instalar filtros ativos para compensação de harmônicas ou de fator de potência, portanto deve-se fazer um estudo de alocação ótima destes filtros em vários pontos dos barramentos alimentadores, obtido através de um programa computacional. O critério de avaliação da necessidade da utilização deste dispositivo deve ser bem elaborado, devido ao seu custo ainda elevado;
5. Utilizar dispositivos eletrônicos(RCT, CCT, SVC), para compensar os efeitos das variações da carga, corrigir o fator de potência ou equilibrar a carga;
6. Uma abordagem direta junto aos fabricantes das máquinas de solda, no que se refere a melhoria do projeto do retificador trifásico. Instalação inicial de um filtro sintonizado para quinta harmônica, e através de um estudo mais detalhado optar por um filtro ativo que poderá eliminar as demais componentes harmônicas. Alterar a ligação de estrela/delta para delta/delta do transformador instalado internamente na máquina de solda.
7. Desenvolver um estudo de melhorias e seletividade do sistema de proteção dos principais barramentos e transformadores do sistema elétrico industrial;
8. Sistematizar um controle de demanda automático, o que permitirá um gerenciamento do consumo de energia elétrica em cada setor da fábrica, o que permitirá obter valores corretos do custo de energia elétrica em cada setor produtivo, e ainda pode-se cumprir de forma eficiente o contrato de demanda máxima junto à concessionária.
9. O grande desafio para futuros trabalhos, é a aplicação de dispositivos de controle capazes de atender as necessidades na correção dos distúrbios inerentes ao setor industrial, visto que haverá uma implementação cada vez maior na automatização do processo de produção.

Referências Bibliográficas

- A. Lacoste, Rev. Gen. Electr. (1969). Courants oscillatoires entretenus dans un reseau par un desequilibre particulier des angles de commande d'un convertisseur courant alternatif/courant continu. *Gen. Electr.*
- A.G. Phadke, J.H. Harlow (1968). Generation of abnormal harmonics in high voltage ac/dc power systems. *IEEE-PAS*.
- A.G.G. Lima, R.P.D. Ross, A.P. Guarini P. Lourenço A.J.C. Mello (1996). Qualidade de energia-estudos de casos reais - 1^a parte, fornecimento à indústria metalúrgica que utiliza fornos de indução. *SBQEE* pp. 12–17.
- Ainsworth, J.D. (1967). Harmonic instability between controlled static convertors and ac networks. *Proc.IEE*.
- A.M. Sharaf, S.I. Abu-Azab (2000). Power quality enhancement of time dependent inter-harmonic loads. *Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida I*, 46–54.
- ANSIC84.1 (1989). Electric power systems and equipment-voltage ratings(60hz).
- Ary D Ajuz, Cláudio dos Santos Fonseca, et.al. (1987). *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamneto*. Universidade Federal Fluminense Editora Universitária - EDUFF.
- BMI, Basic Measuring Instruments (1993). *Handbook of Power Signatures*. 2 ed.. Basic Measuring Instruments BMI. Especificações:Fabricante: BMI Basic Measuring Instruments, Modelo:7100, Tensão: 0-600V, Corrente:0-3000A(depense da ponta de prova de corrente que é usada), Este equipamento tem, através de software dedicado, possibilidade de avaliar a Qualidade de Energia, dependendo da escolha do que se quer avaliar, assim ele pode ser ativado com Waveshape Disturbances (usado para detectar mudanças no padrão das formas de ondas), Impulse Disturbances (usado para captar impulsos entre 5KHz e 1MHz),

- RMS Disturbances (usado para detectar alterações do valor eficaz), Snapshots Waveform (usado para avaliar conteúdo harmônico) ou Demand Report (relatório de demanda).
- Bowles, J.B. (1970). Ac system and transformer representation for hvdc transmission studies. *IEEE-PAS*.
- Chin E.Lin, Cheng Long Cheng, Ching Lien Huang e Jim Chwen Yeh (1993). Investigation of magnetizing inrush current in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery, Part I and Part II* **8**(1), 246–263.
- D. Daniel Sabin, Daniel L. Brooks, Ashok Sundaram (1999). Indices for assessing harmonic distortion from power quality measurements: definitions and benchmark data. *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**, 489–496.
- de Oliveira, J.C. (1978). Multiple Converter Calculations with Non-Ideal Conditions. Tese de Doutorado. Victoria University of Manchester.
- D.E. Steeper, R.P. Stratford (1976). Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters. *IEEE-IA*.
- Deckmann, Sigmar Maurer (1999). *Avaliação da Qualidade da Energia*. Unicamp.
- Ernesto João Robba, Nelson Kagan, Hernán Prieto Schmidt Carlos C.B. Oliveira (1996). *Introdução A Sistemas Elétricos DE Potência*. 2 ed.. Editora Edgard Blucher Ltda.
- F.J. Salem, R.A. Simmons (2000). Power quality from a utility perspective. *Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida* **III**, 874–881.
- Francis C. Pereira, José C. de Oliveira, Anderson L.A. Vilaça (1997). Uma proposta de procedimento para a análise da qualidade da energia elétrica. *SBQEE*.
- François D. Martzloff, Thomas M. Gruz (1988). Power quality site surveys: Facts, fiction, and fallacies. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Greenwood, Allan (1971). *Electrical Transients In Power Systems*. i ed.. John Wiley & Sons, Inc.
- IEEE1100 (1992). *IEEE Std 1100-1992 Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IEEE1159 (1995). *IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

- IEEE141 (1993). *IEEE Std 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IEEE519 (1996). *IEEE Std 519-1996, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Igor Zhezhelenko, Yuri Sayenko (2000). Analysis methods of interharmonics investigations in power supply systems. *Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida I*, 61–63.
- I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi M.J. Corridori R.D. Archambeault (1999). Harmonics trend in ne usa: A preliminary survey. *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**(4), 1488–1494.
- J. Maria de C. Filho, J. Policarpo G. Abreu, Francisco M. Vilas-Boas (1997). Medidas preventivas e corretivas para minimizar o impacto de voltage sags. *SBQEE*.
- J. Policarpo G. Abreu, José Maria C. Filho, Oliver Péricles O. Freitas (1997). Reflexos da conservação na qualidade da energia elétrica. *Escola de Engenharia de Itajubá-EFEI*.
- J. Reeve, T. Subba Rao (1974). Dynamic analysis of harmonic interaction between ac and dc power systems. *IEEE-PAS*.
- Key, Thomas S. (1979). Diagnosing power quality-related computer problems. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Linders, J.R. (1979). Electric wave distortion: Their hidden costs and containment. *IEEE-IA*.
- N.G. Hingorani, M.F. Burberry (1970). Simulation of ac system impedance in hvdc system studies. *IEEE-PAS*.
- Oliver Péricles O. Freitas, J. Policarpo G. Abreu, José Maria C. Filho (1997). Reflexos da conservação na qualidade da energia elétrica. *SBQEE*.
- Pacheco, E.J.P (1977). System Voltage Control Using Saturated Iron Cored Reactors. Tese de Doutorado. Victoria University of Manchester.
- Pires, Francisca A.C. (1996). *Cargas Geradoras de Harmônicas*. Unicamp.
- Price, Kenneth (1992). Practices for solving end-user power quality problems. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

- Ribeiro, P.F. (1975). Investigations of Harmonics in Transmission Systems. Tese de Doutorado. Victoria University of Manchester.
- Ricardo A. Dutra, Haroldo B. Ricardo, Lúcio de C. Neves Frederico P. Pereira Alfredo Ceci (1996). Uma aplicação da qualidade de energia elétrica na parceria concessionária x consumidor privado experimentado por fornos. *SBQEE* pp. 28–33.
- Robert C. Degenoff, Russ Barss, Daniel Carnovale e Steven Raedy (2000). Reducing the effect of sags and momentary interruptions: a total owning cost prospective. *Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida II*, 397–403.
- Rossi, José Carlos (1996). Saturação Assimétrica em Transformadores Trifásicos. Tese de Doutorado. Unicamp.
- R.P.D. Ross, A.G.G. Lima, A.P. Guarini P. Lourenço A.J.C. Mello (1996). Qualidade de energia-estudo de casos reais - 2ª parte, fornecimento à indústria siderúrgica que utiliza fornos a arco e laminadores. *SBQEE* pp. 18–22.
- Shipp, D.D. (1979). Harmonic analysis and suppression for electrical systems supplying static power converters and other nonlinear loads. *IEEE-IA*.
- Simpson, Ronal H. (1998). Instrumentation, measurement techniques, and analytical tools in power quality studies. *IEEE Trans. Ind. Applications* **34**, 534–548.
- T. Lobos, Z. Leonowicz, J. Rezmer (2000). Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods. *Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida I*, 335–340.
- Tatiana N. Ribeiro, Alexandre F.M. Bueno (1997). Monitoramento e diagnóstico da qualidade da energia elétrica fornecida a um consumidor industrial atendido em tensão de distribuição. *SBQEE*.

??????